

和田河下游植被分布及生理指标对水分条件的响应*

艾克热木·阿布拉¹ 董宗炜¹ 艾沙江·艾力² 赵新风²

(1. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841600; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 / 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要 和田河下游绿色走廊植被具有极为重要的涵养水源、防风固沙、保护土壤、维持生物多样性、净化环境污染等功能。且在减缓自然灾害、维护生态安全和社会经济发展中的不可替代的天然屏障和保障作用。为了研究荒漠河岸林植被分布及生理指标对水分条件的响应, 文章在野外监测数据的基础上, 全面分析和田河下游植被分布情况及植物丰富度变化规律; 选取代表性建群植物胡杨 *Populus euphratica*, 分析其相对含水量 (RWC)、叶绿素 (Chl)、可溶性糖 (SS)、游离脯氨酸 (Pro) 和过氧化物酶 (POD) 活性等生理指标对水分条件的响应机理。结果表明, 胡杨是和田河下游主要建群植物, 林下植被包括属于 17 科的 45 种灌木和草本植物; 垂直河道方向的河漫滩、林下灌草地、灌丛草地和荒漠林地等不同样地的植物多样性变化来看, 在河漫滩水分条件较好, 一年生草本成为主要的优势物种, 林下草地表现为较为完整的乔、冠、草 3 层结构群落, 因此这两种样地的物种丰富度较高, 分别为 6.1 和 5.2。随着距河道距离的增加, 灌丛草地内多年生草本、灌木物种增多, 一年生草本逐渐消失, 在荒漠林地是以耐旱、耐盐的灌木为主, 同时物种丰富度也减小, 这两种样地物种丰富度较低, 分别为 2.5 和 1.3, 说明在和田河干流绿色走廊距离河道越近物种数越多; 从胡杨各生理指标的变化来看, 胡杨长势等级“中等”的情况下, 其相对含水量 (RWC)、叶绿素 (Chl)、可溶性糖 (SS)、游离脯氨酸 (Pro) 和过氧化物酶 (POD) 活性等生理指标达到了最高值, 因为胡杨叶含水量减少和脯氨酸积累的增加是胡杨对水分亏缺的一种生理反应, 即随着地下水位的降低, 胡杨通过体内脯氨酸的积累, 提高渗透调节能力, 保持其原生质与环境的渗透平衡, 说明胡杨在对水分亏缺时发生了生理上的变化以适应环境的变化。从胡杨各类生理指标对水分条件的响应可以看出, 水分条件是决定荒漠河岸林植被分布的重要因素。

关键词 胡杨; 生理指标; 水分条件; 响应机理; 和田河下游

中图分类号: X835 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 05-0077-11

Responses of Vegetation Distribution and Physiological Indexes to Water Condition in the Lower Reaches of Hetian River

Aikeremu · Abula¹ DONG Zongwei¹ Aishajiang · Aili² ZHAO Xinfeng²

(1. Management Bureau of Tarim River Basin, Kuerle, Xinjiang 841600, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract The green corridor vegetation in the lower reaches of the Hotan River has extremely important functions such as water conservation, windbreak and sand fixation, soil protection, biodiversity maintenance, purifying environmental pollution and other functions. Natural barriers in the desert play an irreplaceable role in the mitigation of natural disasters, the maintenance of ecological security, and social and economic

* 基金项目: 新疆自然科学基金面上项目“极端干旱区绿洲防风固沙体系协同配置研究”。

第一作者: 艾克热木·阿布拉 (1970—), 男, 高级工程师, 主要从事干旱区水资源管理研究, E-mail: 776161204@qq.com。

通信作者: 艾沙江·艾力 (1971—), 男, 副研究员, 主要从事恢复生态学研究, E-mail: aishajiang@ms.xjbg.ac.cn。

development. To study the response of vegetation distribution and physiological indexes of desert riparian forest to water conditions, on the basis of field monitoring data, this paper comprehensively analyzed the distribution of vegetation and the variation of plant richness in the lower reaches of the Hotan River. The response of relative water content (RWC), chlorophyll (Chl), soluble sugar (SS), free proline (Pro) and peroxidase (POD) activities of *Populus euphratica* to water condition was analyzed. The results showed that *P. euphratica* was the main constructive plant in the lower reaches of the Hotan River, and the understory vegetation included 45 species of shrubs and herbs belonging to 17 families. According to the changes of plant diversity in different places such as a floodplain, shrub grassland under forest, shrub grassland and desert forest land in the direction perpendicular to the river channel, the water condition of the floodplain is good, the annual herb has become the main dominant species, and the grassland under forest shows a relatively complete three-layer structure community of tree, crown and grass. Therefore, the species richness of these two kinds of plots is high, which are 6.1 and 5.2 respectively. With the increase of the distance from the river channel, the species of perennial herbs and shrubs in the shrub grassland increase, and the annual herbs gradually disappear. In the desert forest land, it is mainly drought and salt-tolerant shrubs, and the species richness also decreases. The species richness of the two sample plots is lower, which are 2.5 and 1.3 respectively, indicating that the closer to the river channel in the green corridor of the mainstream of the Hotan River, the more species there are. From the changes in physiological indexes of *P. euphratica*, when the growth grade is “medium”, the physiological indexes such as relative water content (RWC), chlorophyll (Chl), soluble sugar (SS), free proline (Pro) and peroxidase (POD) activity reach the highest value. The species richness of floodplain and understory shrub grassland was higher, while that of shrub grassland and desert forest land was lower, which indicated that the closer the green corridor was to the river, the more species there were. The variation trends of physiological indexes of *P. euphratica* indicated that the decrease of leaf water content and the increase of proline accumulation is a physiological response to *P. euphratica* water deficit. That is, with the decrease of groundwater level, *P. euphratica* improve its osmotic adjustment ability and maintains the osmotic balance between protoplasm and environment through proline accumulation in vivo, which indicates that *P. euphratica* has physiological changes to adapt to the changes in environment. From the response of physiological indexes of *P. euphratica* water conditions, it can be concluded that water conditions are the decisive factor for the growth and development of vegetation in desert riparian forests.

