DOI: 10.5846/stxb202107051787

董熙,陈志泊,胡春明,刘平.气候、径流及河漫滩湿地淹没状态耦合关系研究——以海拉尔河下游段为例.生态学报,2022,42(22);9297-9308. Dong X, Chen Z B, Hu C M, Liu P.Coupling relationship between climate, runoff and inundation state of river floodplain wetlands in the lower section of the Hailar River.Acta Ecologica Sinica,2022,42(22);9297-9308.

气候、径流及河漫滩湿地淹没状态耦合关系研究

——以海拉尔河下游段为例

董 熙1,2,3,陈志泊1,2,*,胡春明3,刘 平3

- 1 北京林业大学信息学院, 北京 100083
- 2 国家林业和草原局智能信息处理工程技术研究中心, 北京 100083
- 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:海拉尔河是内蒙古自治区重要河流,对维持地区生态平衡具有极其重要的作用。选取海拉尔河下游河段作为研究对象(以下称海拉尔河),以遥感、气候、水文数据为基础,基于淹没频率模型分析探讨河漫滩湿地淹没情况对气候变化的响应。研究表明:海拉尔河气候近三十年呈现干冷变化趋势,多年平均降雨量 356.45mm,年均减少 11.64mm,多年平均温度-0.2℃,年均减少 0.01℃;年径流呈减少趋势,年均减少 2.05×10⁸ m³;温度下降导致冻土的增加,融雪补给径流减少,从温度层面上对径流产生影响,降雨直接补给径流,降雨减少,径流减少;各淹没频率下的淹没区域,受影响程度不同,大于 80%极高淹没频率区受径流影响最小,0—20%极低频率区域受径流变化影响最大;气候-径流-淹没状态存在耦合关系,由于温度下降,研究区冰封时间增长,抑制春季径流的产生,降雨减少,夏秋季的径流延迟,影响河漫滩湿地水份供应,进而减少河水出槽次数,影响河漫滩湿地淹没状态。研究成果可为海拉尔河生态环境保护以及水资源开发利用提供理论支持。

关键词:海拉尔河;淹没状态;Landsat 数据;气候变化;径流变化

Coupling relationship between climate, runoff and inundation state of river floodplain wetlands in the lower section of the Hailar River

DONG $Xi^{1,2,3}$, CHEN $Zhibo^{1,2,*}$, HU Chunming³, LIU Ping³

- 1 School of Information Science & Technology of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
- 2 Engineering Research Center for Forestry oriented Intelligent Information Processing of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China
- 3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The Hailar River is an important river, which plays an extremely important role in maintaining the ecological balance in the Inner Mongolia Autonomous Region. This study selects the lower reaches of the Hailar River as the research object (hereinafter referred to as the Hailar River). Based on remote sensing, climate, and hydrological data, we analyze the floodplain wetlands in the lower reaches of the Hailar River in response to climate change by the inundation frequency model analysis. The results show that the climate in the Hailar River area has presented a trend of dry and cold changes in the past 30 years, with an averagely annual rainfall of 356.45 mm, an averagely annual decrease of 11.64 mm, and a multi -year average temperature of -0.2 °C, an averagely annual decrease of 0.01 °C; The annual runoff shows a decreasing trend, with an average annual decrease of 2.05×108 m³; The Hailar River area belongs to the northeastern permafrost region. As the temperature drops and the frozen soil increases, the snowmelt recharge runoff decreases in May, which has an

基金项目:国家自然科学基金项目(32071775)

收稿日期:2021-07-05; 网络出版日期:2022-07-13

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhibo@ bjfu.edu.cn

impact on the Hailar River runoff. The rainfall from June to October directly recharges the runoff, and as rainfall decreases, runoff reduction; The submerged areas under each submergence frequency are affected by runoff changes to different degrees. The extremely high submerged frequency area greater than 80% is the least affected by runoff, because this area is located on both sides of the main channel, and the 0—20% extremely low frequency area is most affected by runoff changes. Because this area is far away from the main river, the decrease in temperature of the Hailar River leads to the increase of the freezing time in the Hailar River area, inhibiting the generation of runoff in May, and the reduction of rainfall, resulting in the delay of runoff from June to October, affecting the water supply of the river to the wetland of the floodplain. Insufficient water supply in the river will cause to reduce the horizontal connection between the floodplain and the river, thereby reducing the number of times that the river overflows out of the channel, reducing the floodplain wetland inundation frequency, affecting the floodplain wetland inundation status, so as to serve the ecosystem in the extremely low inundation frequency area below 20% on both sides of the river bank. The function produces an inhibitory effect. The results can provide theoretical support for the Hailar River's ecological environment protection and water resources development and utilization.

