

新疆玉龙喀什河与策勒河流域胡杨年轮 对气象因子的响应研究

开买尔古丽·阿不来提, 毛东雷*, 曹永香, 苏松岭

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

摘 要:在树木年轮学与气候学理论基础上,以新疆和田地区玉龙喀什河与策勒河下游河岸胡杨为研究对象,基于流域对应的气象、沙尘天气日数、策勒河径流量等因子,分析了玉龙喀什河与策勒河流域胡杨年轮对气象因子的响应特征,以明确干旱荒漠区胡杨生长过程中的气候限制因子,为促进胡杨生态修复及沙尘防治提供理论依据。结果显示:(1)1976–2018年期间,两流域的气象条件基本一致,其中年均气温呈明显上升趋势,年均降水量呈波动上升趋势,大气相对湿度呈下降趋势,年均沙尘暴、扬沙、浮尘日数均呈显著下降趋势;玉龙喀什河流域的胡杨年轮指数呈先显著上升后整体平缓变化的趋势,而策勒河流域的胡杨年轮指数从1985年开始呈较显著的上升趋势。(2)策勒河流域胡杨年轮指数对年均气象要素的响应显著高于玉龙喀什河流域,且策勒河流域树木年轮指数与年均气温呈显著正相关关系($P < 0.01$),但两流域胡杨年轮指数对年均降水量和大气相对湿度的响应均不显著。(3)玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与2月份的大气相对湿度呈显著负相关关系($P < 0.05$);策勒河流域胡杨年轮指数与3、4、9、10月份的气温呈显著正相关关系,与6月份的大气相对湿度呈显著负相关关系($P < 0.05$),与2、4月份的径流量呈显著负相关关系。(4)玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与秋冬季节的沙尘暴日数、扬沙日数均呈显著负相关关系;除1、2月份外,策勒河流域胡杨年轮指数与月沙尘(沙尘暴、扬沙、浮尘)天气日数基本均呈显著负相关关系。研究认为,玉龙喀什河与策勒河流域的降水稀少且蒸发量大,胡杨生长所需水源主要依赖于地下水和地表径流的补给,策勒河流域胡杨年轮指数受气温、径流量以及修建水库的影响比较明显。

关键词:玉龙喀什河流域;策勒河流域;胡杨年轮;气象因子

中图分类号: Q948.11; S792.11

文献标志码: A

Response of *Populus euphratica* Annual Rings to Meteorological Factors in Yurungkash and Cele River Basins of Xinjiang

KAMARGUL Ablat, MAO Donglei*, CAO Yongxiang, SU Songling

(College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University/The Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone of Xinjiang, Urumqi 830054, China)

Abstract: Based on the theory of tree ring and climatology, *Populus euphratica* along the lower reaches of Yurungkash River and Cele River in Hotan area of Xinjiang was taken as the research object. Based on the corresponding meteorological factors in the watershed, dust weather days, the runoff of Cele River, the

收稿日期: 2020-11-18; **修改稿收到日期:** 2021-03-10

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH064);新疆师范大学人文社会科学重点研究基地丝绸之路经济带城市发展研究中心招标课题(XJNURWJD2019A06);新疆师范大学“十三五”校级重点学科地理学招标课题(17SDKD0701)

作者简介: 开买尔古丽·阿不来提(1993–),女,硕士研究生,主要研究风沙地貌及沙漠化防治。E-mail: 1121567686@qq.com

* 通信作者: 毛东雷,副教授,硕士生导师,主要研究风沙地貌及沙漠化防治。E-mail: donglei6325@sina.com

response characteristics of *P. euphratica* in two basins to meteorological factors were analyzed to determine the characteristics of *P. euphratica* in the growth process of the arid desert area. The climate limiting factors provide theoretical basis for promoting the ecological restoration of *P. euphratica* and sand-dustweather prevention. The results showed that: (1) during 1976—2018, the meteorological conditions of these two river basins were basically the same. The average annual temperature showed an obvious upward trend, the average annual precipitation showed a fluctuating upward trend, the relative humidity of the atmosphere showed a downward trend, the average annual sandstorm, blowing sand, and floating dust days all show a significant downward trend; the *P. euphratica* annual ring index in the Yurungkash River Basin showed a significant increase first and then the overall trend of gentle changes, while the *P. euphratica* annual ring index in the Cele River Basin has shown a significant upward trend since 1985. (2) The response of tree ring index of *P. euphratica* in the Cele River Basin to annual meteorological factors was significantly higher than that in the Yurungkash River Basin, and tree ring index of the Cele River Basin had a significant positive correlation with annual temperature ($P < 0.01$). However, the ring index of *P. euphratica* has no significant effect on annual precipitation and relative index of atmosphere. (3) There was a significant negative correlation between ring index of *P. euphratica* and relative humidity in February in the Yurungkash River Basin ($P < 0.05$); there was a significant positive correlation between ring index of *P. euphratica* and temperature in March, April, September and October in the Cele River Basin, and there was a significant negative correlation between ring index of *P. euphratica* and relative humidity in June ($P < 0.05$), and there was a significant negative correlation between ring index of *P. euphratica* and runoff in February and April. (4) The annual ring index of *P. euphratica* in the Yurungkash River Basin has a significant negative correlation with the days of dust storms and blowing sand in autumn and winter; except January and February, and the annual ring index of *P. euphratica* in the Cele River Basin has a significant negative correlation with monthly sand dust weather days. The study showed that two basins have sparse precipitation and large evaporation. The water source for the growth of *P. euphratica* mainly depends on the supply of groundwater and surface runoff. The annual ring index of *P. euphratica* in the Cele River Basin is obviously affected by temperature, runoff and reservoir construction.