Key words *Populus euphratica*; physiological index; water condition; response mechanism; lower reaches of Hotan River

和田河是目前唯一一条横穿塔克拉玛干沙漠注入塔里木河的河流,同时也是塔克拉玛干沙漠唯一南北贯通的绿色走廊^[1-4]。绿色带在两岸呈对称分布,形成一条连绵不断的绿色走廊。绿色走廊是穿越塔克拉玛干沙漠的重要通道,其兴衰直接影响到和田河环境质量的优劣,也是反映该区沙漠化进程的重要标尺。该区域气候干燥,少雨,日照强烈,冷热剧变,风大多沙,是极为典型的大陆荒漠气候区^[4-5]。近年来,和田河流域气候出现连续干旱,导致和田河两大支流喀拉喀什河与玉龙喀什河两支流在山区丘陵段河道渗漏蒸发损失水量大,和田河干流损失水

量较大^[5-7]。此外,上游灌区人口不断增长,毁林开荒、采集中草药、采挖玉石而破坏植被的现象时有发生,随着灌溉面积增加,和田河下泄水量减少,降低了河道两侧漫滩与阶地的地下水水位,从而导致距离河道较远依靠河道地下水生长的乔木与灌木的衰退或死亡,绿色走廊生态环境恶化,河岸林草呈现退化趋势,动物栖息地逐渐减少,沙漠逼近河床的威胁越来越严重,长年以来,绿洲受到人类活动和气候年际变化的干扰,稳定性亦受到威胁^[8-12]。胡杨 *Populus euphratica* 作为荒漠植被主要优势种,对于区域环境改善和维持具有重大生态学意义^[13-16]。

近年来,随着和田河上游绿洲区水资源利用量的增大,导致下游胡杨种群呈现不同程度的衰退,加强胡杨的管护迫在眉睫^[17-21]。关于和田河下游植被资源保护方面,众多学者在荒漠植被对干扰的响应方面做了大量的研究,周敏^[22]利用遥感手段获取和田河中下游丰水期林地面积、河道水深、河宽等信息构建渗漏量与河岸两侧胡杨林带分布范围的相关模型、分析河流侧向渗漏的变化规律。冯娟等^[23]利用3S技术对和田河流域植被空间格局进行研究,并发现在整个和田河流域植被覆盖度与其距离河岸的距离及河面高差呈负相关。龙爱华等^[24]用潜水蒸发法与面积定额法对和田河下游生态耗水量进行了估算,并认为河道渗漏水量能够满足两岸植被的生态需水,以及宋邦彦^[25]基于历史文献资料对过去和田河改道的历史变化过程进行了研究。这些研究都将监测数据结合遥感数据,分析了和田河水量动态变化。

关于对和田河开展实地植被调查的文献报道相对较少,大多是基于遥感手段分析和和田河岸近17 a天然植被动态变化^[26]、探讨和田河流域生态环境状况变化^[27]、揭示河道径流损失与植被生态需水关系。关于和田河乔木种胡杨/灰胡杨的研究,周禧琳等^[28]分析了和田河不同生境灰胡杨种群结构特征并对其竞争关系进行探讨,并发现生境的变化会引起树种组成和结构的改变,进而对种群发展产生影响。由于该流域人为干扰因素,荒漠景观破碎化较为严重,环境异质性降低,导致灰胡杨种群表现出不同程度的退化。杨丽雯等^[29]对和田河流域天然胡杨林的生态服务价值进行了评估,发现和和田河流域胡杨林生态系统的平均服务价值为6.72亿元/a,说明和田河流域生态价值是不可忽略的。朱玉伟等^[28]提出了和田河流域胡杨林更新复壮技术,表示淤泥+砂土的立地条件有利于洪水过后胡杨幼苗的存活。这些研究针对和田河流域胡杨生长条件和生态服务价值进行分析,而对于和田河胡杨的生理指标变化目前尚未有过报道。为了回答“和田河河岸天然植被多样性以及河岸乔木生理生态指标对不同水分条件的响应如何?”这一问题,本研究定量分析了垂直于河道方向、距河道不同距离下的胡杨的生理生态指标对水分变化响应、植被的分布特征,对和田河绿色走廊生态保护的实施非常重要。前人研究多是和田河下游生态需水量以及胡杨种群

结构方面的综合性研究,而对和田河流域地下水位、干旱胁迫变化对优势种群特征的影响方面的研究比较少。植物生理指标,是判别植物抗旱性的重要依据^[30-31]。胡杨主要生理指标包括含水量(RWC)、叶绿素(Chl)、可溶性糖(SS)、游离脯氨酸(Pro)和过氧化物酶(POD)活性等对水分条件非常敏感,通过监测以上生理指标的变化可以判断周围环境的变化。因此,本文结合野外调查监测数据,根据植物多样性指数、胡杨生理指标,分析不同生境下胡杨种群数量结构特征及其种间竞争关系,为下游绿色走廊胡杨种群的保护和恢复提供理论参考。

1 数据与研究方法

1.1 研究区域概况

和田河两支流喀拉喀什河和玉龙喀什河在墨玉县喀瓦克乡麻雪特下游9 km的阔什拉什汇合后称和田河,流经319 km汇入塔里木河。两大支流汇合后至塔里木河汇合口河段为和田河干流,处在沙漠腹地,蒸发强烈、渗漏严重、为径流的散失区^[32]。和田河干流自汇合口向北穿越塔克拉玛干沙漠汇入塔里木河,干流河床宽浅、平均宽度1~2 km,河道仅在汛期7—9月过水,水流侧蚀严重。由于河床河岸水分条件比较好,植被结构包括乔木、灌木和草本植物,形成独特的干旱区荒漠河岸林植被体系。河床内植被带比较稀疏,两岸基本上是由连续的天然生长的灰杨、胡杨 *Populus euphratica*、红柳 *Tamarix taklamakanensis*、芦苇 *Phragmites australis*、甘草 *Glycyrrhiza uralensis* 等数十种植物组成的绿色带,主要气象要素见表1。

1.2 野外监测数据

以野外现场勘察为基础,采用统计和样地调查法,在2018年7月在和田河下游周边及其敏感生态保护目标内设置野外观测断面,并考虑植被类型的代表性,设置乔木、灌木、草类的样方,记录观测样方的地理坐标和高程信息,对样方内的植被类型、植被属性进行调查和分类整理。根据目标河岸林道路的可达性共布设9个监测断面(图2)。各断面植被调查具体方法为:依据样地地形地貌,布设50 m×50 m或25 m×25 m的大样方,在大样方内布设3~5个1 m×1 m草本样方及5 m×5 m的灌木样方,统计样方内的乔、灌、

