

扎龙湿地植被覆盖度及其分布结构对水文气象要素的响应

王伟泽^{1,2}, 胡 鹏¹, 王建华¹, 杨泽凡¹, 刘 欢¹, 杨 钦^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:扎龙湿地位于黑龙江省松嫩平原乌裕尔河尾间,是世界上现存最大的芦苇湿地,也是丹顶鹤等珍稀鸟类重要的繁育场所和栖息地。基于遥感、气象和水文数据,通过像元二分法反演植被覆盖度,分析了扎龙湿地核心区2005–2017年植被覆盖度的时空分布特征,探究径流、降水和气温3项水文气象要素对湿地不同等级植被覆盖度的影响,为科学开展湿地生态需水核算和芦苇植被保护提供参考。结果表明,湿地中高植被覆盖和高植被覆盖区域主要分布于乌裕尔河来水和人工补水形成的河道及周围地区,2005–2017年,中高植被覆盖和高植被覆盖区域面积总体呈增长趋势,于2015年达到峰值,中高和高植被覆盖度区域面积占比达到87.48%,湿地植被生态质量整体改善。乌裕尔河来水及人工补水量与第二年湿地高植被覆盖区域面积呈显著正相关($r=0.555$, $P<0.05$),表明径流量对湿地植被生长具有明显促进作用,特别是对高、中高覆盖度区域面积的增长具有促进作用,且存在年际滞后性;温度升高有利于湿地核心区植被覆盖度整体的提高,但促进作用并不明显;降水对湿地核心区植被覆盖无明显影响,乌裕尔河来水及人工补水量是影响扎龙湿地核心区植被覆盖度的主要因素。

关键词:扎龙湿地;像元二分法;植被覆盖度;水文气象要素

中图分类号:Q948 **文献标志码:**A

文章编号:1674-3075(2020)05-0089-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



遥感数据覆盖范围广、时空连续性好,是植被覆盖监测的重要手段。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是反映植被光合作用吸收有效辐射的一个重要指数,对植被的生长势和生物量非常敏感,能够较好地反映地表植被的繁茂程度,并进一步反演出地表植被覆盖度(曹乐瑶等,2019;薛华柱等,2019)。陈涛等(2008)通过像元二分法估算密云水库上游植被覆盖度,经过验证,该结果具有较高精度;刘家琰(2018)等基于1998–2013年SPOT-VEGETATION影像计算NDVI,应用像元二分法估算了神农架林区的植被覆盖度并分析其变化趋势。

水资源是植被生长不可或缺的重要因素,大量学者针对植被覆盖度与水文气象要素的关系开展过相关研究。李春晖等(2004)研究了黄河流域各区域

的NDVI对降水、径流的响应关系,认为年内变化上NDVI和径流呈明显的正相关,但年际变化上NDVI和径流不具有明显相关性;孙艳玲等(2012)根据华北区域1982–2006年的遥感影像数据,采用相关分析法对植被覆盖度变化与降水、气温的相关关系进行了分析,探讨降水和气温对植被覆盖度的驱动作用;史晓亮等(2013)基于GIMMS/NDVI数据对诺敏河流域植被覆盖的时空演变特征进行了研究,发现流域尺度上植被覆盖度与径流不具有明显的相关性,像元尺度上植被覆盖度和径流的正相关和负相关共存;赵秀霞等(2017)基于艾比湖湿地不同年份的NDVI数据,建立了植被覆盖度与湿度、气温和降水的线性回归模型;Gouveia等(2017)分析了不同时间尺度上地中海地区NDVI和降雨及蒸散发的相关性,发现降水与蒸散发差值对该地区NDVI有显著影响。已有研究表明,径流、气温、降水等水文气象因素对区域植被覆盖度有重要影响(Pettorelli et al, 2005; Jeong et al, 2011; Liu et al, 2018),但目前研究大都针对某一特定区内NDVI整体变化进行分析,各项因素对高、中、低不同等级植被覆盖度分布结构的影响研究较少。本次研究则将同一区域根据植被覆盖度划分为不同等级,以研究各因素对特定区域植被覆盖度分布结构的影响。

收稿日期:2020-04-23

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0404503);国家自然科学基金(51625904);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B522017)。

作者简介:王伟泽,1992年生,男,博士研究生,研究方向为水生态及水资源。E-mail: wangwziwhr@126.com

通信作者:胡鹏,1985年生,男,教高,主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail: hp5426@126.com

目前水文生态研究大都关注单一生态系统(夏军等, 2020), 本次研究则重点关注河-沼系统水文生态响应, 特别是植被演化剧烈和水文要素变化明显的尾间型河沼湿地(董李勤等, 2013)。