Key words: Yurungkash River Basin; Cele River Basin; *Populus euphratica* ring; meteorological factors

全球气候变化愈来愈受到国内外的关注,气候变化与植物生长关系密切,而树木年轮对气候变化记录方面起到重要的作用^[1-2]。树木年轮具有连续性强、定年精确、气候信息全面、分辨率高等特点,在植物生长与气候关系中成为一个重要手段^[3]。彭剑峰等^[4-8]对黄山松、红松、西伯利亚落叶松、雪岭云杉、胡杨等树种研究中指出,树木的径向生长与气温和降水量在不同时空尺度有显著的相关性;胡杨作为塔里木盆地重要的树种,对其研究主要反映在径向生长对气象因子、径流量与地下水位之间的响应^[9-11]。

新疆塔克拉玛干沙漠南缘的和田河流域位于西北干旱荒漠区,生态环境十分恶劣,是中国沙尘天气频发区之一^[12],胡杨、灰杨等乔木对荒漠区具有防风固沙、改善生态环境、保护生物多样性、保障绿洲农牧业生产等作用^[13],在气候变化背景下,胡杨年轮与气象因子之间的研究,促进荒漠植被的恢复和流域可持续发展、对塔里木盆地南缘昆仑山北坡流域生态环境改善有着非常重要的影响。深入沙漠的绿色走廊衰败和消亡是沙漠化扩大的重要原因^[14],

玉龙喀什河和策勒河流域与塔里木盆地南缘其他流域相比,具有片状胡杨林存在,且本区域胡杨与气象因子之间响应研究较少,因此本研究对两个流域树木年轮指数与气象因子、径流量、沙尘暴、扬沙、浮尘日数之间的相关性进行探讨,确定胡杨生长过程中的气候限制因子,对胡杨生长环境保护和管理、风沙灾害的防御、促进植被健康生长和生态改善提供重要的理论依据并具有现实指导意义。

1 研究区概况

和田地区(77°03'45"~85°16'35"E, 34°11'21"~39°40'43"N)坐落在新疆南部,属于暖温带极干旱荒漠气候,年平均气温为 11.0~12.1℃,年降水量为 28.9~47.1 mm,年蒸发量 2 198~2 790 mm^[15]。研究区位于和田河流域的和田市和策勒县境内(图 1),流经和田地区的大小河流发源于昆仑山,是和田绿洲的唯一水源^[16],其中策勒河西与玉龙喀什河接壤,向北流入塔里木盆地中的塔克拉玛干沙漠^[17]。该流域植被组成单一,乔木层以胡杨、灰叶胡杨为

主,乔木层郁闭度在 0.16~0.58 之间^[18],玉龙喀什河和策勒河为该流域发育的胡杨资源提供较为充足的水文条件。研究区植被覆盖度低、地表沙土大面积裸露,使该地区的沙尘灾害频发,是中国沙尘灾害最严重的地区之一。开展河流沿岸沙漠植被资源研究,对沙尘天气的预防、水资源的调节、树木年轮学气候恢复都具有一定的科学指导意义。

2 研究方法

2.1 样本的选取和年轮宽度的测定

在 2019 年 8 月 2 日和 2019 年 8 月 4 日,以玉龙喀什河下游胡杨断面和策勒河下游胡杨断面作为采样区域。采样区风沙频繁、降水稀少、土壤贫瘠,下垫面植被稀少,策勒河下游胡杨断面水文条件相对较差;采样时均选择了中阶地次野生胡杨林,尽量选取地形起伏不大的区域,在采集过程中成熟龄胡杨相对难寻,且较大直径的胡杨树芯存在腐朽、空心等情况,因此采集的胡杨林木多为中龄胡杨。每隔 50~70 m 选取长势良好的胡杨树木进行年轮采样,大概距离地面 1.3 m 高度,在同一棵树上通过髓

心采集 2~3 个树芯,共采集 21 棵树(在玉龙喀什河下游采集 11 棵、策勒河下游采集 10 棵,共采集了 43 个树芯,表 1)。

将采集样本分别装进样品袋,进行编号带回实验室,将断裂和未过髓心的 2 个树芯剔除,待树芯干燥后,按照在木槽粘贴、固定、打磨的标准程序处理树芯,利用以精度为 0.001 mm 树木年轮测定仪器(Lintab^{TM6})测量年轮宽度^[19],对于测量完宽度的树木年轮数据用 Cofecha 程序进行鉴定^[20],用 TSAP 软件消除和矫正错误和误差。在 43 个树芯中,通过交叉定年和质量检验剔除 3 个树芯,将断裂和未过髓心的 2 个树芯剔除,最终确定实验数据所用到的树芯一共 38 个。

2.2 数据资料与方法

本研究选取了离 2 个采样点较近的 2 个气象站点和 1 个水文站:和田市气象站(79°55′59.9″E,37°7′59″N),1953 年建站并规范性监测,本研究所需数据记录时间为 1976—2015 年。策勒县气象站(80°48′00″E,37°1′0.0012″N),1960 年建站并规范性检测,本研究所需数据记录时间为 1981—2015 年。2 个气象站点均包括逐年平均气温、降水、大气相对湿度、沙尘暴、扬沙、浮尘日数;逐月平均气温、降水、大气相对湿度、沙尘暴、扬沙、浮尘日数等本研究所需数据;数据均来源于国家气候中心和新疆维吾尔自治区气象局,数据均无缺失且真实可靠。策勒水文站(36°51′53.33″N,80°47′39.39″E),本研究所需数据记录时间为 1981—2018 年,数据完整。本研究重点研究 2 个河流域胡杨生长与气象及沙尘日数因子之间的响应,而径流量仅在讨论胡杨生长的环境制约因素中使用。

研究胡杨年轮与气象因子、沙尘天气日数、径流量之间的变化关系和趋势,各要素之间相关性分析利用 SPSS 17.0 软件进行处理,用 Arcgis 和 Origin9.0 以及 CorelDRAW X4 SP2 软件进行绘图。