Key Words: Hailar River; inundation status; Landsat data; climate change; runoff changes

河漫滩湿地是水文过程的空间集成介质,径流量影响着地表河漫滩湿地资源,径流不仅是陆地水循环与水量平衡的重要组成部分,也最有价值和最易开发利用的自然资源之一^[1]。同时,河水淹没频率反应了水体淹没时间的长短和次数,被认为是影响湿地植被生态系统的最重要的一种水文因素^[2]。因此综合分析径流、水体淹没频率以及其影响因素,对改善区域水资源和河流管理具有非常重要的意义^[3]。

国内外学者对径流变化特征、演变规律及其驱动因素开展了大量的研究工作。丁艳峰等通过研究发现,气候变化以及日益频繁的人类活动对黄河流域水资源影响严重,造成黄河径流量减少,产生断流^[4]。穆兴民等研究表明,黄河天然径流量年际振荡较大,变差系数在 0.19—0.20 之间波动,其径流量年际变化具有阶段性特征^[5]。胡弟弟等在北极开展了勒拿河流域气候变化及其对径流的影响的研究,发现径流受温度和降雨影响较大,与气候因素呈正相关^[6]。吴锦奎等在河西走廊石羊河、黑河流域的研究表明,河流径流的变化特征与多年冻土活动层增厚导致的流域退水减慢有关^[7];王晓颖等基于气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究,研究发现人类活动对白河径流有抑制作用^[8]。上述前人学者在气候对径流的驱动以及径流的变化规律等方面进行一系列的研究,但是以往对径流的研究主要集中在气候对径流的影响以及径流变化的驱动因素等方面,而对气候与径流以及河流面积变化的相互关系鲜有研究。

近年来,由于全球河漫滩湿地不断退化,国内外学者也开展了河漫滩湿地的相关研究。由于径流量的变化进而引起河流淹没区域以及湿地面积的变化,这一系列变化对生态系统和环境健康产生了巨大威胁^[9-12]。例如,胡春明以二卡湿地为为研究区,开展了生态阈值研究,研究发现中、高径流期湿地面积比例可近似作为保护区湿地面积的适宜值和理想值^[13];苟芳珍在苏干湖湿地开展了河流径流补给对漫滩湿地植被生物量空间格局的影响研究^[14];李理在淇河流域进行了径流供给、调节对生态系统服务功能的研究^[15];在国外,如在恒河,印度河,阿木河谷和锡尔河等一些大型流域,发生了周期性的断流情况^[10]。由于流域周期性的断流使周围的湿地生态系统遭到破坏,造成生物多样性减少^[9-12]。近年来遥感(RS)技术已成为监测水体信息的重要工具^[8-10]。遥感技术的发展使得湖泊、河流监测技术从传统的水文站发展到更加全面的遥感监测^[16-19]。Dong等人基于遥感的方法监测湿地情况,以Water Performance Frequency(WPF)为基础,提出淹没保证率模型Water Inundate Guarantee Rate (WIGR),来分析周期性淹没对于河漫滩湿地健康的重要性^[20-21]。Sarda 同样以遥感监测为技术手段,结合Water Performance Frequency(WPF)和深度数据分析了湿地的水文稳定性^[22]。Feng等人指出长江下游由于水利枢纽建设而导致的流量减少了17%—27%,影响流域淹没状态研究工作出建议如果不尽快采取适当的管理策略,将导致水资源短缺^[23]。在上述学者河漫滩湿地淹没状态研究工作

中,往往集中于遥感尺度,没有考虑河流径流对湿地生态系统健康的影响,并且结合水文数据的研究较少。

针对上述研究存在的问题,本研究将遥感数据与河流水文数据相结合,综合考虑气候与径流对淹没状态的影响,通过建立气候-径流-淹没状态的关系,填补在寒区河流漫滩湿地淹没状态对气候响应的研究空白。本研究选取位于海拉尔河下游段作为研究对象,基于淹没频率的模型,通过对气候变化的特征、趋势、规律的分析,从径流变化的角度了解气候变化在寒区河流径流变化中的作用,分析气候对径流产生的影响以及对河漫滩湿地淹没状态的影响,分析探讨三者的关系,以期为河流管护决策者提供理论参考和方法支持。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位置见图 1,海拉尔河位于中国内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,发源于牙克石市乌尔其汉镇境内大兴安岭吉鲁契那山西麓,是额尔古纳河的上游河段,呈东西流向。干流全长 622km。该地区属于大陆性草原气候,位于中高纬度温带半干旱区。冬季严寒漫长,春季干旱多大风,夏季温凉短促,秋季降温急剧、霜冻早,年光照充足,春季降水少,空气干燥,是全年相对湿度最小的季节,平均在 47%左右;夏季降水多,空气中水汽含量丰富,相对湿度达 65%—73%;秋季气温下降,相对湿度略高于春季,在 58%—66%之间。

海拉尔河为补给型河流,径流年内分配不均,主要集中在汛期。根据资料统计,多年平均年径流量为36.95亿 m³,6—9月径流量占年径流量的56.7%—71.4%;尤其是主汛期7—8月的径流量,占年径流量的32.3%—41.9%;枯水期5月来水较少,仅占年径流量的12.1%—15.6%。海拉尔河洪水分春季融冰洪水和夏季暴雨洪水。融冰洪水—般出现在4—5月,洪水特点为峰高量小,历时较短,约—个月左右;夏季洪水—般出现在7—8月,洪水特点为峰平量大,历时长,一般历时达60—70d,洪峰流量出现的次数每年1—2次。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 数据来源

从美国国家航空航天局(NASA)获取本研究所用 Landsat 5 TM/8 OLI TIRS 1T 级图像,影像覆盖整个研究区,行列号为123026,影像获取时间1989—2018年年间(5-10月),所有可用影像云量低于2%,共计45期。

海拉尔河 1989—2018 年逐日流量数据来自水文勘测局,数据记录完整;研究区 1989—2018 年逐月的降雨数据,通过中国气象数据网(http://data.cma.cn)下载得到,水文数据用于后续计算水体淹没保证率模型,气象数据用于分析计算海拉尔地区气候变化趋势。坝后水文站位于海拉尔河中段,所以该水文站所测径流信息能代表研究区水文状况。