扎龙湿地位于黑龙江省松嫩平原西部齐齐哈尔市与大庆市交界处(图 1), 是由于乌裕尔河尾间地势平坦低洼、河水漫散、流速缓慢发育而成的芦苇沼泽, 地处温带大陆性季风气候, 冬季寒冷漫长, 春季干旱多大风, 夏季湿热多雨, 秋季降温急剧, 降水量整体较少, 且年际、年内波动大, 干燥指数在 1.01~1.14(于成龙和刘丹, 2019)。扎龙自然保护区始建于 1979 年, 是我国最大的鹤类繁殖栖息地, 1992 年被列入国际重要湿地名录。19 世纪前扎龙地区人烟稀少, 人类活动影响较小, 乌裕尔河径流以及嫩江洪泛水量均进入该区, 扎龙湿地基本处于自然状态, 呈现出沼泽湿地遍布、湖泊发育、芦苇丛生长势良好的繁荣景观(刘加海等, 2006)。从 20 世纪 50 年代开始, 乌裕尔河流域内水利建设、灌溉、水库蒸发、河流及地下水资源过度开发造成尾间湿地来水量减少(崔保山等, 2001), 造成湿地芦苇和羊草面积不断缩小, 香蒲及由菊科蒿属植物、蔷薇科萎陵菜属植物、藜科碱蓬属植物、莎草科苔草属植物构成的亚优势种或单优群落等低劣牧草面积不断扩大, 植被呈逆向演替(王海军等, 2003)。

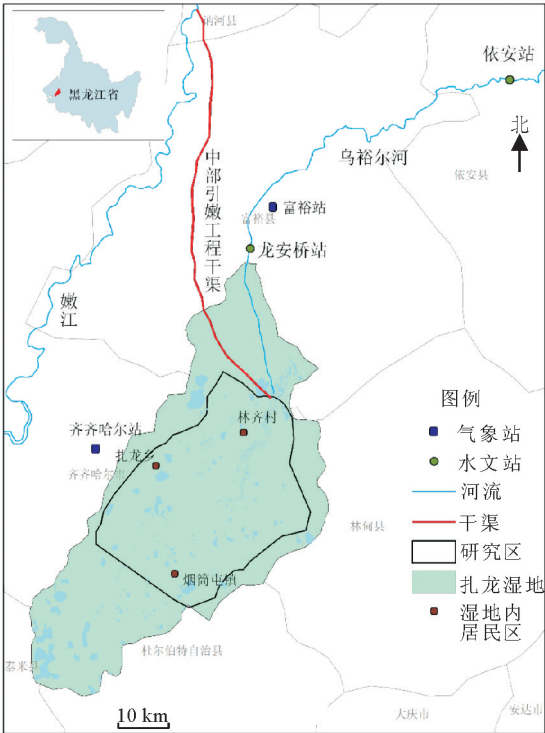


图 1 扎龙湿地范围及研究区域

Fig.1 Location of the study area in Zhalong wetland

本研究基于扎龙湿地核心区 NDVI 数据, 通过像元二分法反演区域植被覆盖度, 利用植被覆盖度像元尺度时空分布和频率分布可视化以及皮尔逊相关性分析, 探究径流、降水和气温对不同等级植被覆盖度时空分布的影响效应, 以期为扎龙国家级自然保护区植被生态质量提升提供参考。

1 资料与方法

1.1 NDVI 数据获取

本文 NDVI 数据基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 采用最大值合成法生成, 将云层和大气散射的影响降低到最小, 经过波段计算转化为 NDVI 原始值, 分辨率为 1 km × 1 km, 时间尺度为 2005 - 2017 年逐月(徐新良, 2018)。在地理信息系统软件支持下, 分别计算扎龙湿地核心区范围内的 NDVI 月平均值。

1.2 气象数据

通过中国气象数据网下载中国地面国际交换站气象资料日值数据集(V3.0), 获得 2005 - 2016 年各气象站的气温和降水量数据, 根据扎龙湿地附近富裕站和齐齐哈尔站气象资料进行克里金插值(李俊晓等, 2013), 最终得到扎龙湿地日气温和降水数据, 2 个气象站点位置如图 1。

1.3 径流量数据

扎龙湿地客水来源主要为上游乌裕尔河径流及黑龙江省中部引嫩工程生态补水。其中乌裕尔河主河槽经由龙安桥水文站断面汇入扎龙湿地(图 1), 但由于龙安桥水文站 1978 年后撤销缺乏实测水文数据, 因此根据 1956 - 1978 年依安站与龙安桥站流量关系曲线进行推导, 依安站和龙安桥站年径流量关系如图 2。通过公式(1)校正后的流量作为乌裕尔河入扎龙湿地径流量:

$$Q_{LAQ} = -0.005Q_{YA}^2 + 0.362Q_{YA} + 0.9 \tag{1}$$

式中: Q_{LAQ} 为龙安桥站径流量; Q_{YA} 为依安站径流量。

黑龙江省中部引嫩工程补水量由黑龙江省中部引嫩工程管理处提供, 该工程于 2001 年对扎龙湿地开展紧急补水工作, 后每年根据湿地缺水情况相机补水, 截至 2019 年累计补水 29 亿 m^3 , 补水时间为每年 5 - 9 月。乌裕尔河径流量和人工补水量之和作为入扎龙湿地径流量, 其公式下:

$$Q_{Total} = Q_{LAQ} + Q_{Supplement} \tag{2}$$

式中: Q_{Total} 为进入湿地总径流量; Q_{LAQ} 为龙安桥站径流量; $Q_{Supplement}$ 为中部引嫩工程补水量。

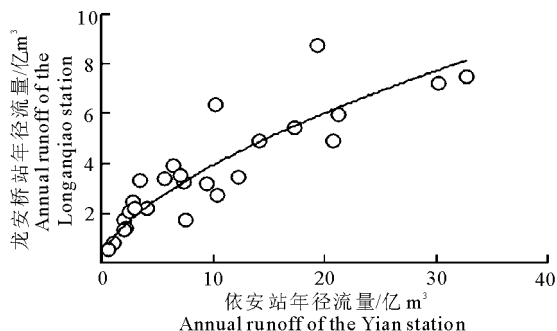


图 2 依安站-龙安桥站年径流量关系曲线

Fig.2 Annual runoff relationship between Yian and Longanqiao hydrologic stations

1.4 植被覆盖度计算

研究区内存在村镇等居民聚集区,如林齐村、烟筒屯及扎龙景区等土地硬化、植被覆盖度极低的区域,因此采用像元二分法计算研究区植被覆盖度空间分布。像元二分法假设每个像元的 NDVI 值均由裸土和植被两部分混合构成。

$$NDVI = VFC \times NDVI_{soil} + (1 - VFC) \times NDVI_{veg} \tag{3}$$

式中:NDVI_{soil} 为纯裸土像元的 NDVI 值;NDVI_{veg} 为纯植被像元的 NDVI 值;VFC 为植被覆盖度,其计算公式如下:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \tag{4}$$

研究区内夏季植被丰茂,裸土像元和纯植被像元并存,可近似取 VFC_{max} = 100%, VFC_{min} = 0%, 公式(2)可变为:

$$VFC = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \tag{5}$$

式中:NDVI_{max} 为区域内像元的最大 NDVI 值;NDVI_{min} 为区域内像元的最小 NDVI 值。

扎龙湿地内 7 月份平均 NDVI 值最高,因此根据 7 月份 NDVI 数据,通过像元二分法计算研究区植被覆盖度空间分布。考虑到扎龙湿地研究区域内植被状况总体较好,本文将植被覆盖度分为 5 类:低植被覆盖度 (VFC < 60%), 中低植被覆盖度 (60% ≤ VFC < 70%), 中植被覆盖度 (70% ≤ VFC < 80%), 中高植被覆盖度 (80% ≤ VFC < 90%) 和高植被覆盖度 (90% ≤ VFC < 100%), 并分别统计不同植被覆盖度区域面积百分比。

1.5 皮尔逊相关性分析

为研究降水、径流和温度对扎龙湿地核心区内植被覆盖度的影响,对春季(3-5 月)、夏季(6-8 月)、秋季(9-11 月)降水量、径流量、平均温度和不

同覆盖度等级区域面积进行相关性分析和显著性检验。

本文采用皮尔逊(Pearson)相关系数法来确定两个因子之间的相关关系,并计算相关系数(r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

对两个独立变量在 95% 的置信区间内相关性是否显著进行检验,在给定显著性水平 P = 0.05 下,零假设是指两个变量没有显著性关系,替代性假设是指两个变量有显著性关系。

2 结果与分析

2.1 湿地 NDVI 时间变化

扎龙湿地多年平均 NDVI 从 3 月开始逐渐升高,5 月升幅最大,到 7 月达到峰值(NDVI = 0.78)后开始下降(图 3-a),1 月和 2 月的 NDVI 值最低,均为 0.16。这与湿地核心区芦苇沼泽面积占比 80% 以上,植被类型以芦苇等水生植物为主,芦苇在 4-6 月出芽,7-8 月开花,于冬季封冻后对芦苇进行收割的植被生长规律基本一致。

采用 7 月的平均 NDVI 代表区域内当年植被覆盖情况,分析植被覆盖年际变化趋势。从图 3-b 可以看出,2005-2017 年扎龙湿地 NDVI 波动较大,其中 2015 年平均 NDVI 值最大,为 0.83;2005 年和 2009 年的 NDVI 值最低,同为 0.74,多年平均 NDVI 值为 0.78,整体呈上升趋势(r² = 0.49),说明近年来扎龙湿地核心区生态环境质量呈改善趋势。

2.2 湿地植被覆盖度时空变化

根据像元二分法反演研究区域内各像元植被覆盖度后,统计不同等级植被覆盖度区域面积百分比,结果如图 4 所示。2005-2017 年,研究区内低、中低植被覆盖度区域面积呈现下降趋势,低植被覆盖度区域显著降低,由 2005 年的 31.37% 下降至 2015 年的 0.52%,随后出现小幅度增长;中低植被覆盖度区域面积由 26.89% 下降至 2015 年的 4.38%,随后小幅度增长。2005-2014 年,中植被覆盖度区域面积总体不变,2015 年降至 7.6%,随后小幅度增长。中高和高植被覆盖度区域面积总体呈增长趋势,2015 年达到峰值,中高和高植被覆盖度区域面积占比达到 87.48%,随后 2 年有所下降。从 7 月湿地的平均植被覆盖度来看,2005 年湿地平均植被覆盖度最小为 65.97%,2015 年湿地平均植被覆盖度最大,达到 89.47%。

