

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.018

黑河和白河流域湿地变化及其归因分析

吕佳南^{1,2}, 李常斌^{1,2}, 武磊^{1,2}, 谢旭红^{1,2}, 周璇^{1,2}, 魏健美^{1,2}

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:通过构建决策树模型对黑河、白河流域沼泽化草甸湿地、沼泽湿地、湖泊等主要湿地类型进行划分,选取3种景观格局指标分析湿地类型的变化特征,采用主成分分析方法对湿地变化的驱动因素进行分析。结果表明:2000年以来,黑河、白河流域湿地总面积呈增加趋势,沼泽湿地变化趋势与草甸湿地相反,存在此消彼长的特征;两河流域湿地变化的地域分异显著,黑河流域草甸湿地面积呈扩大态势,破碎化程度降低,沼泽湿地有所减少,但斑块密度降低,存在局部连片情形;白河流域沼泽湿地面积增加,适宜地形和水文条件下,草甸湿地和周边草甸可转为沼泽湿地;两河流域湿地变化具有“社会经济+农牧业因素+气候变化”交互作用的特征,社会经济类因素对年代际尺度湿地变化起主导作用。

关键词:湿地变化;决策树模型;景观指标;主成分分析;黑河流域;白河流域

中图分类号:P343;TV211 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0131-09

Analysis on wetland change and its attribution in Heihe River and Baihe River basins // LYU Jianan^{1,2}, LI Changbin^{1,2}, WU Lei^{1,2}, XIE Xuhong^{1,2}, ZHOU Xuan^{1,2}, WEI Jianmei^{1,2} (1. College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: By constructing the decision tree model, the main wetland types such as swamp meadow wetland, swamp wetland and lake in Heihe River and Baihe River basins was divided. Three landscape pattern indices were selected to analyze the change characteristics of wetland types, and the driving factors of wetland change were analyzed by principal component analysis. The results show that the total area of wetlands in Heihe River and Baihe River basins has increased since 2000, and the change trend of swamp wetlands is opposite to that of meadow wetlands. The regional differences of wetland changes in the two river basins are significant. In the Heihe River Basin, the area of meadow wetland increases with the reduction of the fragmentation degree. And the area of swamp wetland decreases with the patch density reducing, and there is local contiguity. In Baihe River Basin, the area of swamp wetland increases. Under suitable topographic and hydrological conditions, meadow wetland and surrounding meadow can be transformed into swamp wetland. The wetland change in the two river basins has the interactive characteristics of “socio-economic + agricultural and animal husbandry factors + climate change”, and socio-economic factors play a leading role in the interdecadal scale wetland change.

Key words: wetland change; decision tree model; landscape index; principal component analysis; Heihe River Basin; Baihe River Basin

湿地是由水陆交互作用所形成的自然综合体^[1],具有独特的生态水文环境条件^[2],在调节气候、涵养水源和维持区域生态平衡等方面发挥着重要作用^[3-4]。早期关于湿地的研究主要集中在受人类活动影响较大的平原和沿海地区^[5-9],研究内容

多见湿地水力传输机制、水量平衡和景观格局变化等^[10]。由于气候变化与湿地演化关系密切,湿地生态系统对气候变化的响应也逐渐成为研究热点^[11-13],特别是随着全球变暖进程加剧,高海拔生态敏感区湿地景观动态研究成为该领域前沿焦

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504306);甘肃省科技重大专项计划(20ZD7FA005);国家自然科学基金(41671017);兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基金(lzujbky-2020-kb01)

作者简介:吕佳南(1996—),男,硕士研究生,主要从事生态水文和遥感水文研究。E-mail:lvjn19@lzu.edu.cn

通信作者:李常斌(1976—),男,教授,博士,主要从事寒旱区流域科学与水资源研究。E-mail:lichb@lzu.edu.cn

点^[14-15]。Niu 等^[16]通过研究中国湿地变化趋势,认为 1978—2008 年中国湿地减少主要由土地复垦所致;李娜娜等^[17]对四川省湿地类型变化的驱动力进行了分析,认为四川省湿地类型的变化是社会经济因素和自然因素共同作用的结果,其中国内生产总值为主导因素,气温变化对其有一定影响;李志威等^[18]研究了若尔盖沼泽湿地的萎缩机制,认为气温升高对若尔盖沼泽的萎缩影响较小,人工开挖沟渠疏干沼泽积水是沼泽湿地萎缩的重要诱因;邢伟等^[19]分析了全新世以来东北地区沼泽湿地发育的动态变化过程,认为气温和降水是影响沼泽湿地发育的最重要因素。上述研究成果表明,湿地变化与气候和人类活动均有关联,由于上述过程发生效用的时间尺度并不一致,较高时间分辨率的湿地动态诊断就显得尤为关键,该方面的研究目前还较少见诸报道。