2.3 胡杨年轮指数的确定

胡杨年轮在生长过程中会受到气候因子、光照、

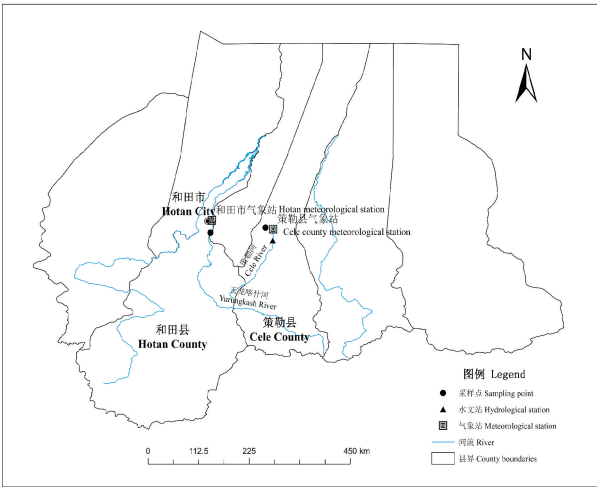


图 1 采样点、气象站和水文站点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling points, meteorological stations and hydrological stations

表 1 玉龙喀什河和策勒河流域胡杨年轮采集的基本情况

Table 1 Basic situation of *P. euphratica* ring collection in Yurungkash River and Cele River Basin

采样区域 Sampling area	采样数量(树/样芯) Number of samples (trees/cores)	平均树龄 Average tree age/a	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	最大胸径 Maximum diameter at breast height/cm	最小胸径 Minimum DBH/cm
玉龙喀什河流域 Yurungkash River Basin	11/23	27.35	13.28	17.2	8
策勒河流域 Cele River Basin	10/20	26.58	13.17	16.1	10.2

树龄等要素的影响,标准化处理方法是减少树龄对年轮宽度影响的常用方法,对胡杨年轮数据标准化处理是按照比值法,在原来胡杨年轮数据的基础上获得的新的年轮指数序列,公式为: $I_i=W_i/Y_i$

式中, $i=1,2,3\cdots,n$ 得到年轮指数为 I_i , 实际生长值为 W_i , 预测的年轮宽度为 Y_i , Y_i 是分别对 2 个流域所有胡杨个体做的生长趋势线读出,在对年轮数据标准化处理中,对玉龙喀什河下游 10 颗胡杨个体(20 个树芯)、策勒河下游 10 颗胡杨个体(18 个树芯)均做了生长趋势线。

3 结果与分析

3.1 年轮指数与气象因子的变化趋势分析

在 1976—2018 年期间,玉龙喀什河流域的胡杨年轮指数从 1983 年开始呈现明显的上升趋势,最大年轮指数出现在 1985 年,为 1.77;最小年轮指数出现在 1978 年,为 0.27;整体呈现出先上升后趋于平缓的趋势。1976—2015 年年均气温呈上升趋势,最高气温出现在 2015 年,为 14.80℃;最低气温出现在 1984 年,为 11.90℃;平均气温为 13.10℃,与树木年轮指数呈正向变化关系(图 2)。年均降水量呈波动上升趋势,在 2010 年年均降水量最多,为 111.90 mm;在 1985 年年均降水量最少,为 3.40 mm;年平均降水量为 41.18 mm,与胡杨年轮指数呈正向变化关系。大气相对湿度整体呈下降趋势,在 1993 年大气相对湿度最大,为 48%;在 2007 年大气相对湿度

度最小,为 32%;年均大气相对湿度为 41.03%,与胡杨年轮指数呈反向变化关系。年均沙尘暴、扬沙、浮尘日均呈现显著的下降趋势,均与玉龙喀什河流域的胡杨年轮指数呈反向变化关系(图 2)。中小径树木径向生长与生长季前期气象要素关系密切,上一年过高的气温会抑制树木的生长^[5]。玉龙喀什河下游 1984 年气温为 11.90℃,温度适宜,降水和相对湿度波动变化不大,形成了适宜胡杨的光合作用及各个器官内养分输送的气候条件,进而 1985 年年轮指数最大;而最小年轮指数出现在 1978 年,与当年胡杨处于幼龄阶段有关。

在 1981—2018 年期间,策勒河流域的胡杨年轮指数从 1985 年开始呈现较显著上升趋势,最大年轮指数出现在 2018 年,为 1.95;最小年轮指数出现在 1984 年,为 0.46。1981—2015 年年均气温呈上升趋势,最高气温出现在 2007 年,为 14.3℃;最低气温出现在 1989 年,为 11.6℃;平均气温为 12.78℃,与树木年轮指数呈正向变化关系(图 3)。年均降水量呈波动变化趋势,上升不明显,在 2010 年年均降水量最多,为 120.80 mm;在 1985 年年均降水量最少,为 8.20 mm;年平均降水量为 42.01 mm,与胡杨年轮指数呈正向变化关系。大气相对湿度整体呈下降趋势,在 2003 年大气相对湿度最大,为 45%;在 2011 年大气相对湿度最小,为 33%;年均大气相对湿度为 39.78%,与胡杨年轮指数整体呈反向变化关系。年均沙尘暴、扬沙、浮尘日均呈现显著的