高植被覆盖度区域所在空间位置频率分布结果表明,主要集中在上游乌裕尔河径流和水库补水入水口以南以及上游来水和中部引嫩工程补水形成的河道周围(图5)。低植被覆盖度区域则是湿地周边及湿地内的村落乡镇及村镇附近所存留的耕地,湿地北端为林齐村,南端低植被覆盖度区域为烟筒屯镇(图1)。2005年、2008-2010年、2012-2014年

扎龙湿地核心区内高覆盖度区域面积较小,仅在湿地内河道中上游周围地区形成高覆盖度分布,其他年份湿地内高覆盖区域基本贯通南北。高覆盖度植被的形成对水分依赖性大,主要为河道坑塘等水分丰富区域内形成的高密度芦苇,中植被覆盖和中低植被覆盖度区域介于湿地高密度芦苇和村镇群落之间。

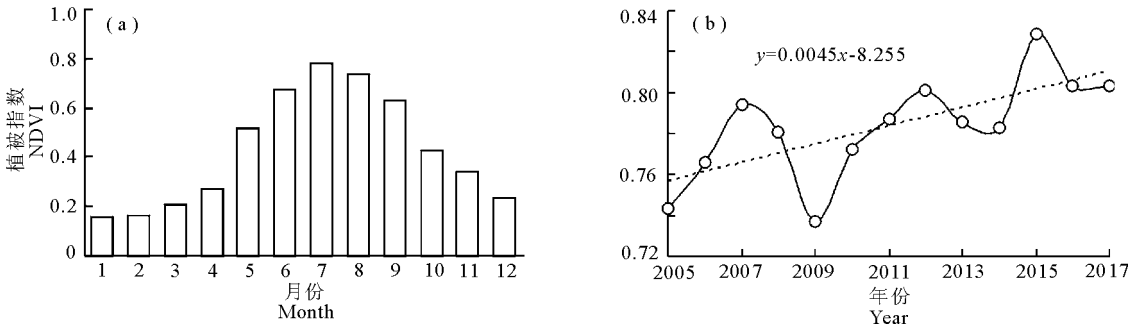


图3 扎龙湿地核心区植被指数的年内变化(a)及 NDVI 年际变化(b)
Fig.3 Monthly variation (a) and annual variation (b) of the normalized difference vegetation index (NDVI) in the core zone of Zhalong wetland

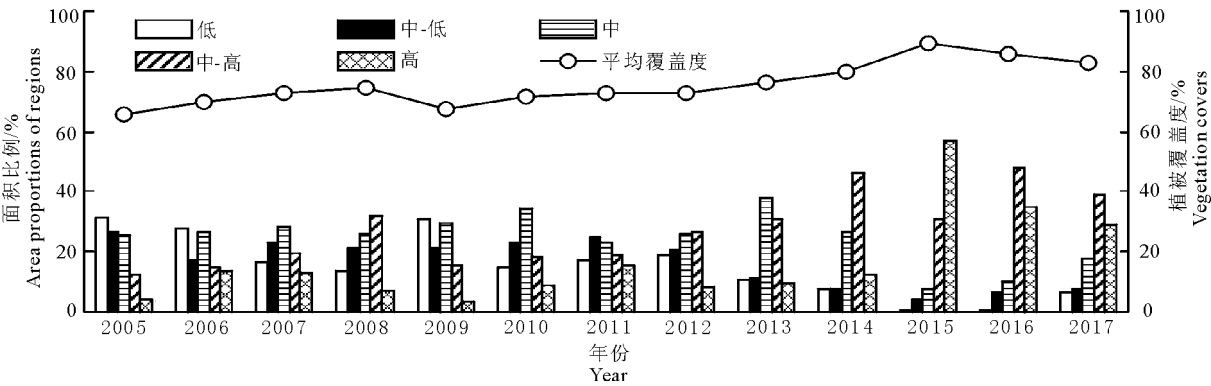


图4 2005-2017年扎龙湿地核心区不同等级植被覆盖度区域面积百分比和平均覆盖度
Fig.4 Proportions of different vegetation cover regions and variation of average annual vegetation cover in the core zone of Zhalong wetland (2005-2017)

3 讨论

3.1 降水对植被覆盖度的影响

由表1可知,春季、夏季、年降水与各个覆盖度等级区域面积并没有显著相关关系,表明降水对植被覆盖度影响不强。扎龙湿地处于半干旱地区,2005-2016年降水量在305~728mm,多年平均降水量为478mm,降水量相对较少,蒸发量大,总体较为干旱(冯夏清等,2010)。年内降水主要集中在6-9月,占全年降水量的80%左右,其中7-8月降水量最大,占全年的53%,春季干旱少雨,4-5月降水仅占全年的10%左右(图6)。降水与植被生长节律不匹配,因此对湿地植被覆盖度影响较小。秋季