若尔盖湿地位于青藏高原东北部,是黄河上游重要的水源涵养功能区^[20-22],对黑河、白河流域河川径流具有明显调节效应。1970 年以来,黑河、白河流域湿地变化显著,已出现水位下降、湿地萎缩、沼泽土壤硬化、湿地植被退化、湿地沙化和湿地生物多样性减少等诸多问题^[23-25]。明确黑河、白河流域湿地变化及其对气候变化和人类活动的响应,有利于厘清湿地生态水文系统与气候变化和人类活动的因果关系,属河源区湿地生态系统水源涵养量化评估的基础性内容,可为高寒湿地景观保护和湿地水文人工调节等提供科学数据支撑。

1 研究区概况

黑河和白河同属黄河上游一级支流,发源于四川省红原县若尔盖高原东部,位于 102°00'E ~ 103°25'E、32°00'N ~ 34°10'N(图 1)。黑河发源于红原县东北部哲波波亚山,自南向北流经若尔盖,于玛曲和若尔盖县界处汇入黄河,干流全长 261 km,流域面积 7 427 km²,海拔在 3 273 ~ 4 451 m 之间;白河发源于红原县南部嘎哇达则,自南向北流经红原县,于若尔盖县西南部唐克镇汇入黄河,干流全长 187 km,流域面积 5 488 km²,海拔在 3 369 ~ 4 809 m 之间。两河流域内高寒草甸、湿地广布,是黄河上游重要的水源涵养生态功能区^[26]。该区高寒湿地是由青藏高原新、旧构造运动沉降和上升共同作用下形成的沼泽区,地貌类型主要有低山、丘陵和河谷阶地^[26]。气候属于大陆性高原寒温带湿润气候,高寒大陆性气候特征明显。域内气温具有南低北高、东低西高的空间分布特征;降水总体表现为南多北少,多集中在 5—9 月。

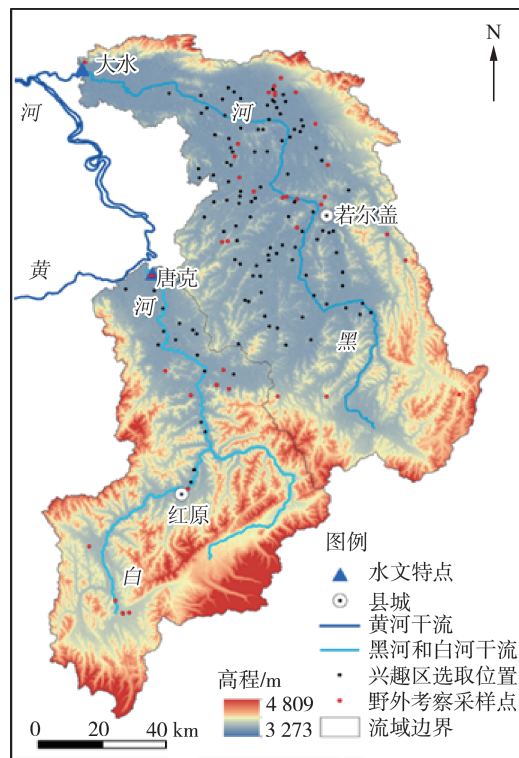


图 1 黑河和白河流域地理位置及水文地貌

Fig. 1 Geographical location and hydrological geomorphology of Heihe River and Baihe River basins

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

采用美国航空航天局 (NASA) 发布的 MOD13Q1 数据 (<http://reverb.echo.nasa.gov>), 该数据由 EOS/Terra 卫星上搭载的中分辨率光谱仪获取处理合成, 空间分辨率为 250 m。DEM 及 SLOPE 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为 90 m。本文以 DEM、SLOPE 和从 MOD13Q1 提取的归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、增强植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 等数据为基础, 通过构建决策树模型的方法提取黑河、白河两河流域湿地。降水及气温数据选用由青藏高原数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 提供的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 (The China Meteorological Forcing Dataset), 空间分辨率为 0.1°, 时间分辨率为 3 h。若尔盖县、红原县 2000—2018 年总人口、乡村人口、农林牧渔业从业人口、国民生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、肉类总产量和油料产量等统计数据来源于两县统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 决策树模型

决策树的数学内涵由阈值判定。基于阈值将影像分割为相对同质的像元子集,各子集对应某一个待定的类。决策树模型支持像元解译的过程追踪和结果对比,有利于地类变化及不同地类之间的关系解释^[27],符合湿地变化研究所需。

基于样本训练构建决策树模型, T_{NDVI} 、 T_{EVI} 、 T_{DEM} 和 T_{SLOPE} 分别为NDVI、EVI、高程和坡度的分类阈值要素值。训练过程中发现,NDVI、EVI数据能够较好地区分水体(包括具有一定明水显示的沼泽湿地)和草地,高程和坡度有利于区分川原和山区,而湿地通常位于开阔平缓的平原川区。上述指标中,高程和坡度属相对静态,年代际湿地面积萎缩或扩张主要依据 T_{NDVI} 和 T_{EVI} 的变化而定。训练、分类结果与TM影像解译成果及野外调查记录进行对比,不断调整分类阈值,最终确定两河流域主要覆被类型决策树模型分类阈值要素值(表1)。