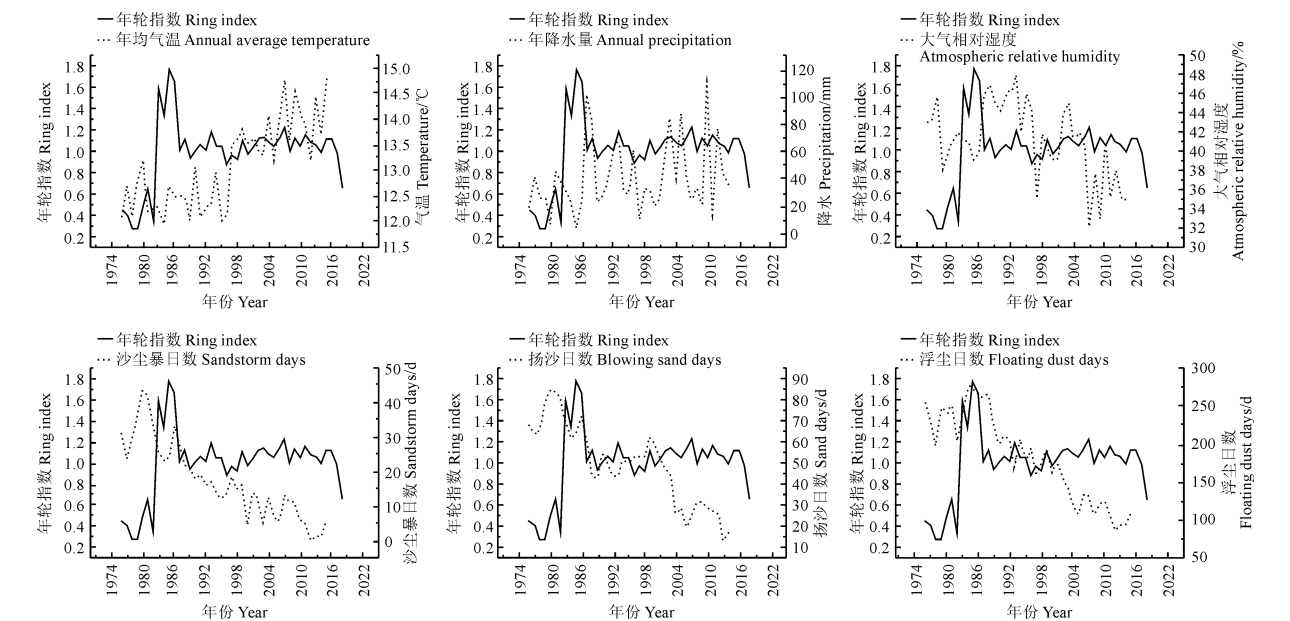


图 2 玉龙喀什河流域年轮指数与气象因子间的变化趋势图

Fig. 2 Variation trend between annual ring index and meteorological factors in Yurungkash River Basin

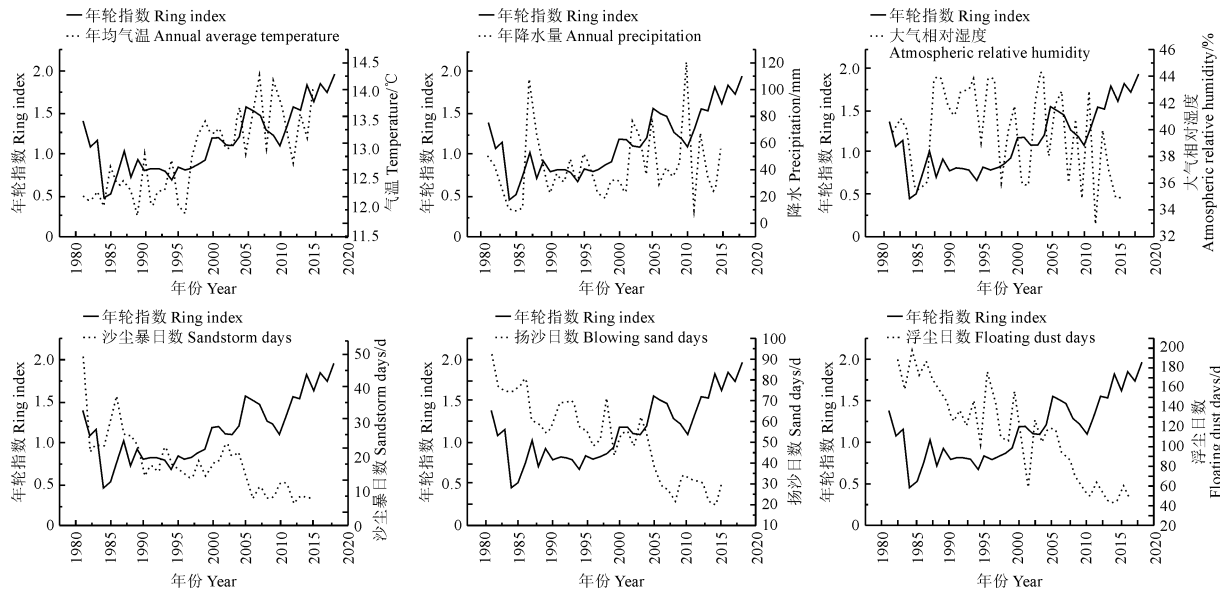


图3 策勒河流域年轮指数与气象因子间的变化趋势图

Fig. 3 Variation trend between annual ring index and meteorological factors in Cele River Basin

下降趋势,分别在 1981、1981、1983 年出现最大值,为 49、92、195 d;在 2012、2014、2012 年出现最小值,为 2、19、39 d,均与策勒河流域的胡杨年轮指数呈反向变化关系(图 3)。

玉龙喀什河流域与策勒河流域胡杨年轮指数均与年均气温、降水呈正向变化关系,与大气相对湿度、年均沙尘暴、扬沙、浮尘日数呈负向变化关系,近 40 年来,气温的显著上升、降水量波动增加、大气相对湿度较小,使得研究区域地表土壤粘性增加、防护林体系得到改善;同时起风不容易起沙,沙尘天气日数减少,沙尘天气影响到太阳辐射强度,大气的散射和漫反射强度减少,进而光合作用增强,能促进植物的生长。张瑞波等^[21]研究指出塔克拉玛干西北边缘的树轮与沙尘日数呈现显著的负向相关性,玉龙喀什河流域与策勒河流域胡杨年轮指数的上升趋势与沙尘天气日数的减少具有一定的关系。2 个流域胡杨年轮指数与气象因子间的关系具有以上共性外,也有变化趋势上的不同,玉龙喀什河流域胡杨主要受到气象因子的影响,后期人类活动频繁,下游胡杨所需的水量减少,树木生长缓慢,树木年轮指数整体呈现出先上升后趋于平缓的趋势;策勒河流域胡杨年轮指数呈增长趋势,主要与所采集的树龄有较大的关系。2 个流域中气象因子整体变化趋势相同,但变化幅度不同;玉龙喀什河流域和田玉开采等人类活动较频繁,对下垫面植被破坏较为严重,使该区域下垫面温度相对高,大气相对湿度减少;而 2 个流域其他气象因子之间差异不大。