降水与第二年7月的平均覆盖度呈显著正相关,低和中低植被覆盖度区域面积呈显著负相关,秋季降水对植被覆盖度的影响表现出一定的滞后性。这与扎龙湿地地势低洼,秋季降水形成径流后流动缓慢,12月进入冰封期后将水资源存留于湿地内有很大的关系,第二年解冻后满足了植被出芽及生长所需水分,促进植被生长,提高了湿地植被覆盖度。

3.2 径流量对植被覆盖度的影响

春季径流量与当年低覆盖区域面积呈显著负相关($r=-0.661, P<0.05$),秋季径流量与第二年的中、中低覆盖度区域面积呈显著负相关($r_1=-0.573, P_1<0.05; r_2=-0.648, P_2<0.05$)(表2),年径流量与第二年高覆盖度区域面积呈显著正相关

($r=0.555, P<0.05$);同时与第二年 7 月的平均覆盖度呈显著正相关($r=0.561, P<0.05$)(图 7)。这表明径流量对湿地植被生长具有明显促进作用,特别是对高、中高覆盖度区域面积的增长作用明显。

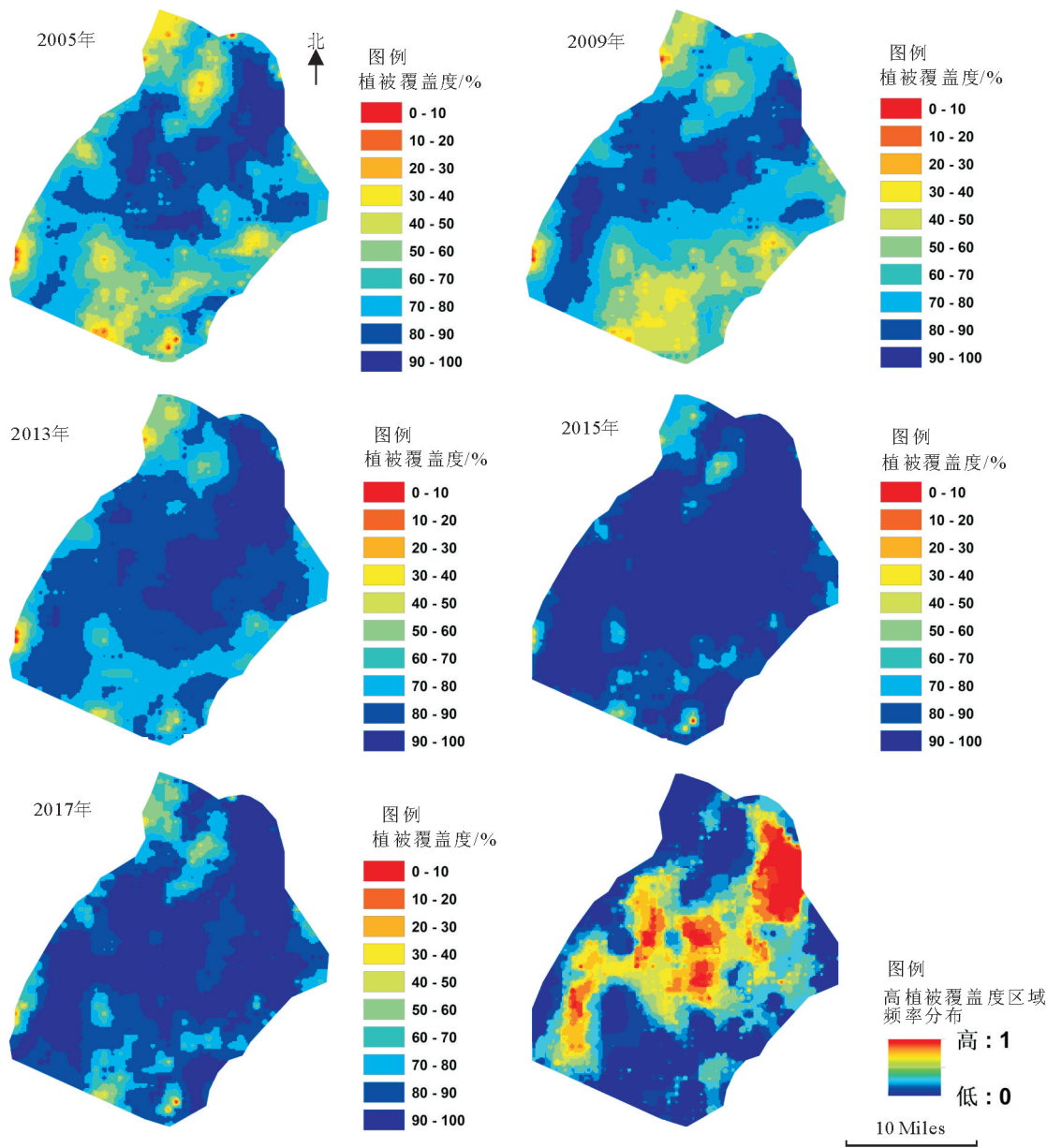


图 5 2005 – 2017 年扎龙湿地核心区植被覆盖度时空分布及高植被覆盖度区域频率分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of vegetation cover and frequency distribution of high vegetation cover areas in the core zone of Zhalong wetland (2005 – 2017)