1.2.2 数据预处理

本研究的数据预处理包括影像的辐射定标、大气校正、几何校正、正射校正、影像裁剪等。本研究使用 ENVI 5.3 中的辐射度校准工具(Radiomotric Calibration)计算辐射度,将辐射文件输入到 FLAASH 大气校准模块中。有研究表明^[23]使用多光谱数据计算光谱指数时,可以使用简单的快速大气校正或暗像元法,为减少由大气散射和吸收引起的辐射误差,故本研究 ENVI 5.3 中 FLAASH 大气校正法。所有反射率产品的值都在0到1之间,并对获得的所有反射产品进行几何校正,并且误差均小于1,完成对所有遥感数据的预处理后,通过波段计算工具计算水体指数,并对数据进行裁剪。

2 研究方法

2.1 水体面积的确定

各种遥感指数可用于水体提取以及从卫星图像进行湿地测绘。诸如 NDWI^[19], MNDWI^[24], AWEIsh^[20]等。在本研究中,利用 MNDWI^[24]水体指数绘制研究区水体地图,并提取水体面积。已有研究表明, MNDWI指数方法提取水体精度更高,同时,错、漏分误差也较低,且在狭长状水体的提取上效果较好^[25]。为了验证湿地图,本研究于 2019、2020、2021 年 3 次实地调研海拉尔干流及支流,共采集水体样点 100 个,并结合相对较

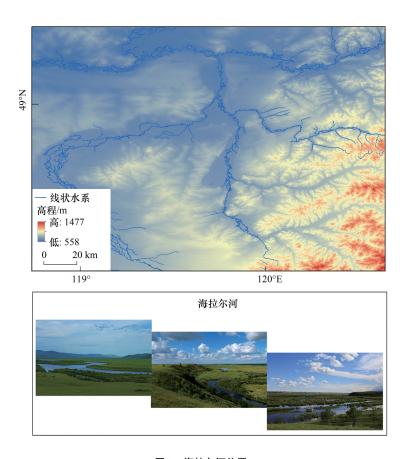


图 1 海拉尔河位置 Fig.1 Location of Hailar River

高分辨率的 Google 地球历史影像(50个点)验证水体湿地提取精度,并且计算 Kappa 系数。

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$
 (1)

式中, Green, NIR, MIR 是指 Landsat 影像的绿、近红外和中红外波段, MNDWI 值大于 0 表示水体。

本研究对研究区域的水体提取准确性进行了定量评估,基于误差矩阵的整体准确性和 Kappa 系数被用来评估水体提取的准确性,Kappa 系数越接近 1 则表明准确性越高^[25],Kappa 系数可计算为:

Kappa =
$$\frac{P \sum_{i=1}^{n} P_{ii} - \sum_{i=1}^{n} (P_{i+} \times P_{+i})}{P^{2} - \sum_{i=1}^{n} (P_{i+} \times P_{+i})}$$
(2)

式中,P 是参考数据的像素总数; P_{ii} 类别中正确像素的总数; P_{i+} 是从分类数据中得出的类别的像素总数; P_{+i} 是从参考数据中得出的类别的像素总数;n 是类别总数。

2.2 水体淹没频率

利用水体淹没频率 Water Performance Frequency(WPF)来^[21-22]表示海拉尔河下游段及两岸湿地的淹没状态,用以反映径流对淹没状态的影响,其数学表达式为:

WPF
$$(x_i, y_i) = \frac{T}{Z}$$
 (3)

式中, (x_i, y_i) 表示影像中某一像素,T 表示该像素在研究的所有遥感影像中被淹没的期数,Z 表示研究的所有遥感影像总期数。

用 Matlab 编程计算逐个像素的 WPF,基于 WPF 值将各像素的淹没情况分为:极低(0-20%)、低(21%-

40%)、中(41%—60%)、高(61%—80%)、极高(81%—100%)五类。

2.3 径流变化对气候的响应

以坝后水文站逐日径流资料为基础,研究海拉尔河下游段年径流总量年际变化特征,并计算径流量与气温、降雨的距平、累计距平直观反映各要素的变化趋势,并分析气候与径流以及淹没面积的关系。

3 研究结果

3.1 水体面积提取与精度验证

研究使用 MNDWI 指数提取水体面积,并整理了对应日期的流量数据。在 42 期遥感影像对应的 42 个日均流量数据中(图 2),超 200m³/s 大流量数据共计 14 个,其中:5 月产生的大流量数据 6 个,占 42.85%;6—10 月大流量数据 8 个,占 57.15%。水体面积提取结果显示(表 1):研究区水体面积平均值 45.31km²;最大值出现在 1995 年 6 月 28 日为 107.15km²,对应日均流量 381m³/s;最小值出现在 1998 年 5 月 3 日,对应日均流量 49.9m³/s。