3.2 流域树木年轮和年均气象要素相关性分析

玉龙喀什河流域树木年轮指数与气象因子之间的相关性不显著(表 2),年轮指数和沙尘暴、扬沙日数分别呈现较显著负相关关系($P < 0.05$),年均气温与相对湿度、沙尘暴日数、扬沙日数、浮尘日数呈现显著的负相关关系($P < 0.01$),年均降水和大气相对湿度呈现较显著正相关关系($P < 0.01$),而大气相对湿度和扬沙日数呈正相关关系、与浮尘日数呈现显著的正相关关系($P < 0.01$),沙尘日数之间也呈显著的正相关关系($P < 0.01$)。策勒河流域树木年轮指数与气象因子之间有较显著的相关性(表 3),树木年轮指数与年均气温呈现显著的正向变化关系($P < 0.01$),年轮指数与沙尘暴、扬沙、浮尘日数均呈现显著负相关关系($P < 0.01$),年均气温与大气相对湿度、沙尘暴、扬沙、浮尘日数、年均径流量呈现显著的负相关关系($P < 0.01$),年均降水与年均大气相对湿度之间在 0.01 水平上呈现出正向相关性,沙尘天气日数与年均径流量呈显著的正相关关系($P < 0.01$),沙尘天气日数之间均呈显著的正相关关系($P < 0.01$),策勒河流域胡杨年轮指数与年均径流量关系不显著。

降水和温度等水热条件状况可能会改变土壤状况^[22],玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与气温、降水量、大气相对湿度相关性不显著,可能与玉龙喀什河支流水对胡杨次生林进行侧向补给有关。而策勒河流域对气候因子响应较好(表 2),尤其与年均气温呈显著的正相关性,气温的升高能促使策勒河流

域胡杨的光合作用进行,进而促进胡杨的径向生长。玉龙喀什河流域与策勒河流域胡杨年轮指数均与沙尘暴、扬沙、浮尘日数呈现较显著负相关关系,这表明近40年来研究区胡杨生长与沙尘天气日数具有显著关系,沙尘暴、扬沙、浮尘天气的减少有助于春夏季胡杨光合作用的进行,一定程度上促进了胡杨的生长。

3.3 流域树木年轮和月均气象要素相关性分析

玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与2月份的大气相对湿度呈显著的负相关关系($P<0.05$)(表4),与1、9月份的沙尘暴日数呈显著的负相关关系($P<0.01$),与4、10月的沙尘暴日数呈显著的负相关关系($P<0.05$),与12、9月份的扬沙日数呈显著的负相关关系($P<0.01$),与1、7月份的扬沙日数呈显著的负相关关系($P<0.05$)。沙尘天气在秋冬季节

发生的次数少,而胡杨年轮指数与秋冬季节的沙尘暴日数和扬沙日数呈显著的负相关关系,沙尘暴日数减少使太阳辐射增强,提供给胡杨光能增多,有利于胡杨的径向生长。

策勒河流域胡杨年轮指数与3、9、10月份的平均气温呈现显著正向相关性($P<0.01$)(表5),与4月份月均气温呈现显著正向相关性($P<0.05$),春秋季节的气温与策勒河流域胡杨径向生长有密切的关系,在3、4月份气温回升,冰雪融化,策勒河流域水源的补给主要靠冰雪融水,为胡杨的生长提供了水分条件,有利于胡杨的萌发生长,植被的生长对气温和水分响应具有滞后性,9、10月份的胡杨的径向生长可能受到7、8月份气温变化的影响,策勒河流域胡杨年轮指数还与8、10月份的大气相对湿度呈负向相关性($P<0.05$),同时与沙尘天气日数(沙尘暴、

表2 玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与气象因子的相关性分析矩阵

Table 2 Correlation analysis matrix between ring index and meteorological factors of *P. euphratica* in Yurungkash River Basin

指标 Index	年轮指数 Annual ring index	年均气温 Annual average temperature/℃	降水 Precipitation /mm	相对湿度 Relative humidity/%	沙尘暴日数 Sandstorm days/d	扬沙日数 Sand blowing days/d	浮尘日数 Days of floating dust/d
年轮指数 Annual ring index	1						
年均气温 Annual average temperature/℃	0.20	1					
降水 Precipitation/mm	0.05	−0.04	1				
相对湿度 Relative humidity/%	−0.16	−0.74**	0.43**	1			
沙尘暴日数 Sandstorm days/d	−0.39*	−0.58**	−0.28	0.28	1		
扬沙日数 Sand blowing days/d	−0.36*	−0.65**	−0.27	0.35*	0.87**	1	
浮尘日数 Days of floating dust/d	−0.10	−0.72**	−0.18	0.47**	0.82**	0.83**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。下同
Note:** indicate significant correlation at 0.01 level (bilateral); * indicates significant correlation at 0.05 level (bilateral). The same as below

表3 策勒河流域胡杨年轮指数与气象因子的相关性分析矩阵

Table 3 Correlation analysis matrix between ring index and meteorological factors of *P. euphratica* in Cele River Basin