表 1 降水与植被覆盖度区域面积比例相关性矩阵

Tab.1 Correlations of the rainfall and proportions of different vegetation cover regions

降水情况	低覆盖度区域	中低覆盖度区域	中覆盖度区域	中高覆盖度区域	高覆盖度区域	7 月平均覆盖度
春季降水	−0.058	0.447	0.290	−0.206	−0.192	−0.159
夏季降水	0.491	0.279	0.228	−0.413	−0.284	−0.423
年降水量	0.302	0.184	0.100	−0.238	−0.170	−0.258
秋季降水(延后一年)	−0.552 *	−0.572 *	−0.239	0.449	0.424	0.561 *
年降水量(延后一年)	0.399	−0.183	0.213	−0.105	−0.195	−0.230

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著。
Note: * significant correlation at the level of 0.05.

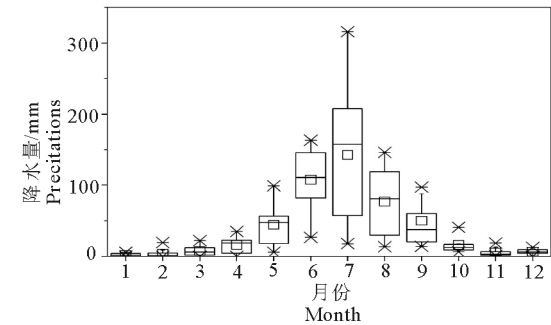


图6 2005-2016年月度降水量分布

Fig.6 Monthly precipitation distribution
(2005-2016)

根据图5可知,高覆盖度和中高覆盖度区域主要位于上游乌裕尔河来水及人工补水形成的河道周围。扎龙湿地核心区主要植物为芦苇,其为多年生水生或湿生植物,发育生长耗水量较大(刘长发等,2012),并且对水深有一定要求(逢世良等,2018),因此主要分布于河道周围等具有一定水深的区域。径流量较大时,湿地来水量丰富发生洪泛过程,水面面积扩大,满足芦苇生长发育所需水分、适宜芦苇生长的区域扩大,逐渐出现中高、高覆盖度区域面积增大的现象;并且,径流量对中高、高覆盖度面积的影响表现出一定的滞后性,秋季径流量和年径流量往往对第二年湿地的植被覆盖度具有提升作用。

葛晓光等(2009)通过研究额济纳绿洲 NDVI 对黑河下游径流量响应发现,径流量对 NDVI 影响存在一年的滞后性,河边植被主要生长在包气带内,受地下水位、包气带含水量等多重因素影响,河流水文站径流量与这些影响因素的非线性关系导致滞后性的发生,这与本研究得出的结论类似。扎龙湿地芦苇及其株下的沼泽蓄滞水能力很强,是蓄水防洪的天然“海绵”(刘兴土,2007;谢映霞,2019),每年的9-10月乌裕尔河来水和人工补水经湿地沼泽的蓄滞及冬季封冻,于次年3-4月流出湿地,历经半年多的时间。因此,径流量对于湿地植被覆盖度的影响具有年际滞后性。

3.3 温度对植被覆盖度的影响

由表3可知,夏季温度与湿地低覆盖度区域面积呈显著负相关关系,因此除低覆盖度区域以外,与其他区域面积之和呈显著正相关($r = 0.519$, $P < 0.05$),表明夏季温度的升高对于整个湿地核心区内植被生长都具有一定促进作用,但与湿地核心区平均覆盖度并没有显著相关性。年均气温对于植被覆盖度也没有显著影响,这是由于该地区位于我国高寒地区,冬季寒冷漫长,冬季气温对于年均气温影响较大,而此时芦苇处于休眠越冬状态,对于植被生长一般不会产生较大影响(张友民等,2005)。

表2 径流与植被覆盖度区域面积比例相关性矩阵

Tab.2 Correlations of runoff and proportions of different vegetation cover regions

季节径流	低覆盖度区域	中低覆盖度区域	中覆盖度区域	中高覆盖度区域	高覆盖度区域	7月平均覆盖度
春季径流	-0.661 *	-0.447	0.008	0.392	0.332	0.498 *
夏季径流	0.309	-0.244	0.202	0.024	-0.210	-0.171
年径流量	0.047	-0.429	0.052	0.218	-0.007	0.076
秋季径流(前一年)	-0.573 *	-0.648 *	-0.129	0.462	0.402	0.557 *
年径流量(前一年)	-0.558 *	-0.573 *	-0.209	0.321	0.555 *	0.561 *

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著。

Note: * significant correlation at the level of 0.05.