表 1 研究区域主要气象要素特征
Table 1 Meteorological characteristics of study area

月份 Month	平均气温 /℃ Average temperature	平均相对湿度 /% Relative humidity	平均雷暴日数 / d Thunderstorm frequency	平均日照时数 / h Daily sunshine time	最大风速 / m/s Maximum wind speed	风向 / Wind direction	平均降水量 / mm Precipitation	平均蒸发量 (20 cm 蒸发器) / mm Average evaporation
1	-5.6	53	0	174.3	11.0	SW	1.7	43.7
2	-0.3	49	0	157.1	12.0	SW	2.3	84.9
3	9.0	35	0	192.0	15.5	SW	1.8	205.7
4	16.5	29	0.2	197.2	15.0	W	2.9	276.0
5	20.4	35	1.0	233.0	19.0	W	7.2	341.0
6	23.9	37	1.2	257.2	17.3	SWW	7.3	359.7
7	25.5	40	0.6	248.7	15.3	W	5.2	345.7
8	24.1	44	0.1	232.0	16.8	SW	4.1	308.3
9	19.7	43	0	237.6	13.0	SW	2.6	239.5
10	12.4	40	0	265.3	11.0	SSW	1.1	168.7
11	3.8	45	0	225.6	11.5	SSW	0.4	103.8
12	-3.2	54	0	190.5	12.5	SW	0.9	46.9
全年	12.18	42	3.1	2 610.5	14.2	SW	37.5	2 523.9

注：数据来源于国家气象科学数据中心，<http://data.cma.cn/site/index.html>。Note: Data from National Meteorological Science Data Center, <http://data.cma.cn/site/index.html>.

草种类，每种个体数、长势等生态指标。

1.3 植物多样性指数的计算

按照以下公式对物种丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Weiner 指数、Pielou 均匀度指数进行计算^[15-17]：

物种丰富度 A 计算公式为：

$$A=N/\ln(S) \quad \dots\dots\dots (1)$$

N 为物种数， S 为样方面积。

Simpson 优势度指数：

$$D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (i=1, 2, \dots, S) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Shannon-Wiener 多样性指数：

$$H=-\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Pielou 均匀度指数： $J=(-\sum P_i \ln P_i)/\ln S$

$$J=H/\ln S \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中， D 为多样性指数； S 为样方中的物种数； N 为样方中全部的物种数； i 为第 i 种动物。式中， S 为调查到的物种数； P_i 为物种 i 的个体数占所有物种个体数的比例。

1.4 不同距河距离胡杨长势调查

本研究结合和田河下游干旱荒漠环境条件和

胡杨独有的生态适应能力以及个体属性，对距河道不同距离的胡杨的长势进行了调查，按玉米提等^[11]对胡杨长势等级划分方法^[34]（表 2），选择垂直于和田河不同距离、树龄相近（胸径约 20~25 cm）、健康无病虫害、无机械损伤的胡杨，每个长势等级选取 3 棵样树，同时，估测每个样树距观测井的距离、离河岸的距离、树高，描述其树下土壤、植被等，并采集照片。

选定不同长势的胡杨样树后，长势等级 VS1~VS3 的胡杨，每棵树冠划分上、中、下 3 层，每层水平方向上一周剪取约 50~70 片叶，纱布包裹置入液氮罐中带回实验室待测。由于长势等级 VS4~VS5 的胡杨树冠难以明确划分上、中、下 3 层，只在其四周剪取了约 50~70 片叶，同样纱布包裹置入液氮罐中带回实验室待测。

1.5 胡杨生理指标的测定

选取相对含水量（RWC）、叶绿素（Chl）、可溶性糖（SS）、游离脯氨酸（Pro）和过氧化物酶（POD）活性 5 个生理指标，分析这些指标的变化趋势以及对胡杨生理特征的响应机理。根据划分的 5 个长势等级标准，各选取 10 棵胡杨进行叶片采样。将样品带回实验室进行生理指标的测定。胡杨生理指标测定方法在参考文献中详细解释^[33]。

表 2 胡杨长势等级标准
Table 2 Grade standard for growth of *Populus euphratica*

长势等级 Growth grade	标志 Mark	树冠疏失度 Crown loss	胡杨总体状况和树形特征 General condition and tree shape characteristics of <i>Populus euphratica</i>
旺盛	VS1	≤ 10%	树木总体状况良好，大部分是原型树冠，树冠饱满，几乎没有受损的树形，深绿色树叶，树冠疏失度一般小于 10%。
较好	VS2	11%~25%	树木总体状况令人满意，大部分是复合树冠，树冠有欠缺，枝干枯死部分达树体的 1/4，叶色淡，树冠疏失度一般 11%~25% 之间。
中等	VS3	26%~50%	树木总体状况中等，二次和原型树冠并存，枝干枯死部分超过树体的 1/3，树冠疏失度 26%~50% 之间。
衰败	VS4	51%~75%	树木总体状况差，树冠有明显的欠缺，大部分是二次树冠，枝干枯死部分超过树体的 2/3，树冠疏失度一般 51%~75% 之间。
濒死	VS5	76%~99%	树木总体状况极差，原型树冠几乎衰败，二次树冠发育不够，枝干、侧枝枯死部分超过树体的 3/4，仅有小数叶片，树冠疏失度一般 76%~99% 之间。

2 结果与分析

2.1 和田河下游植被类型

和田河下游绿色走廊区乔木以灰杨林为主，伴生胡杨，植物名录见表 3。

林下植被常见的灌木种主要有：多枝怪柳、刚毛怪柳、沙棘、黑刺、铃铛刺、盐穗木等，常见的多年生植物主要有：芦苇、拂子茅、甘草、疏叶骆驼刺、苦蒿、小獐毛、鹿角草、天门冬、

鸭葱、隐花草等，一年生草本主要有：苦豆子、薄翅猪毛菜、盐生草、戟叶鹅绒藤、灰绿藜等。距河道最近的河漫滩多为灰杨 / 胡杨幼林，以及近两年萌发的灌木、多年生草本及一年生草本幼苗。由于该区土壤水分条件较好，为种子萌发提供了机会。但植被数量随着河床的距离而减少，不同植被类型分布情况如表 3 所示。