指标 Index	年轮指数 Annual ring index	年均气温 Annual average temperature /℃	降水 Precipitation /mm	相对湿度 Relative humidity/%	沙尘暴日数 Sandstorm days/d	扬沙日数 Sand blowing days/d	浮尘日数 Days of floating dust/d	年均径流量 Average annual runoff/km ³
年轮指数 Annual ring index	1							
年均气温 Annual average temperature/℃	0.56**	1						
降水 Precipitation/mm	0.22	0.06	1					
相对湿度 Relative humidity/%	−0.25	−0.46**	0.54**	1				
沙尘暴日数 Sandstorm days/d	−0.43**	−0.53**	−0.04	0.11	1			
扬沙日数 Sand blowing days/d	−0.66**	−0.66**	−0.19	0.29	0.83**	1		
浮尘日数 Days of floating dust/d	−0.66**	−0.64**	−0.21	0.26	0.75**	0.87**	1	
年均径流量 Average annual runoff/km ³	−0.10	−0.51**	0.33	0.39*	0.47**	0.51**	0.49**	1

表 4 玉龙喀什河流域胡杨年轮指数与月均气象要素相关性分析

Table 4 Correlation analysis between annual ring index of *P. euphratica* and monthly meteorological elements in Yurungkash River Basin

月份 Month	气温 Temperature /℃	降水 Precipitation /mm	相对湿度 Relative humidity /%	沙尘暴日数 Sandstorm days/d	扬沙日数 Sand blowing days/d	浮尘日数 Days of floating dust/d
12	−0.06	−0.02	0.11	0.01	−0.45**	−0.23
1	0.13	−0.06	0.02	−0.48**	−0.35*	−0.25
2	0.30	−0.10	−0.35*	−0.26	−0.22	0.06
3	0.01	0.07	−0.18	−0.19	−0.19	0.01
4	0.02	0.06	−0.03	−0.36*	−0.17	−0.29
5	−0.05	0.10	0.06	−0.29	−0.28	−0.22
6	0.04	−0.14	−0.16	−0.08	−0.03	−0.09
7	0.02	0.25	0.09	−0.26	−0.34*	−0.09
8	0.21	−0.02	−0.13	−0.25	−0.27	−0.08
9	0.22	0.04	−0.09	−0.49**	−0.53**	0.03
10	0.03	−0.13	−0.09	−0.33*	−0.30	−0.06
11	0.19	0.14	−0.29	0.25	0.04	0.04

表 5 策勒河流域胡杨年轮指数与月均气象要素相关性分析

Table 5 Correlation analysis between annual ring index of *P. euphratica* and monthly meteorological elements in Cele River Basin

月份 Month	气温 Temperature /℃	降水 Precipitation /mm	相对湿度 Relative humidity/%	沙尘暴日数 Sandstorm days/d	扬沙日数 Sand blowing days/d	浮尘日数 Days of floating dust/d	径流量 Runoff/km ³
12	0.17	0.08	−0.01	−0.15	−0.28	−0.19	1
1	0.02	0.07	0.04	−0.06	−0.21	−0.07	−0.16
2	0.17	0.17	0.16	−0.42*	−0.33	−0.42*	−0.40*
3	0.48**	−0.13	−0.28	−0.35*	−0.55**	−0.43*	−0.29
4	0.38*	0.12	−0.23	−0.29	−0.45**	−0.62**	−0.56**
5	0.32	0.16	−0.14	−0.24	−0.65**	−0.63**	−0.16
6	0.20	0.07	−0.14	−0.41*	−0.42*	−0.60**	0
7	0.23	0.21	−0.26	−0.08	−0.40*	−0.53**	−0.22
8	0.30	−0.04	−0.34*	−0.33	−0.30	−0.61**	−0.03
9	0.51**	0.12	−0.3	−0.23	−0.47**	−0.62**	−0.08
10	0.55**	−0.06	−0.38*	−0.26	−0.54**	−0.41*	0.29
11	0.29	0.07	0.02	−0.20	−0.38*	−0.39*	−0.18

扬沙、浮尘日数)在一年之内(除了 1、2 月份外)之间基本均呈显著的负向相关性关系,与 2 月的径流量呈显著的负相关($P<0.05$),与 4 月份的径流量呈极显著的负相关性($P<0.01$),策勒河上游有水库,2 月份和 4 月份径流偏少,径流量增大,河流的汇水量大,会使年轮生长变宽,反之,汇水量小,年轮变窄^[21]。下游径流量也呈下降趋势,策勒河流域附近主要是砾质戈壁,胡杨的生长主要水分来自地下水

的补给,风沙频繁、植被稀少,胡杨的生长与径流量呈现了负向变化关系,策勒河流域胡杨年轮生长更多的与气候因子有一定的关系,也有学者研究,塔里木河流域胡杨径向生长与当年的春季径流量有显著的相关性,因气候变化的影响,干旱加剧,径流量减少,塔河附近的植被均出现不同程度的胁迫性,与河道的远近和 水位埋深程度也直接影响了到了植被的长势^[23-24]。

4 讨 论

对比研究区胡杨年轮指数对气象因子的响应,玉龙喀什河与策勒河流域胡杨径向生长的限制因素不尽相同,策勒河流域胡杨年轮与年均气温在 0.01 水平呈正相关关系,与秦进等^[25]得出的气温与年轮呈显著正相关的结论一致,与任旭明等^[26-27]研究的华北落叶松与气温要素之间呈显著的负向相关性结论不一致,而玉龙喀什河流域的年轮指数与气候变化关系不显著,玉龙喀什河的支流对植被有侧向补给作用,对流域附近的次生胡杨林提供生存所需的水分条件。玉龙喀什河流域与 2 月份的大气相对湿度在 0.05 水平呈负相关关系,与白天军等^[28]的观点不一致,策勒河流域树木年轮指数与 3、4、9、10 月份的月平均气温呈现显著的正向相关性,与 6 月份的大气相对湿度呈负向相关性这个结论与张晴等^[29]研究不一致,3、4 月份气温上升,冰雪融水补给地下径流,有利于胡杨的生长。玉龙喀什河流域年轮指数与气温的相关性不显著,但玉龙喀什河径流量较策勒河大,河水对河流附近的次生胡杨林有一定的水分的补给,促进胡杨的生长,而策勒河流域胡杨年轮生长与 2、4 月份径流量呈负相关,主要由于下游径流量少,策勒河上游修建水库将水源截留,减少了对胡杨的地上径流的水分补给,加上策勒河采样区土壤贫瘠、风沙频繁,抑制了胡杨年轮径向生长,策勒河流域气温、地下水量成为胡杨径向生长的主要的限制因素,以后应加强流域地下水位的变化对胡杨径向生长影响的研究。玉龙喀什河流域和策勒河流域对降水的响应均不显著,主要是因为 2 个流域降水量稀少,蒸发量大,降水对胡杨生长的影响不大,胡杨生长所需水源更多来自于地下水和地表径流的补给。