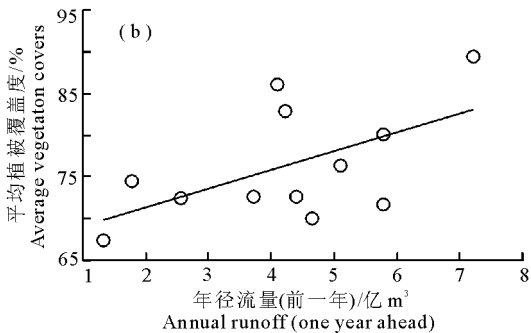
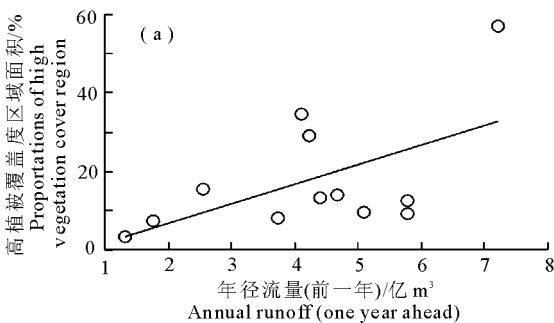


图7 年径流量与高植被覆盖度区域面积比例(a)和平均植被覆盖度(b)相关性

Fig.7 Correlation between annual runoff and proportions of high vegetation cover regions (a) and average vegetation cover (b)

表 3 气温与植被覆盖度区域面积比例相关性矩阵

Tab.3 Correlation of temperature and proportions of different vegetation cover regions

季节气温	低覆盖度区域	中低覆盖度区域	中覆盖度区域	中高覆盖度区域	高覆盖度区域	7 月平均覆盖度
春季气温	-0.188	-0.244	-0.449	0.431	0.175	0.274
夏季气温	-0.519 *	0.065	-0.108	0.325	0.129	0.299
年均气温	-0.346	-0.123	-0.351	0.185	0.346	0.338
秋季气温(前一年)	0.348	0.230	-0.058	-0.280	-0.088	-0.250
年均气温(前一年)	0.019	-0.051	-0.388	0.066	0.186	0.119

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著。

Note: * significant correlation at the level of 0.05.

4 结论与展望

1)2005 - 2017 年扎龙湿地低、中低和中植被覆盖度区域面积总体呈减少趋势,中高和高植被覆盖度区域面积有较大幅度增加,中高和高植被覆盖度区域占比在 2015 年达到峰值 87.48%,表明区域植被生态质量整体呈上升趋势;高植被覆盖度区域主要集中在上游来水和中部引嫩工程补水形成的河道周围,低植被覆盖度区域主要是湿地周边和湿地内的村落乡镇以及村镇附近所存留的耕地。

2)扎龙湿地属半干旱地区,降水量较小而蒸发量较大,季节和年降水量对湿地植被覆盖度均无明显影响。湿地多年平均降水量为 478 mm,年内降水主要集中在 6 - 9 月,春季干旱少雨,3 - 5 月降水仅占全年的 12%,降水分布与植被生长节律不匹配,对湿地植被覆盖度影响较小。

3)相对于降水和温度,径流量对扎龙湿地核心区植被覆盖度的影响较大,特别是年径流量对次年高覆盖度区域面积的增长具有显著促进作用。径流量对湿地植被覆盖度的影响有一年左右的滞后性,这与沼泽湿地蓄滞水能力很强,冬季湿地封冻将水资源滞留有很大关系。

4)夏季温度与低覆盖度区域面积呈显著负相关,表示温度上升能够促进湿地核心区内覆盖度的整体提高,但总体并不明显,水资源限制仍是影响区域植被覆盖度的重要因素;由于地处高寒区,冬季温度对年均温度影响较大,而对植被影响较小,因此年均温度和湿地植被覆盖度并无明显相关性。

湿地植被的生长不仅受到自然因素的影响,同时也受到人类活动等非自然因素的影响,但由于人类活动状况调研难度大,数据资料匮乏,本文仅考虑了人工补水这项非自然因素。下一阶段研究可结合湿地内人口数量、耕地面积等资料,同时对更大时间尺度的气象水文要素数据进行收集,统筹考虑自然因素和非自然因素对湿地植被覆盖度结构的影响。

参考文献

曹乐瑶,周涛,罗惠,等,2019. 森林覆盖率在森林生长对气候干旱响应上的调节作用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 55(2):240 - 247.

陈涛,李平湘,张良培,等,2008. 利用“北京一号”小卫星数据估算植被覆盖度的可行性研究[J]. 遥感信息, (5): 37 - 40.

崔保山,杨志峰,2001. 湿地生态系统健康研究进展[J]. 生态学杂志, 20(3):31 - 36.

董李勤,章光新,2013. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. 水科学进展, 24(2):177 - 183.

冯夏清,章光新,尹雄锐,2010. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展,29(7): 827 - 832.

葛晓光,薛博,万力,等,2009. 黑河下游径流量与额济纳绿洲 NDVI 的滞后模型[J]. 地理科学,29(6):900 - 904.

李春晖,杨志峰,2004. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系[J]. 地理研究,23(6):37 - 43.

李俊晓,李朝奎,殷智慧,2013. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报,(9):87 - 90,97.

刘加海,许唯临,曹波,2006. 制约扎龙湿地生存发展的问題与对策分析[J]. 水利科技与经济,(3):156 - 158.