2.2 垂直河道方向植物多样性指标的变化

垂直于河道方向，距离河道由近至远的调查

表 3 和田河下游绿色走廊植物
Table 3 Plant list of green corridor in the lower reaches of Hotan River

科 Family	植物种 Plant species	拉丁名 Latin name	林下草地 Understory grassland	河漫滩 River flat	灌丛草地 Shrub grassland	荒漠林地 Desert woodland
怪柳科	多枝怪柳	<i>Tamarix ramosissima</i>	+	+	+	+
	刚毛怪柳	<i>T. hispida</i>	+		+	
	沙生怪柳	<i>T. taklamakanensis</i>	+		+	+
	芦苇	<i>Phragmites australis</i>	+	+	+	+
禾本科	拂子茅	<i>Calamagrostis epigeios</i>	+	+	+	
	大拂子茅	<i>C. macrolepis</i>	+	+	+	
	芨芨草	<i>Achnatherum splendens</i>	+	+	+	
	小獐毛	<i>Aeluropus pungens</i>	+	+	+	
	早熟禾	<i>Poa annua</i>	+	+	+	
	隐花草	<i>Crypsis aculeata</i>	+	+	+	
	疏叶骆驼刺	<i>Alhagi sparsifolia</i>	+	+	+	+
	胀果甘草	<i>Glycyrrhiza inflata</i>	+	+	+	+
豆科	苦豆子	<i>Sophora alopecuroides</i>	+	+		
	铃铛刺	<i>Halimodendron halodendron</i>	+	+	+	+
	盐穗木	<i>Halostachys caspica</i>	+		+	+
	盐角草	<i>Salicornia europaea</i>	+		+	
藜科	灰绿藜	<i>Chenopodium glaucum</i>	+	+		
	碱蓬	<i>Suaeda glauca</i>	+		+	
	薄翅猪毛菜	<i>Salsola pellucida</i>	+	+	+	
	合头草	<i>Sympegma regelii</i>	+	+	+	
	盐爪爪	<i>Kalidium foliatum</i>	+		+	

科 Family	植物种 Plant species	拉丁名 Latin name	林下草地 Understory grassland	河漫滩 River flat	灌丛草地 Shrub grassland	荒漠林地 Desert woodland
菊科	花花柴	<i>Karelinia caspica</i>	+	+	+	+
	叉枝鸦葱	<i>Scorzonera divaricata</i>	+	+	+	
	蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	+	+		
	蓟	<i>Cirsium japonicum</i>	+		+	
	蒿子	<i>Artemisia</i> sp.	+		+	
	顶羽菊	<i>Acroptilon repens</i>	+	+	+	
	蓼子朴	<i>Inula salsoloides</i>	+		+	+
	绢蒿	<i>Seriphidium</i> sp.	+	+	+	
夹竹桃科	罗布麻	<i>Apocynum venetum</i>	+	+	+	+
	大叶白麻	<i>Poacynum hendersonii</i>	+	+	+	+
萝藦科	喀什牛皮消	<i>Cynanchum kaschgaricum</i>	+	+	+	
	牛皮消	<i>Cynanchum auriculatum</i>	+	+	+	
蓼科	塔里木沙拐枣	<i>Calligonum roborowskii</i>			+	+
	扁蓄	<i>Polygonum aviculare</i>	+	+		
杨柳科	胡杨	<i>Populus euphratica</i>	+	+	+	+
	灰杨	<i>Populus pruinosa</i>	+	+	+	
百合科	天门冬	<i>Asparagus cochinchinensis</i>	+	+		
香蒲科	香蒲	<i>Typha orientalis</i>	+	+		
胡秃子科	沙棘	<i>Hippophae rhamnoides</i>			+	
	水葱	<i>Scirpus validus</i>		+		
莎草科	扁秆蔗草	<i>Scirpus planiculmis</i>	+	+	+	
	管花肉苁蓉	<i>Cistanche tubulosa</i>			+	+
列当科	黑果枸杞	<i>Lycium ruthenicum</i>	+		+	+
蒺藜科	唐古特白刺	<i>Nitraria tangutorum</i>	+	+	+	
锁阳科	锁阳	<i>Cynomorium songaricum</i>			+	+

注：表格中“+”代表在调查区域有此种植物；空格代表在调查区没有此类植物。Note: “+” indicates that there are such plants in the survey area; The blank indicates that there are no such plants in the survey area.