Kappa 系数验证结果表明(表 1): MNDWI 水体提取精度大多在 85%以上, MNDVI 所描绘的湿地地图可以基本反映真实地面情况,数据可用。

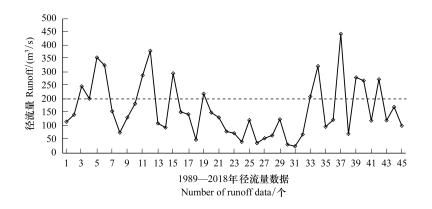


图 2 海拉尔河坝后站 45 个日均流量数据曲线

Fig.2 45 Daily flow data curves of Hailar River Bahou Station

表 1 提取水体精度、kappa 系数与流域面积

Table 1 Extraction of water body accuracy, kappa coefficient and watershed area

时间 Time	精度/% Precision	日均流量 Daily flow/ (m³/s)	卡帕系数 Kappa	面积 Area/km²	时间 Time	精度/% Precision	日均流量 Daily flow/ (m³/s)	卡帕系数 Kappa	面积 Area/km²
1989-05-26	70	117	0.68	32.53	2002-09-19	80	42.1	0.78	20.18
1989-10-17	75	143	0.77	39.91	2003-10-08	86	123	0.84	39.46
1990-10-20	94	249	0.92	74.56	2004-08-23	90	37.6	0.84	21.02
199-105-16	70	203	0.68	57.40	2006-05-25	94	55.4	0.92	24.25
199-108-04	88	356	0.83	76.18	2006-09-30	94	65.9	0.86	23.74
1991-08-20	92	327	0.94	49.34	2007-06-13	91	126	0.93	30.84
1992-07-05	80	156	0.72	37.21	2007-07-31	85	32	0.80	18.69
1993-05-05	90	76.6	0.89	29.06	2007-08-16	86	25.8	0.93	25.05
1994-09-13	90	133	0.91	36.91	2008-09-19	95	69.7	0.96	25.90
1994-09-29	77	184	0.76	40.83	2009-10-08	94	211	0.91	72.47
1995-05-11	80	290	0.82	86.42	2010-05-04	89	324	0.87	86.51
1995-06-28	91	381	0.88	107.15	2010-07-23	88	98.3	0.85	32.22
1995-08-15	86	111	0.84	28.77	2010-09-09	90	124	0.86	44.53

									
时间 Time	精度/% Precision	日均流量 Daily flow/ (m³/s)	卡帕系数 Kappa	面积 Area/km ²	时间 Time	精度/% Precision	日均流量 Daily flow/ (m³/s)	卡帕系数 Kappa	面积 Area/km²
1995-10-02	92	95.2	0.91	27.86	2011-08-11	80	444	0.78	105.56
1996-05-13	89	297	0.82	79.49	2011-09-11	80	71.6	0.78	26.63
1996-07-16	86	153	0.81	33.21	2013-10-03	94	282	0.91	100.55
1997-09-21	93	145	0.92	39.58	2014-05-31	82	270	0.78	54.65
1998-05-03	86	49.9	0.87	16.40	2014-10-22	86	121	0.83	39.58
1999-05-06	90	221	0.88	67.04	2015-07-05	92	275	0.92	76.31
1999-08-10	91	151	0.88	31.68	2015-10-25	88	122	0.82	26.19
2001-08-15	82	133	0.78	24.82	2016-05-04	92	172	0.90	45.45

23.92

25.08

2018-10-17

3.2 水体淹没频率

2002-05-14

2002-08-18

歩丰

图 3 代表研究区的淹没频率图, WPF 高于 80%区域主要为海拉尔河主河道, WPF 低于 20%区域则主要分布在海拉尔河两岸湿地。

80.7

74.2

平均面积 Average area

0.79

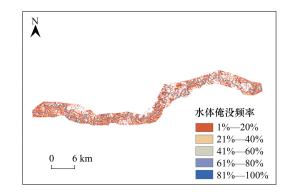
0.92

不同淹没频率区域的面积统计见表 2:淹没频率区域总面积为 194.48km^2 ; 极低 WPF(0-20%)区域面积 132.38km^2 , 占比达到 68.07%; 而低(21%-40%)、中 (41%-60%)、高(61%-80%)、极高(81%-100%) WPF 区域占比分别为 12.71%、6.01%、4.45%和 8.76%。

3.3 海拉尔气候变化

3.3.1 年降雨量变化

1989—2018 年期间(图 4),海拉尔气象站多年平均降水量 356.45mm,其中 2017 年降水量最小为



102

45.31

0.92

33.69

图 3 海拉尔河下游段淹没频率图

Fig. 3 Water performance frequency in the lower reaches of Hailar River

215.4mm,2013 年降水量最大为 619.1mm,最大降雨量与最小降雨量相差 403.7mm,表明海拉尔地区年际间降雨量差异较大。

表 2 不同水体淹没频率区域的面积统计

Table 2 Area statistics of areas with different Water performance frequency

水体淹没频率/% Water body inundation frequencies	面积/km² Area		水体淹没频率/% Water body inundation frequencies	面积/km² Area	百分比/% Percentage
0—20	132.38	68.07	61—80	8.66	4.45
21—40	24.71	12.71	81—100	17.04	8.76
41—60	11.69	6.01	总面积 The total area	194.48	100.00

海拉尔地区年降水量整体表现为下降趋势,年均减少11.64mm。1989年开始到2018年底,降水距平正负不断交替出现,1998年以前累计距平持续大于0,表明该时期降水相对较多(图4),1998年后累计距平持续小于0,表明降雨量低于均值。

3.3.2 年际气温变化

如图 5 所示,海拉尔地区气温年际变化幅度较大,海拉尔气象站多年平均气温为-0.2℃,其中 2012 年平均温度最低为-2.15℃,2007 年平均温度最高为 1.26℃,最高均温与最低均温相差 3.4℃,年均气温整体呈下降