刘家琰,谢宗强,申国珍,等,2018. 基于 SPOT - VEGETATION 数据的神农架林区 1998 - 2013 年植被覆盖度格局变化[J]. 生态学报, 38(11): 3961 - 3969.

刘兴土,2007. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能[J]. 湿地科学,5(1):64 - 68.

刘长发,郑晶予,李晋,等,2012. 基于 GIS 的双台子河口潮滩湿地翅碱蓬和芦苇生境适宜度分析[J]. 水生态学杂志,33(3):14 - 19.

逢世良,焦德志,2018. 扎龙湿地植物群落结构及其与土壤因子关系[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版),34(6):82 - 85,94.

史晓亮,李颖,赵凯,等,2013. 诺敏河流域植被覆盖时空演变及其与径流的关系研究[J]. 干旱区资源与环境,27(6):54 - 60.

孙艳玲,郭鹏,2012. 1982 - 2006 年华北植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 生态环境学报, 21(1):11 - 16.

王海军,盛连喜,陈鹏,2003. 松嫩平原西部土壤盐渍化逆向演替的影响因子与调控系统[J]. 东北师大学报(自然科学版),35(3):60-65.

夏军,张永勇,穆兴民,等,2020. 中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. 地理学报,75(3):445-457.

谢映霞,2019. 基于海绵城市建设理念的系统治水思路[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),55(5):552-555.

徐新良,2018. 中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集[DS/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>). DOI: 10.12078/2018060602

薛华柱,张国东,周红敏,等,2019. 几种典型地表类型反照率时序变化特征及其参数化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),55(2):272-283.

于成龙,刘丹,2019. 扎龙湿地 NPP 时空格局及其对气候因子变化的响应[J]. 生态环境学报,28(4):741-751.

张友民,王立军,曲同宝,等,2005. 芦苇资源的生态管理与芦苇的高产培育[J]. 吉林农业大学学报,27(3):280-283,295.

赵秀霞,楚新正,马晓飞,等,2017. 基于像元二分模型的艾比湖湿地 NDVI 指数对微气候的响应[J]. 草业科学,34(6):1168-1177.

Gouveia C M, Trigo R M, Begueria S, et al, 2017. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators[J]. Global and Planetary Change, 151: 15-27.

Jeong S J, Chang-Hoi H O, Gim H J, et al, 2011. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008[J]. Global Change Biology, 17(7):2385-2399.

Liu S, Huang S, Xie Y, et al, 2018. Spatial-temporal changes of maximum and minimum temperatures in the Wei River Basin, China: Changing patterns, causes and implications[J]. Atmospheric Research, 204(5):1-11.

Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al, 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. Trends in Ecology & Evolution, 20(9):503-510.

(责任编辑 万月华)

Response of Vegetation Cover and Structure to Meteorological and Hydrologic Factors in Zhalong Wetland

WANG Wei-ze^{1,2}, HU Peng¹, WANG Jian-hua¹, YANG Ze-fan¹, LIU-Huan¹, YANG Qin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation,
China Institute of Water Resources and Hydropower
Research, Beijing 100038,P.R.China;

2.Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084,P.R.China)

Abstract: The Zhalong wetland, located in the lower reaches of the Wuyuer River, is the largest reed wetland in the world and provides an important breeding site and habitat for rare birds such as *Grus japonensis*. In this study, we explored the temporal and spatial distribution characteristics of vegetation cover in the core zone of Zhalong wetland for the period 2005 – 2017. The effects of runoff, rainfall and temperature on the proportions of different vegetation covers were analyzed based on meteorological and hydrological data. Vegetation cover was calculated using a dimidiate pixel model based on the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from Landsat satellite images of the core area of Zhalong wetland. Meteorological and hydrological data were obtained from the Yian and Longanqiao hydrologic stations, and Pearson correlation analysis was used to analyze the relationship of vegetation cover and meteorological/hydrological factors. Regions of medium-high and high vegetation cover were mostly distributed near the river channel created by water scouring from river inflow and a water diversion project. From 2005 to 2017, the area of medium-high and high vegetation cover regions increased, peaking in 2015 at 87.48% of the core area. Vegetation ecology in Zhalong wetland improved during the investigation period. Input of water from the Wuyuer River had a significant effect on vegetation cover in the core area. The quantity of inflowing water from Wuyuer River, supplemented by water from the water diversion project, was positively associated with high vegetation cover area the following year ($r=0.555, P<0.05$). Vegetative cover is promoted by high inputs of water from Wuyuer River, but the positive response occurs the year after the increase in water quantity. Higher air temperature also promoted vegetation cover across the entire wetland, but the effect was moderate, and no significant effects of rainfall on vegetation cover were observed. Thus, the primary factor affecting vegetation cover in Zhalong wetland is the volume of water flowing into the wetland from Wuyuer River and the water diversion project. Our results provide a reference for estimating the ecological water flow required to support reed conservation and improve the ecological environment of Zhalong wetland.

Key words: Zhalong wetland; dimidiate pixel model; vegetation cover; meteorological and hydrological factors