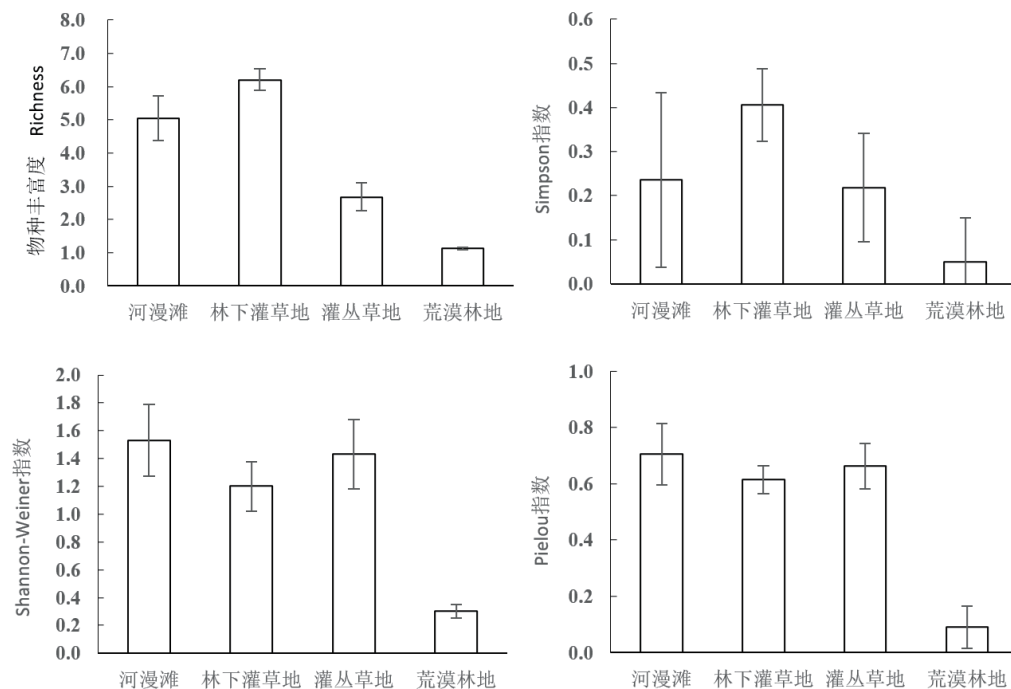


图 1 绿色走廊区植物多样性指数

Fig. 1 Plant diversity index in green corridor

样地依次为:河漫滩、林下灌草地、灌丛草地、荒漠林地。河漫滩、林下灌草地植物物种丰富度相对较高;灌丛草地、荒漠林地物种丰富度较低(图1)。

结合样方中物种出现的实际情况,距垂直于河道不同距离样地建群植被及伴生植物主要有以下几个特点:(1)在近河高河漫滩是以芦苇为建群种的盐生草甸植被,伴生有大拂子茅、香蒲、罗布麻、胀果甘草、芨芨草、水葱等。(2)其次是以灰杨为主的乔木林和以怪柳为主的灌木林地,林下常见的植被有多枝怪柳、芦苇、胀果甘草、沙棘、疏叶骆驼刺等。(3)再次是灌木林混生于乔木林中或林缘区域,以多枝怪柳为建群种,伴生植物主要是芦苇、疏叶骆驼刺、盐穗木、胀果甘草、白刺、罗布麻、大叶白麻、花火柴等。(4)河岸林外侧为沙地,生长有以怪柳、花火柴、骆驼刺、罗布麻等为主的荒漠植被。

通过对和田河干流绿色走廊部分进行灌草多样性调查,结果显示于图1。在河漫滩水分条件较好,一年生草本成为主要的优势物种。林下草地表现为较为完整的乔、冠、草3层结构群落。随着距河道距离的增加,灌丛草地内多年生草本、灌木物种增多,一年生草本逐渐消失。在荒漠林地是以耐旱、耐盐的灌木为主,同时物种丰富度也减小。

从图1可以看出,距垂直于河道不同距离样地的植被丰富度和各类指标有明显的差距。林下灌草地水分、土壤条件比较合适,因此,植被丰富度和 Simpson 指数比其它样地高。

除了以上垂直于河道的区域性植被类型的分布特征外,还存在非区域性植被分布,如:(1)荒漠类草地广泛分布于河岸林外围区域,主要植物物种有花火柴、罗布麻、白刺、刚毛怪柳、沙生怪柳、塔里木沙拐枣、管花肉苁蓉、喀什牛皮消等,以及少量粗大的枯老灰杨和胡杨。(2)灌丛草地呈片状少量分布于河道两侧地下水埋深较浅阶地区,常与灌丛植被镶嵌分布,建群种主要有疏叶骆驼刺、花火柴、多枝怪柳等,伴生有盐穗木、盐角草、碱蓬、大叶白麻、胀果甘草、小獐茅等。(3)和田河下游接近塔里木河区域,是以盐节木等盐生植被为主要物种,主要有盐角草、小獐茅、碱蓬、芦苇、怪柳、盐穗木等。

和田河下游除了绿色走廊以外,多为低覆盖

度草地,植被覆盖率低。覆盖度高的植被主要分布在离河较近的区域\覆盖度低的区域主要分布在离河较远的区域(图2)。

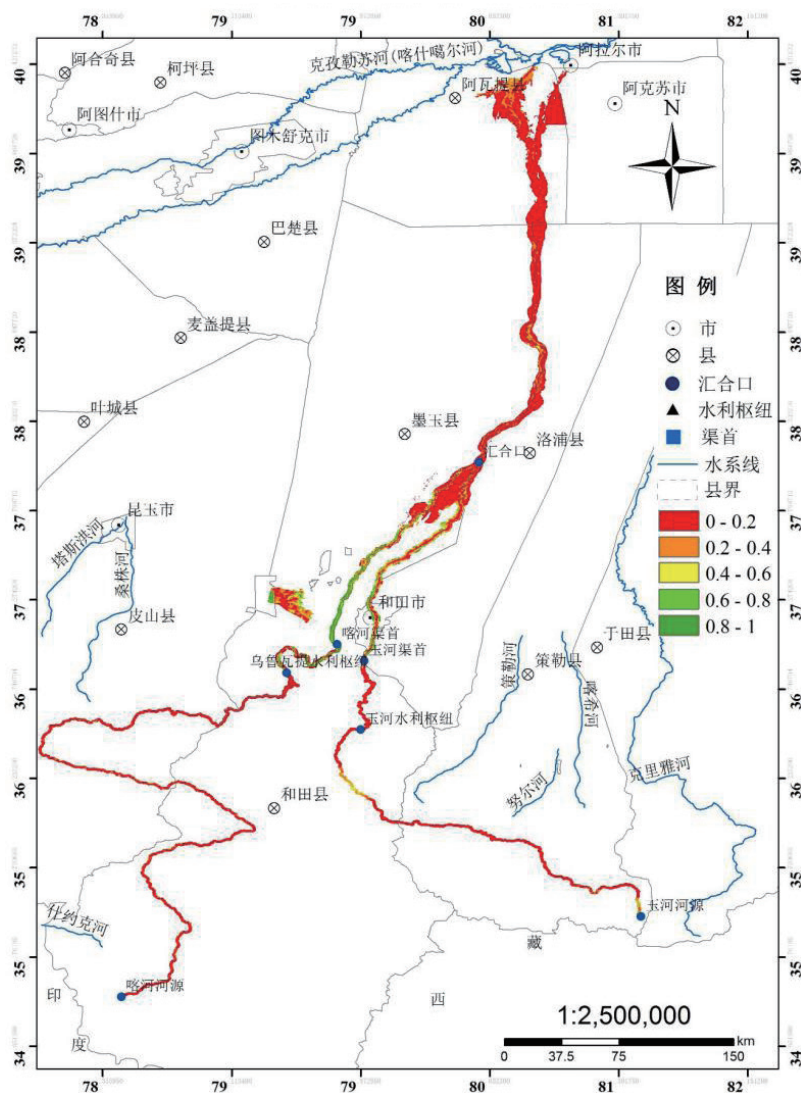
2.3 距河道不同距离胡杨生理指标变化

胡杨是荒漠地区典型的替水旱中生至中生物,长期适应极端干旱的大陆性气候;对温度大幅度变化的适应能力很强,喜光,喜土壤湿润,耐大气干旱,耐高温,也较耐寒。胡杨靠着根系的保障,地下水位不低于4 m,胡杨能生活得很自在;在地下水位跌到6~9 m后,胡杨就显得萎靡不振了;地下水位再低下去,胡杨就会死亡,河漫滩细沙沙质土上生长最为良好。胡杨对温度大幅度变化的适应能力很强,能够忍耐极端最高温45℃和极端最低温-40℃的袭击。它生长的水分主要靠潜水或河流泛滥水,所以具有伸展到浅土层附近的根系,具有强大的根压和含碳酸氢钠的树叶,因而能抗旱耐盐。本文对胡杨不同长势条件下的各类生理指标进行对比分析,并确定在长势等级“中等”(VS3)的情况下,胡杨的各类生理指标达到最高值。