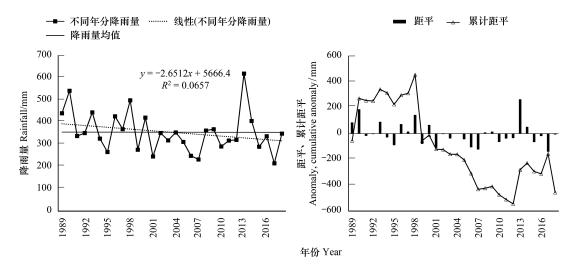


图 4 海拉尔年际降雨变化、距平、累计距平

Fig.4 Hailar's interannual rainfall changes, anomalies, and cumulative anomalies

趋势,年均变化 0.01℃。

由图 5 可知,2009 年之前距平值几乎均为正,2009 年后 2015 年距平温度为正,研究期内正负距平值交替 出现,累计距平值出现三次上升三次下降的趋势。

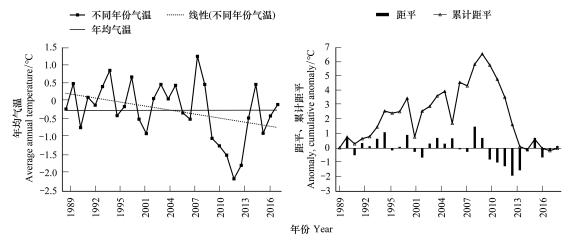


图 5 海拉尔年际气温变化、距平、累计距平

Fig.5 Hailar's interannual temperature changes, anomalies, and cumulative anomalies

3.4 径流年际变化

多年均径流量 $32.96 \times 10^8 \,\mathrm{m}^3$,年径流量最大值出现在 2013 年为 $87.48 \times 10^8 \,\mathrm{m}^3$,年径流量最小值出现在 2017 年为 $10.23 \times 10^8 \,\mathrm{m}^3$,最大值与最小值相差 $77.25 \times 10^8 \,\mathrm{m}^3$,年径流量减少,年均减少 $2.05 \times 10^8 \,\mathrm{m}^3$ 。

坝后站实测年径流量变幅较大,研究时间段内呈"s"形变化(图 6),在 1989—2018 研究时间段内,坝后站所监测的区域内年径流呈下降趋势。由累计距平曲线先上升、后下降的变化趋势可以看出年径流量不断减少(图 6)。

4 讨论

4.1 气候变化与人类活动对径流的影响

表 3 显示了坝后站所测年径流与年均气温和年降水量的相关与偏相关系数。由表 3 可知,年降雨量、年均气温与坝后站所测径流量的相关关系。年均降雨量、年均气温与径流呈现显著相关与负相关关系;在年降

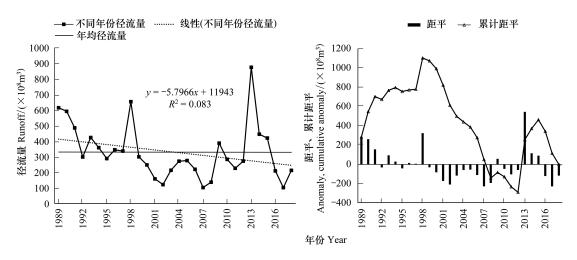


图 6 坝后站年径流量变化趋势、距平、累计距平

Fig.6 Annual runoff change trend, anomaly, and cumulative anomaly at Bahou Station

雨量作为控制变量的条件下,气温与径流的偏相关系数为-0.095,说明二者存在线性影响但影响有限,在年均气温作为控制变量的条件向,降雨与径流偏相关系数为0.805,明二者存在线性影响且影响显著。

表 3 年度径流与年降雨、气温相关性与偏相关分析

 Table 3 Correlation between annual runoff and annual rainfall and temperature

 坝后年径流
 坝后

指标 Index		坝后年径流 Annual runoff at Bahou Station		坝后年径流 Annual runoff at Bahou Station
相关性	海拉尔年均降雨量	0.810 **	偏相关性	0.805
Correlation	海拉尔年均气温	-0.179		-0.095

^{*}表示通过 0.05 的显著性水平检验, **表示通过 0.01 的显著性水平检验

见图 7, 坝后站所监测的径流从 1989—2018 年整体下降, 气象站所测降雨和气温下降。1989—1993 年降雨数据下降, 1989—1993 年的径流明显下降; 1995—1998 年降雨有明显的上升过程, 导致这个时间段内的年度径流也有一个明显的增加过程; 2011—2013 年降雨有明显的上升过程, 径流也有明显上升的过程, 随后降雨下降, 径流下降。

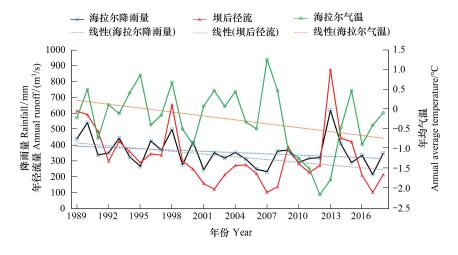


图 7 海拉尔河年度径流与气温、降雨相关变化趋势

Fig.7 The trend of annual runoff, temperature and rainfall in the Hailar River Basin