玉龙喀什河流域与秋冬季节的沙尘暴日数和扬沙日数呈显著的负相关关系,在一年当中(除了 1、2 月份外),策勒河流域与沙尘天气(沙尘暴、扬沙、浮

尘日数)之间呈显著的负向相关性关系,风沙发生的时间间隔越短,植物的净光合速率降幅越大,风沙威胁强度越大,植物能量积累越小,植物生长越慢^[30]。在近 40 年时间,研究区沙尘天气日数呈现下降趋势,风沙灾害减少,胡杨能量积累增加,沙尘天气发生次数的减少促进了胡杨径向生长,进一步研究树木年轮与沙尘天气日数之间的关系,有利于胡杨生态恢复、对沙尘天气的防治有一定的指导意义。

5 结 论

(1)玉龙喀什河流域的胡杨年轮指数从 1983 年开始呈现明显的上升趋势,而策勒河流域的胡杨年轮指数从 1985 年呈现显著的上升趋势。玉龙喀什河和策勒河流域年均气温均在 1995 年后呈现上升趋势、降水波动变化、玉龙喀什河流域与策勒河流域相对湿度分别从 1997 年、2004 年开始下降,沙尘暴日数、扬沙日数、浮尘日数均显著下降。

(2)玉龙喀什河流域树木年轮指数与年均扬沙和沙尘暴日数在 0.05 水平上呈负相关。策勒河流域胡杨年轮指数与年均气温呈现显著的正向变化关系($P<0.01$),与降水量和大气相对湿度之间的响应均不显著,与沙尘暴日数、扬沙日数、浮尘日数均呈现较显著负相关性($P<0.01$),气象因子之间同样有显著的相关性。

(3)策勒河流域的 3、4、9、10 月份气温、5—8 月径流量对胡杨年轮生长有促进作用,8、10 月份大气相对湿度对胡杨年轮生长有抑制作用,玉龙喀什河 2 月份大气相对湿度对胡杨年轮生长有抑制作用,而沙尘天气(沙尘暴、扬沙、浮尘日数)对 2 个流域胡杨年轮生长均有抑制作用。

(4)2 个流域中,策勒河流域胡杨年轮指数对气象因子的响应显著高于玉龙喀什河流域,策勒河流域胡杨年轮指数受气温、径流量和修建水库的影响比较明显。

参考文献:

[1] ESPER J. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability[J]. *Science*, 2002, **295**(5 563): 2 250-2 253.

[2] 范玮熠,王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(2): 345-351.

FAN W Y, WANG X A. Advances in studies on the relation-

ships between tree-ring width and climatic factors[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, **24**(2): 345-351.

[3] 王守乐,赵 媛,盖学瑞,等. 长白山鱼鳞云杉径向生长对气候响应的海拔差异[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(11): 3 131-3 137.

WANG S L, ZHAO Y, GAI X R, *et al.* Response of radial growth of *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate factors a-

long an altitudinal gradient on Changbai Mountain, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(11): 3 131-3 137.

[4] 彭剑峰, 王 婷. 黄柏山树轮生长对气候因子的响应及模拟[J]. *地理科学*, 2015, **35**(5): 644-651.

PENG J F, WANG T. Response and model of tree-rings growth to climate factors at Huangbaishan Mountain in Henan Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(5): 644-651.

[5] 刘 敏, 毛子军, 厉 悦, 等. 不同径级红松径向生长对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(11): 3 530-3 540.

LIU M, MAO Z J, LI Y, *et al.* Response of radial growth to climate change in *Pinus koraiensis* with different diameter classes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(11): 3 530-3 540.

[6] 黄力平, 高亚琪, 李 云, 等. 阿尔泰山中东部西伯利亚落叶松生长量及其对气候变化的响应研究[J]. *干旱区地理*, 2015, **38**(6): 1 169-1 178.

HUANG L P, GAO Y Q, LI Y, *et al.* Growth of Siberia Larch in the middle east of Altay Mountains and its response to climate change[J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(6): 1 169-1 178.

[7] 张艳静, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(8): 2 149-2 159.

ZHANG Y J, YU R D, ZHENG H W, *et al.* Difference in response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in the eastern and western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2 149-2 159.

[8] 武 红, 张松林, 季 云. 近 55 年来民勤绿洲胡杨林物候对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2015, **22**(1): 123-127.

WU H, ZHANG S L, JI Y. Response of *Populus euphratica* oliv to climate change in Minqin oasis from 1955 to 2009[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22**(1): 123-127.

[9] 秦 莉, 尚华明, 苏佳佳, 等. 巴丹吉林沙漠西南缘胡杨径向生长对气候的响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, **10**(2): 77-81.

QIN L, SHANG H M, SU J J, *et al.* Radial growth of *Populus euphratica* response to climate change at southwest edge of Badain Jaran Desert[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, **10**(2): 77-81.

[10] 苟晓霞, 叶 茂, 高生峰, 等. 塔里木河中游胡杨径向生长对气候变化的响应研究[J]. *西北植物学报*, 2017, **37**(9): 1 864-1 871.