叶片相对含水量从长势等级VS1的79.5%到VS3逐渐增加,变化幅度1.8%($P>0.05$);然后又逐渐降低,VS5相对于VS3降低了13.9%($P<0.05$)(图3a)。LSD检验结果表明,VS1、VS2和VS3等级的叶片RWC与VS5的差异显著($P<0.05$),而其他两两长势之间的叶片RWC并无显著差异($P>0.05$)。叶片RWC与长势等级之间的Pearson相关系数为-0.524,在0.05水平上达到了显著负相关。

图3(b)中,可溶性糖含量变化的整体趋势可以说是先减后增再减,从VS1到VS2降低了14.9%($P<0.05$),到VS3又有所增加,变化幅度43.3%($P<0.05$),之后逐渐降低,濒死的胡杨(VS5)叶片SS含量减少了48.8%($P<0.05$)。VS2和VS4的胡杨叶片SS含量差异不显著($P>0.05$),其他长势等级两两之间的SS含量均存在显著差异($P<0.05$)。通过Pearson相关分析显示,SS含量与长势等级的负相关关系达到了显著水平($P<0.05$)。

胡杨长势逐级衰败,其叶片Pro含量的变化是先增后减(图3(c))。VS3比VS1的25.757 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW增加了37.5%($P<0.05$),VS4比VS3降低了30.1%($P<0.05$)。Pro含量与长势等级的Pearson相关性不显著($P>0.05$)。同时,通过相关分析得到胀



注：“•”为监测断面。Note: “•” refers to the monitoring section. 图审码: GS (2019) 1823

图 2 和田河下游绿色走廊植被覆盖现状 (NDVI)

Fig.2 Vegetation coverage of green corridor in lower reaches of Hotan River

果甘草和疏叶骆驼刺的 Pro 含量与水势及 NaCl 浓度的相关性亦未达到显著水平 ($P>0.05$)。

图 4(d) 展示了不同长势胡杨叶片 POD 活性的变化规律。图中, POD 活性在 VS3 处急剧增加之后又降低, 先增后减的变化幅度分别为 183.9% ($P<0.05$) 和 80.4% ($P<0.05$)。LSD 多重比较显示, VS3 与其他长势等级的 POD 活性差异都显著 ($P<0.05$), 但其他长势等级两两之间并无显著差异 ($P>0.05$)。POD 活性对长势等级的相关关系在 0.05 水平上不显著。

图 4 显示了不同长势胡杨的叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、总体叶绿素 (Chlt) 含量及叶绿素 a 与 b 的含量比值 (Chla/b) 差异, 可以发现, 从

生长茂盛到濒死的胡杨 (VS1~VS5) 其 Chla、Chlb 及 Chlt 含量都呈现出先增后减的态势, VS3 的达到了最高点, 分别比 VS1 增加了 39.2%、41.0% 和 39.6%, 而 VS5 又分别比 VS3 降低了 47.9%、51.0% 和 48.5%。从 Chla/b 值来看, 从 VS1 到 VS3 降低了 2.0% ($P>0.05$), Chla 含量增加的幅度小于 Chlb, 说明胁迫对 Chla 的影响小于对 Chlb 的影响; 而到 VS5 又达到最高点, 比 VS3 增加了 4.7% ($P>0.05$), Chla 减小的幅度又小于 Chlb, 同样说明胁迫对 Chla 的影响小于对 Chlb 的影响。LSD 多重比较发现, VS3 的 Chla、Chlb 及 Chlt 均与 VS1、VS2、VS4 和 VS5 的对应指标差异显著 ($P<0.05$), 但后四长势之间并无显著差异

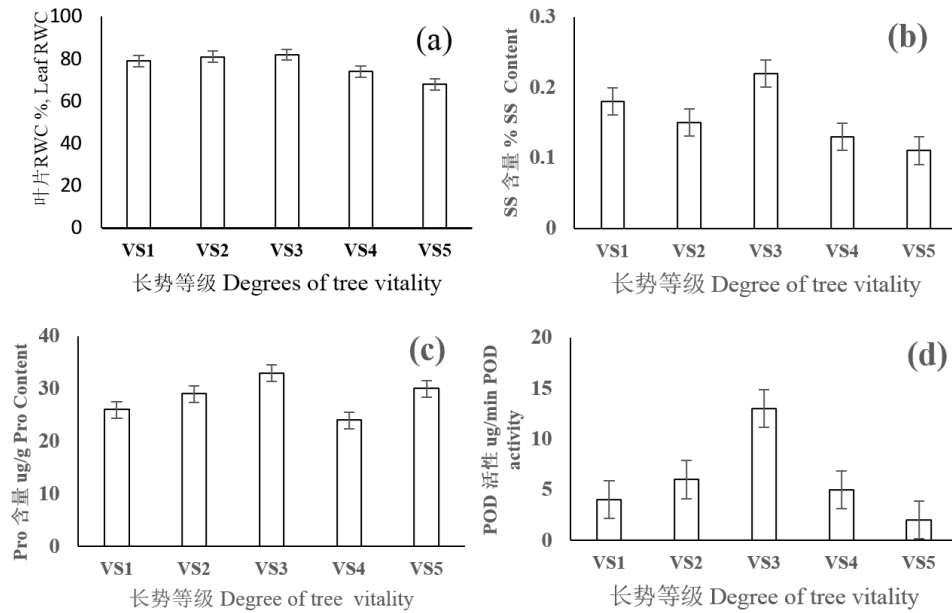


图3 不同长势胡杨叶片 RWC (a)、SS 含量 (b)、Pro 含量 (c) 和 POD 活性 (d)