见图 7,温度对径流的影响是综合且复杂的^[26-27]。如 2001—2005 年间,温度变化与径流变化表现出一致性,即:气温升高,径流增加,造成这一现象的主要原因是:海拉尔河属于东北冻土区,在这一时间段内气温升高,使得冰雪消融和土壤冻结推后,特别是进入 21 世纪以来,暖冬的出现导致地面升温明显,冻土退化释放地下水补给河流,同时冻土活动层厚度增加,季节性冻结减少,土壤冻融的变化加强了水分向地下的迁移,使得河流径流增多,对气候变暖的响应显著,在这一时间段内,虽然气温升高,对河流的蒸散有一定的作用,但是在这期间降雨量缓慢增加,直接补给了河流径流,所以该时间段内,河流径流增加明显^[28]。另一方面温度与径流在一定程度上表现出了相反的变化趋势,如 2010—2013 年间,气温下降,径流增加,造成这一现象的可能原因是:随着年度温度的下降导致冻土的增加,冻土冷储构成冷控系统,导致土壤含水量增大,增加下渗增加基流,一定程度上增加了河流径流量,同时,温度降低河流蒸散减少,上述原因总体对河流产流有增强作用^[28-30],与陆胤昊等人对海拉尔河径流的结果相同^[31]。

刘腊山等人的研究表明^[26-31],在高寒地区,气温对径流的影响在高寒主要表现在 2 个方面:1)影响积雪的消融;2)影响河流的蒸发量,积雪消融产生的融水是高寒地区河流径流的主要补给来源之一。近年来,研究区气温变化明显,呈现"S"增减趋势(图 7),随着气温的变化,海拉尔河研究区冰雪融水量发生变化,进一步引起河流径流量的变化,进而导致淹没区域的变化。

由上文图 2、表 1 大流量数据出现时间可知,超 200m³/s 流量数据共 14 个,5 月产生的大流量数据 6 个,由于研究区 5 月几乎没有降雨(雪),主要依靠冰雪融化补给径流,所以在该时段内,温度变化起到主要影响径流的作用,6—10 月大流量数据 8 个,该时间段内研究区降雨充沛,降雨直接作用于径流,所以 6—10 月海拉尔河径流的变化由降雨占主导影响[28]。

本研究以 1989、2018 年部分海拉尔河地区统计年鉴为反应人类活动因素的指标,见表 4,首先当地区生产总值增加,且增速较快,相比前一时间段增长 40 倍有余,人口、工业生产总值、粮食产量、耕地面积均有明显增长,不同反应人生活动因素的指标的增长,导致对海拉尔河水资源的过度利用与开发,直接导致径流减少,在研究时限内,海拉尔地区工农业得到空前发展,基础设施也不断完善,人类活动通过改变下垫面条件进而影响流域水循环过程,其对流域径流变化的影响因素众多,如土地利用变化、水资源开发、水利工程等均有明显的影响。水资源的不合理利用,造成流域水资源开发利强度加剧,在一定程度上改变了径流状态。综上,径流的下降是自然因素及人类活动影响综合作用的结果,由于研究区地广人稀,自然因素对径流的影响占主导因素,同时,将自然因素与人类活动因素对径流的影响的具体量化将是下一步的研究重点。

Table 4 Hailar 1989 and 2018 Statistical Yearbook 人类社会活动指标 1989年 2018年 1989-2019年(增长倍数) Human social activity indicators Year 1989 Year 2018 1989-2019 (multiple growth) 地区生产总值 Gross regional product/万元 11930295.00 289664.0 41.19 人口 Population/万 12.5 28.74 2.30 工业总产值 Industrial output/万元 24652.0109068.10 4.42 主要粮食物产量 Main food production/t 8720.0 87456.00 10.03 188.0 4.73 耕地面积 Cultivated area/km2 888.60

表 4 海拉尔 1989 年、2018 年统计年鉴

4.2 径流对淹没状态的影响

如图 8 所示,本文将 45 期数据的提取面积与对应日期的流量(表 1)的数据进行了拟合,研究发现,海拉尔河的当日遥感影像所提取的水体面积和当日的流量数据呈高度拟合,拟合系数 R^2 分别达到 0.8525,又对该数据进行了皮尔逊相关性分析,海拉尔河的当日遥感影像所提取的河流面积和当日的流量数据相关系数是 0.923**(表 5)。

当流量数据增大时,对应日期遥感影像所提取的湿地面积越大,流量与淹没面积关系均表现出同样趋势,随着流量的增大,研究区及两侧区域的淹没面积也相应增加,其原因在于:在没有人为因素干扰的情况下,研

究区河段为平原河段,流量较大时,洪水的漫滩效应较明显,使得坝后站流量与所提取的淹没面积表现出较好的一致性,由此可见二者呈现显性正相关,并有良好的线性关系。

维持河流中的生态流量至关重要,河流流量的稳定有利于该河流的生态环境稳定^[21-23]。各淹没频率下的淹没区域,受影响程度不同,大于80%极高淹没频率区域集中在主河道附近,河流径流影响最小,0—20%极低频率区域分布河岸两侧的河漫滩湿地当中,该区域最易受径流变化影响,由于径流与淹没面积呈现正相关,则径流量的损失会导致横向水体的交换减少,减少了淹没面积的大幅度波动,导致对河漫滩湿地水文状况的产生负面影响,进而影响淹没频率0—20%极低淹没频率区域;相反的是,当径流量增加,会增加河水出槽次数,极低频率淹没区域淹没次数增加,增大了淹没面积的波动,同时,保证各频率下淹没区域面积稳定,对河漫滩湿地生态系统的发育起到促进作用。

表 5 研究时限内不同时间的流域面积与月均径流量

Table 5 Watershed area and monthly average runoff at different times within the study time limit

指标	时间	相关系数
Index	Time	Correlation coefficient
淹没面积-日均流量 Submerged area-average daily flow	1989—2018	0.923 **