GOU X X, YE M, GAO S F, *et al.* Response of radial growth of *Populus euphratica* to climate change in the middle reaches of the Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(9): 1 864-1 871.

[11] 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): 172-177.

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): 172-177.

[12] 刘海涛, 张向军, 李盈奎, 等. 和田地区沙尘暴天气的时空分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23**(5): 85-89.

LIU H T, ZHANG X J, LI Y K, *et al.* The time-space distribution characteristics of sandstorm weather in Hotan region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(5): 85-89.

[13] 木巴热克·阿尤普, 海米提·依米提, 王智明, 等. 塔里木胡杨自然保护区胡杨生态系统脆弱性及其治理措施研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, **18**(3): 30-35.

MUBAREK A, HAMIT Y, WANG Z M, *et al.* *P. euphratica* ecosystem fragility and protecting strategy on Tarim *P. euphratica* Nature Reserve in Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, **18**(3): 30-35.

[14] 邓铭江, 樊自立, 徐海量, 等. 塔里木河流域生态功能区划研究[J]. *干旱区地理*, 2017, **40**(4): 705-717.

DENG M J, FAN Z L, XU H L, *et al.* Ecological function regionalization of Tarim River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2017, **40**(4): 705-717.

[15] 刘建军, 张世军, 白金凤, 等. 新疆和田地区人工柽柳生态修复工程生态效益监测初探[J]. *干旱环境监测*, 2007, **21**(3): 159-162.

LIU J J, ZHANG S J, BAI J F, *et al.* Study on ecological benefit monitoring of artifical *Tamarix* ecological remediation project[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2007, **21**(3): 159-162.

[16] 安瓦尔·买买提明, 张小雷, 杨德刚. 新疆和田地区城市化与土地利用变化的定量分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, **19**(6): 137-141.

ANWAER M, ZHANG X L, YANG D G. Urbanization and land use change in Hotan district, Xinjiang[J]. *China Population Resources and Environment*, 2009, **19**(6): 137-141.

[17] 代述勇, 雷加强, 赵景峰, 等. 策勒河出山径流特征及其趋势[J]. *干旱区地理*, 2009, **32**(2): 204-210.

DAI S Y, LEI J Q, ZHAO J F, *et al.* Changing trend and features of the runoff from mountain areas of the Qira River[J]. *Arid Land Geography*, 2009, **32**(2): 204-210.

[18] 周正立, 梁继业, 于 军, 等. 和田河流域胡杨、灰叶胡杨种群结构特征的比较研究[J]. *塔里木大学学报*, 2013, **25**(4): 70-78.

ZHOU Z L, LIANG J Y, YU J, *et al.* Comparative study on population structure characteristics of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in Hotan River basin[J]. *Journal of Tarim University*, 2013, **25**(4): 70-78.

[19] STOCKTON C W, MEKO D M. Drought recurrence in the great Plains as reconstructed from long-term tree-ring records[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, **22**(1): 17-29.

[20] GRISSINO H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual

and tutorial for the computer program COFECHA[J]. *Tree Ring Research*, 2001, **57**(3): 5-21.

[21] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(4): 1-9.

ZHANG R B, YUAN Y J, WEI W S, *et al.* Research advances of dendroclimatology in Tianshan mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, **10**(4): 1-9.

[22] 侯 迎, 王乃昂, 张学敏, 等. 1880 年以来石羊河出山径流量重建与变化特征[J]. 地理科学, 2011, **31**(11): 1 396-1 402.

HOU Y, WANG N A, ZHANG X M, *et al.* Reconstruction of runoff from mountainous watershed since 1880 A. D. and its changing characteristics in Shiyang River basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(11): 1 396-1 402.

[23] 汪亮亮, 叶 茂, 张同刚, 等. 阿克苏河径流量变化对胡杨年轮生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, **37**(7): 112-117.

WANG L L, YE M, ZHANG T G, *et al.* Effects of Aksu river runoff changes on tree-ring growth of *Populus euphratica*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, **37**(7): 112-117.

[24] 卢震林, 白云岗, 刘洪波. 塔河流域自然系统对干旱的生态响应[J]. 中国水土保持科学, 2013, **11**(S1): 14-19.

LU Z L, BAI Y G, LIU H B. Eco-responses of the Tarim River natural system to drought[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, **11**(S1): 14-19.

[25] 秦 进, 白红英, 李书恒, 等. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2016, **36**(17): 5 333-5 342.

QIN J, BAI H Y, LI S H, *et al.* Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(17): 5 333-5 342.

[26] 任旭明, 宫渊奇, 王平安, 等. 区域气温和降水对关帝山不同海拔华北落叶松径向生长的耦合效应[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(5): 1 548-1 557.

REN X M, GONG Y Q, WANG P A, *et al.* Coupling effects of regional temperature and precipitation on radial growth of *Larix principis-rupprechtii* at different altitudes in Guandishan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(5): 1 548-1 557.

[27] 张文涛, 江 源, 王明昌, 等. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2015, **35**(19): 6 481-6 488.

ZHANG W T, JIANG Y, WANG M C, *et al.* Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(19): 6 481-6 488.

[28] 白天军, 邓文平, 旷远文, 等. 庐山不同海拔日本柳杉年轮宽度对气候因子的响应[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(1): 57-66.

BAI T J, DENG W P, KUANG Y W, *et al.* Response of tree ring width in *Cryptomeria japonica* to climatic factors at different elevations in Lushan Mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(1): 57-66.

[29] 张 晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析[J]. 植物研究, 2018, **38**(1): 14-25.

ZHANG Q, YU R D, ZHENG H W, *et al.* Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the eastern Tianshan Mountains[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, **38**(1): 14-25.

[30] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 等. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1): 53-58.

YU Y J, SHI P J, LU C X, *et al.* Response of the eco-physiological characteristics of some plants under blown sand[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(1): 53-58.

(编辑:潘新社)