Fig. 3 Leaf RWC(a), SS content (b), Pro content (c) and POD activity of *Populus euphratica* with different growth vigor

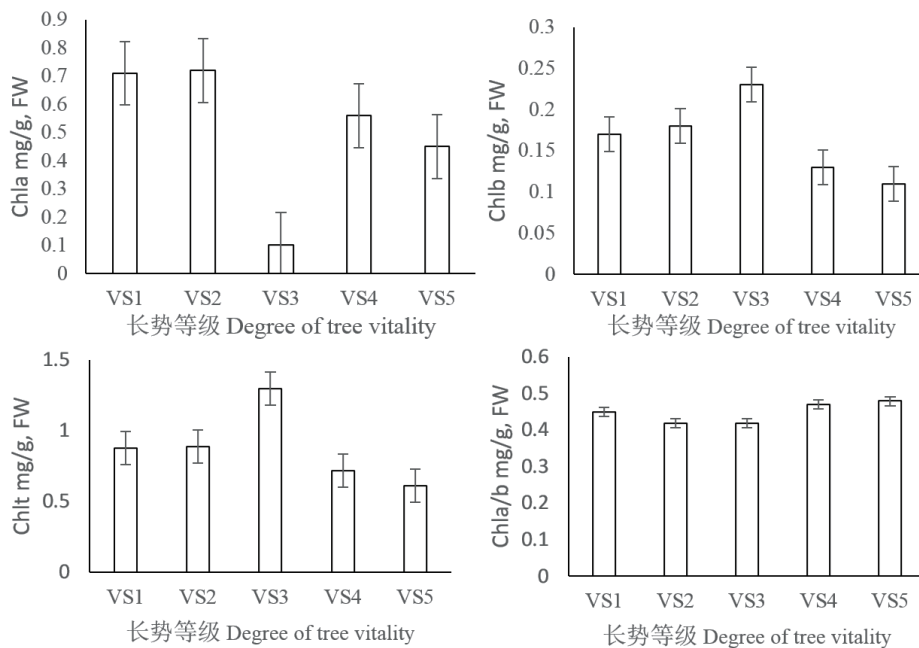


图4 不同长势胡杨叶片 Chl 含量

Fig.4 Chl content in leaves of *P. euphratica* with different growth vigor

($P>0.05$), 5 个长势等级之间的 Chla/b 的差异不显著 ($P>0.05$)。Chlt、Chla、Chlb 及 Chla/b 与长势等级之间 Pearson 相关性未达到显著水平 ($P>0.05$)。

3 结论与讨论

在研究区域干旱少雨的气候条件下^[10,27,35], 地下水是决定胡杨及其它植被生长的主要因素。地

下水滋润和汛期洪水漫溢补给是和田河绿色走廊植被形成、生长与繁殖的关键要素。目前受上游灌区引水影响, 喀拉喀什河和玉龙喀什河渠首以下河段仅汛期 6—9 月过流, 其余时间河道干枯, 因此和田河下游绿色走廊带河岸林草植被生态耗水主要依赖地下水。

国内外很多研究都表明, 荒漠区植被对地下

水的依赖性很强^[36-37],地下水是荒漠区植被生存所依赖的最为重要的水分来源^[38-42]。因此,流域荒漠区地下水埋深直接影响着与植被生长关系密切的土壤水分和养分动态,是决定荒漠区植被分布、生长、种群演替以及荒漠绿洲存亡的主导因子。以往研究分析了地下水位的抬升导致植被在盖度、密度、生物量上发生了变化,或对植物水势或生理指标等^[36-37]对地下水位抬升或下降的响应方面进行阐述。冯娟等^[23]研究了和田河流域植被生长情况,并提出随着距河岸距离的增大,植被的覆盖度呈现出递减的趋势。这个结果跟本文提出的和田河下游植被分布情况一致。随着距河岸的距离增大,地下水位逐渐下降,植被多样性也逐渐减少。

目前,受上游灌区引水量增加的影响,使得绿色走廊带河道来水减少,河道两侧漫滩与阶地区地下水位呈下降趋势,适宜荒漠河岸林草正常生长的地下水位面积逐渐向河道方向萎缩,距离河道较远区域河岸林草植被衰败下游绿色走廊生态环境已在退化。和田河下游绿色走廊带荒漠河岸林中乔木林建群种为灰杨。张沛等^[27]等研究了和田河河岸林生长特征及变化规律,并表示胡杨适应性强,耐寒、耐热、耐盐碱、耐大气干旱,根系发达,抗风力强。史军辉等^[43]研究了不同盐分条件对胡杨生理生化指标的影响,并提出较高盐分浓度胁迫下胡杨叶片中活性增加,增强了胡杨幼苗抵御盐胁迫的能力;在较低盐胁迫下,胡杨幼苗仍保较高的盐分吸收水平,具有一定的抗盐胁迫能力。本文研究结果进一步确认胡杨耐盐碱特征,即长势等级“中等”(VS3)的样地,盐分比 VS1 和 VS2 高,而在这个样地胡杨各生理指标到达最高值。

本文通过野外调查以及胡杨各种生理指标的测定,揭示了和田河下游植被分布情况及胡杨生理指标对水分条件的响应,进一步确认胡杨耐热、耐寒特征。这可以为淡水资源正日益紧缺的干旱区盐渍化土地的绿洲防护林体系的建立提供理论依据和技术支持,可以进一步的了解植物的耐盐机理,为干旱区退化植被快速恢复和生态产业的发展提供理论依据,同时也增加了盐碱地种植植物种类,对于改善荒漠局部生态环境、维持生物多样性、改良盐渍土等方面具有重要的现实意义。

灰杨、胡杨是和田河下游绿色走廊的乔木树

种,距河道最近的河漫滩多为灰杨/胡杨幼林、近两年萌发的灌木、多年生草本及一年生草本幼苗。由于该区土壤水分条件较好,为种子萌发提供了机会。植物丰富度以及植被各种生理指标从林下草地、灌丛草地到荒漠林地逐渐减弱。从胡杨各生理指标的变化来看,胡杨叶含水量减少和脯氨酸积累的增加是胡杨对水分亏缺的一种生理反应,即随着地下水位的降低,胡杨通过体内脯氨酸的积累,提高渗透调节能力,保持其原生质与环境的渗透平衡,说明胡杨在对水分亏缺时发生了生理上的变化以适应环境的变化。含水量(RWC)、叶绿素(Chl)、可溶性糖(SS)、游离脯氨酸(Pro)和过氧化物酶(POD)活性等生理指标在胡杨长势中等条件下达到最高值。