^{*}表示通过 0.05 的显著性水平检验, **表示通过 0.01 的显著性水平检验

4.3 气候-径流-淹没状态的相关关系

水文情势与气候之间存在显着相关性,水文情势的变化通常认为是反映气候变化的常用指标,因为气候变化可以通过改变水文过程事件的幅度、持续时间、频率、时间、可预测性等,进而改变河流系统的水文周期[32-34]。

河道径流量的影响因素包括气温、降水等因素,地质条件、下垫面状况等自然因素以及人口、资源开发、项目建设等社会经济因素^[35-36],但是,在自然状态下的河流,降雨以及融雪起到对河流的径流量进行调节的主要作用,在海拉尔河流域地区,气温升高或者降低会导致的河流的蒸发加大以及冻土退化,这也是影响径流年内分配的重要因素之一。1989 年以来,该地区气温呈缓

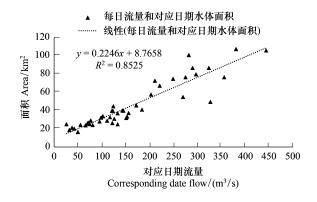


图 8 海拉尔河水体面积与对应日期流量的拟合关系

Fig.8 Fitting relationship between Hailar River Basin area and daily flow

慢下降趋势,但下降趋势缓慢,由于温度的降低,导致海拉尔河地区冰封时间增长,会抑制春季径流的产生,导致春夏秋季的径流的延迟,影响河流对河漫滩的湿地水份供应^[37—40]。湿地面积随时间的推移而发生的变化,由于受研究区降雨、融雪以及周边地区的城市发展,导致河流径流的减少,河流的水份供给不足会减少漫滩与河流间的横向连接度,进而减少河水漫出河槽次数,减少河漫滩湿地淹没频率^[41—42],从而对河岸的河岸两侧极低淹没频率区域的生态系统服务功能产生抑制作用。

因此,可以得出结论,气候变化对径流产生影响,由于气温下降,降雨的减少,致使河道天然径流过程,趋于稳定、均匀的水文过程改变水沙情势,进而影响海拉尔河的淹没状态,河水出槽次数减少,不同河流淹没频率都会受到影响,导致河流及两岸廊道生物栖息环境的多样性下降,对水生生物、湿地生态系统的健康产生影响。

5 结论

本文以 Landsat TM/OIL 遥感数据的光谱指数为数据基础,根据中国气象数据中心及海拉尔河坝后水文站提供的 1989—2018 年间的气温、降雨和径流数据,分析了海拉尔河下游淹没状态对气候变化的响应。结果

表明:

- (1)海拉尔河地区的气候经历了变干变冷的过程,温度、降雨量下降,研究期内海拉尔站监测降雨量多年平均 356.45mm,年均减少 11.64mm,多年平均温度-0.2°,年均变化 0.01°;
- (2)海拉尔河年径流呈减少趋势,坝后监测站所测段海拉尔河径流量年均减少 2.05×10⁸ m³,在自然状态下导致海拉尔河径流减少的主要原因是:一方面海拉尔河地区属于东北冻土区,随着温度下降导致冻土的增加,春季融雪补给径流减少,从温度层面上对海拉尔河产生影响,另一方面夏秋季降雨直接补给径流,随着降雨减少,径流减少;
- (3)径流与淹没面积呈现正相关,径流量的损失会导致横向水体的交换减少,减少淹没面积的大幅度波动,导致对河漫滩湿地水文状况的产生负面影响,各淹没频率下的淹没区域,受影响程度不同,大于80%极高淹没频率区域受河流径流影响最小,0—20%极低频率区域受径流变化影响最大。
- (4)气候—径流—淹没状态存在相关关系。海拉尔河温度下降,导致海拉尔河地区冰封时间增长,抑制春季径流的产生,降雨减少,导致夏秋季的径流延迟,影响河流对河漫滩的湿地水份供应,河流的水份供给不足会减少漫滩与河流间的横向连接度,进而减少河水漫出河槽次数,减少河漫滩湿地淹没频率,影响河漫滩湿地淹没状态,从而对河岸的河岸两侧 20%以下极低淹没频率区域的生态系统服务功能产生抑制作用。

参考文献(References):