参考文献

- [1] 黄领梅, 沈冰, 莫淑红, 等. 新疆和田河年径流量变化的定量估算[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(3): 289-292.
- [2] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红. 新疆和田河流域土地利用/覆被变化及其驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 326-333.
- [3] 李卫红, 黎枫, 陈忠升, 等. 和田河流域平原耗水驱动力与适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5), 1161-1168.
- [4] 张晓伟, 沈冰, 孟彩侠. 和田绿洲水文气象要素分形特征与R/S分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 12-15.
- [5] 傅丽昕, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 237-242.
- [6] 莫淑红, 张高锋, 沈冰, 等. 新疆和田河流域河川径流混沌特性分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(1): 44-49.
- [7] 阿依努尔·买买提, 邱玉宝. 近20年和田绿洲水资源变化及其驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 117-122.
- [8] 张晓伟, 沈冰, 黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 974-979.
- [9] 王永莉, 玉苏甫·阿布都拉, 马宏武, 等. 和田河夏季径流对区域0℃层高度变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3): 151-155.
- [10] 徐宗学, 米艳娇, 李占玲, 等. 和田河流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1833-1838.
- [11] 玉米提·哈力克. 胡杨部分生态指标对塔里木河下游应急输水的响应[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1309-1314.

- [12] 郗亚栋, 蒋腊梅, 吕光辉, 等. 温带荒漠植物叶片功能性状对土壤水盐的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2000-2010.
- [13] 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.
- [14] 张文霞, 刘普幸, 冯青荣, 等. 1960 - 2015年中国绿洲胡杨生长季对全球变暖的时空响应及原因[J]. 地理学报, 2017, 72 (7) : 1151-1162.
- [15] PEDRO M M, SOLERA A, Ferrer J, et al. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527:482-493.
- [16] SABATER S, BREGOLI F, ACUNA V, et al, Effects of human-driven water stress on river ecosystems: a meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2018(8): 11462.
- [17] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2018, 55(6): 790-797.
- [18] 陈传国, 薛春泉, 汪求来, 等. 基于2017年森林资源连续清查样地的广东省典型植被型植物多样性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36 (4) : 60-65.
- [19] 陈建, 邢先双, 董明明, 等. 土壤逐步失水过程中蔷薇光合作用 CO_2 响应进程[J]. 林业与环境科学, 2021, 37 (5) : 91-96.
- [20] 何宝忠, 丁建丽. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1948 - 1966.
- [21] 谢超然, 秦婷婷, 王兆伟, 等. 干旱区绿洲土壤对磺胺甲恶唑的吸附特性及影响因素[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2018 (55) 65: 626-632.
- [22] 周敏. 干旱区季节性河流和田河中下游侧向渗漏遥感研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013.
- [23] 冯娟, 王福娥, 高婧. 基于“3S”技术的和田河流域植被空间格局研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 67-71.
- [24] 龙爱华, 张沛, 李江, 等. 和田河干流河道径流损失与植被生态需水关系研究[J]. 中国水利水电科学院研究院学报, 2020, 18(5):0361-0368.
- [25] 宋邦彦. 魏晋以来和田河变迁研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2018.
- [26] 李骊, 张青青, 赵新风, 等. 和田河河岸近17a天然植被动态变化及其驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(10): 153-160 .
- [27] 张沛, 徐海量, 杜清, 等. 综合治理前后和田河流域生态环境状况变化及原因探讨[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (4): 174-184.
- [28] 周禧琳, 吕瑞恒, 韩路, 等. 和田河不同生境灰胡杨种群结构特征及竞争关系分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1):43-48.
- [29] 杨丽雯, 何秉宇, 黄培佑, 等. 和田河流域天然胡杨林的生态服务价值评估[J]. 生态学报, 2006, 26(3):681-689.
- [30] 丁丹, 陈钰皓, 陈雄伟, 等. 水喷淋对防火林带土壤温湿度的影响[J]. 林业与环境科学, 2017, 33 (2) : 66-71.
- [31] 马振环, 张贝, 陈世清, 等. 广东梁化林场生态公益林林果经营物种选择评价[J]. 林业与环境科学, 2017, 33 (2) : 81-85.
- [32] 朱玉伟, 桑巴叶, 陈启民, 等. 和田河流域胡杨林更新复壮技术[J]. 南方农业学报, 2012, 43(10):1544-1548.
- [33] 王家强, 地下水埋深对胡杨生理学指标的影响及其光谱响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [34] 董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 等. 1994-2016年和田绿洲植被覆盖时空变化分析[J]. 生态学报, 2019, 39(10) : 3710-3719.
- [35] SYRBE RU, WALZ U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics [J]. Ecological Indicators, 2012(21): 80-88.
- [36] 张玉波, 李景文, 张昊, 等. 胡杨种子散布的时空分布格局[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1994-2000.
- [37] 赵文智, 常学礼, 何志斌, 等. 额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究[J]. 中国科学, 2006, 36(6): 559-566.
- [38] HAO X M, LI W H, et al. Impacts of ecological water conveyance on groundwater dynamics and vegetation recovery in the lower reaches of the Tarim River in northwest China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(11):7605-7616.
- [39] LING H B, ZHANG P, XU H L, et al. Determining the ecological water allocation in a hyper-arid catchment with increasing competition for water resources[J]. Global and Planetary Change, 2016 , 145: 143-152.
- [40] VISHNU D R, Studies on Impact of Salinity on Morphological, Physiological and Anatomical changes in the early stages of *Populus euphratica* Growth[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(9):123-126.
- [41] 史薇, 徐海量, 赵新风, 等. 胀果甘草种子萌发对干旱胁迫的生理响应[J]. 生态学报, 2010, 38(8):2112-2117.
- [42] YU P J, XU H L, SHI W, et al. Physiological indexes of *Populus euphratica* leaves from different canopy positions in the Lower Reaches of Tarim River[J]. Pakistan Journal of Botany, 2012, 44(3): 933-938.
- [43] 史军辉, 王新英, 刘茂秀. NaCl 胁迫对胡杨幼苗叶生理生化指标的影响 [J]. 新疆农业科学, 2012, 49(11):2022-2028.