- [1] 甘容, 陈长征. 沙颍河流域径流过程模拟与径流组分变化特征. 南水北调与水利科技: 中英文, 2021, 19(1): 83-91, 128.
- [2] Casanova M T, Brock M A. How do depth. Duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities. Plant Ecology, 2000, 147(2): 237-250.
- [3] 梁淑琪,王文圣,黄伟军. 1937—2018 年岷江上游径流演变特征分析. 西北大学学报:自然科学版, 2020, 50(5): 761-770.
- [4] 丁艳峰,潘少明,许祝华.近50年来黄河入海径流量变化的初步分析.海洋开发与管理,2009,26(5):67-73.
- [5] 李勃,穆兴民,高鹏,赵广举,孙文义. 1956—2017年黄河干流径流量时空变化新特征. 水土保持研究, 2019, 26(6): 120-126, 132.
- [6] 胡弟弟, 康世昌, 许民. 1936—2017 年北极勒拿河流域气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2020, 42(1): 216-223.
- [7] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 牛丽, 王根绪. 黑河中游地区湿草地蒸散量试验研究. 冰川冻土, 2005, 27(4): 582-590.
- [8] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,张永波,蔡思宇,雷晓辉.气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究.水资源与水工程学报,2020,31(4):50-56.
- [9] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, Revenga C. Fragmentation and flow regulation of the world' s large river systems. Science: New York, N Y, 2005, 308(5720); 405-408.
- [10] Huang S F, Li J G, Xu M. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term *Terra/MODIS* data time series. Natural Hazards, 2012, 62(1): 93-100.
- [11] Feng L, Hu C M, Chen X L, Cai X B, Tian L Q, Gan W X. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 80-92.
- [12] Wang J D, Sheng Y W, Tong T S D. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam. Remote Sensing of Environment, 2014, 152; 251-269.
- [13] 胡春明, 刘平, 张利田, 李曜, 西东升, 康海全. 河漫滩湿地生态阈值——以二卡自然保护区为例. 生态学报, 2013, 33(20): 6662-6669.
- [14] 苟芳珍,赵成章,杨俊仓,任杰,马俊逸,李子琴.苏干湖湿地植被地上生物量空间格局及其对水盐的响应.生态学报,2021,41(19):7774-7784.
- [15] 李理,赵芳,朱连奇,何莎莎,叶露培.淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测.生态学报,2021,41(19):7568-7578.
- [16] Schumann G, Matgen P, Hoffmann L, Hostache R, Pappenberger F, Pfister L. Deriving distributed roughness values from satellite radar data for flood inundation modelling. Journal of Hydrology, 2007, 344(1/2): 96-111.
- [17] C.J. Ticehurst, Y. Chen, F. Karim, D. Dutta, B. Gouweleeuw. Using MODIS for mapping flood events for use in hydrological and hydrodynamic models; Experiences so far. 20th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand (MSSANZ), Inc.,, 1-6 December 2013.
- [18] Ticehurst C, Guerschman J, Chen Y. The strengths and limitations in using the daily MODIS open water likelihood algorithm for identifying flood events. Remote Sensing, 2014, 6(12): 11791-11809.
- [19] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of

- Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [20] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, Proud S R. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23-35.
- [21] Dong X, Hu C M. A new method for describing the inundation status of floodplain wetland. Ecological Indicators, 2021, 131: 108144.
- [22] Pal S, Sarda R. Damming effects on the degree of hydrological alteration and stability of wetland in lower Atreyee River basin. Ecological Indicators, 2020, 116; 106542.
- [23] Feng L, Hu C M, Chen X L, Zhao X. Dramatic inundation changes of China's two largest freshwater lakes linked to the Three Gorges dam. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17); 9628-9634.
- [24] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [25] 李彤. 基于 landsat 8 OLI 数据与水体指数法的地表水体提取对比研究. 河南科技, 2020, 39(25): 45-47.
- [26] 张立芸, 唐亚, 杨欣. 1969—2012 年长江源各拉丹冬地区主要冰川整体和局部变化及其对气候变化的响应. 干旱区地理, 2014, 37(2): 212-221.
- [27] 杨传清,陈杭,顾哲衍,王蔚,鞠靖,陈立冬,朱华刚.淮河上游典型流域径流演变过程影响因素分析——以白莲崖流域为例.中国水土保持科学,2020,18(1):110-116.
- [28] 刘志斌, 黄粤, 刘铁, 包安明, 冯先伟, 邢伟, 段永超, 郭晨宇. 开都河源区径流变化的气候响应. 干旱区研究, 2020, 37(2): 418-427.
- [29] 王珂, 蒲焘, 史晓宜, 孔彦龙. 澜沧江源区气温与降水对径流变化的影响. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 306-315.
- [30] 刘腊山,任贾文. 澜沧江源头科学探险考察中的冰川学考察. 冰川冻土,2000,22(1):5-6.
- [31] 陆胤昊, 叶柏生, 李翀. 近 50a 来我国东北多年冻土区南缘海拉尔河流域径流变化特征分析. 冰川冻土, 2014, 36(2): 394-402.
- [32] Feng L, Hu C M, Chen X L, Zhao X. Dramatic inundation changes of China's two largest freshwater lakes linked to the Three Gorges dam. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17): 9628-9634.
- [33] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [34] Williamson C E, Saros J E, Vincent W F, Smol J P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6part2): 2273-2282.
- [35] Hampton S E, Izmest' Eva L R, Moore M V, Katz S L, Dennis B, Silow E A. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake-Lake Baikal, Siberia. Global Change Biology, 2008, 14(8): 1947-1958.
- [36] Lennox B, Spooner I, Jull T, Patterson W P. Post-glacial climate change and its effect on a shallow dimictic lake in Nova Scotia, Canada. Journal of Paleolimnology, 2010, 43(1): 15-27.
- [37] 胡春明, 董熙, 尤立, 李曜. 红花尔基水利枢纽对下游河道水文情势影响研究. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 89-95.
- [38] 魏天锋, 刘志辉, 姚俊强, 习阿幸, 张润. 呼图壁河径流过程对气候变化的响应. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 102-107.
- [39] 张营营, 胡亚朋, 张范平. 黄河上游天然径流变化特性分析. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 104-109.
- [40] 段利民,李玮,刘廷玺,罗艳云,Buren Scharaw. 半干旱草原型流域径流变化特征及其影响因子定量分析. 干旱区资源与环境,2017,31 (10):125-130.
- [41] Colloff M J, Baldwin D S. Resilience of floodplain ecosystems in a semi-arid environment. The Rangeland Journal, 2010, 32(3): 305.
- [42] Doody T M, Benger S N, Pritchard J L, Overton I C. Ecological response of *Eucalyptus camaldulensis* (river red gum) to extended drought and flooding along the River Murray, South Australia (1997—2011) and implications for environmental flow management. Marine and Freshwater Research, 2014, 65(12): 1082.