表1 决策树模型分类阈值要素

湿地类型	T_{EVI}	T_{NDVI}	T_{DEM}/m	$T_{SLOPE}/(^{\circ})$
草地/草甸	>0.46	>0.74	>3550	
沼泽化草甸湿地	>0.46		<3550	<5
沼泽湿地	0.22~0.39	<0.75		<3
湖泊	<0.22		<3550	

2.2.2 湿地动态分析

采用景观格局动态分析方法量化湿地动态。景观格局分析指标体系大致对应斑块、类型和景观3个尺度水平。湿地在空间具有斑块分布特点,在决策树模型进行分类的基础上,选取以下斑块水平指标进行湿地动态综合分析:斑块面积百分比 I_{PLAND} 表征某一类型斑块总面积占全域面积的百分比,其值越接近0,则该斑块类型越稀少,反之越大;最大斑块指数 I_{LPI} 为某一斑块类中最大斑块面积占全域面积的比例,其值越小说明斑块连片的面积就越小,反之越大;斑块密度 I_{PD} 表征某一类型斑块在全域的密度,其值越小则该斑块类型破碎度越低,反之越高。

3 结果与分析

3.1 两河流域湿地景观动态

3.1.1 决策树模型精度验证结果

分类精度验证基于TM影像数据及野外调查结果进行。选取116个兴趣区(region of interest, ROI)进行验证,见图1。分别在2017年10月、2018年5月及7月、2019年7月、2020年7—8月前往两河流

域进行野外综合科考,考察区域涉及两河流域沿河滩涂、沼泽、湖泊等,对草甸和湿地进行了地形、地类等描述和记录,样区分布如图1所示。2000—2018年分类精度验证结果见表2,分类平均精度为95.14%,Kappa系数为0.9100,表明所构建分类决策树在两河流域的适用性较好。

表2 决策树分类精度验证

Table 2 Decision tree model classification accuracy verification

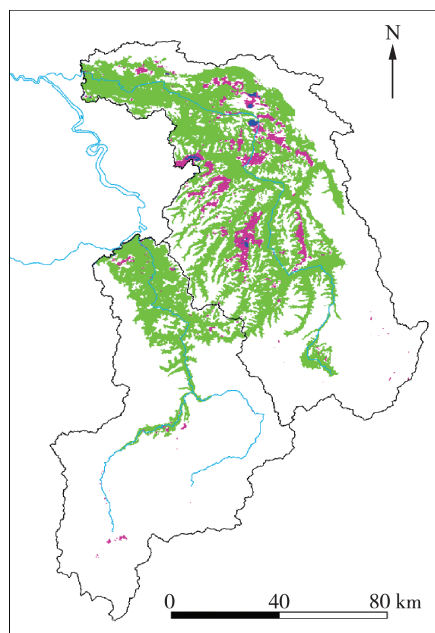
年份	总体精度/%	Kappa 系数	年份	总体精度/%	Kappa 系数
2000	94.85	0.9075	2010	93.25	0.8712
2001	95.64	0.9205	2011	96.76	0.9387
2002	96.48	0.9374	2012	90.71	0.8490
2003	95.44	0.9171	2013	93.51	0.8796
2004	93.28	0.8714	2014	93.66	0.8902
2005	96.06	0.9198	2015	97.32	0.9516
2006	96.45	0.9338	2016	97.21	0.9490
2007	95.73	0.9226	2017	97.08	0.9456
2008	95.23	0.9103	2018	94.60	0.8983
2009	94.34	0.8983	均值	95.14	0.9100

3.1.2 湿地景观提取结果

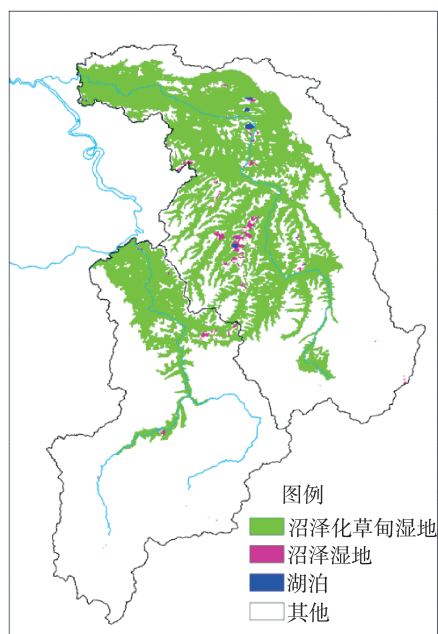
基于所构建决策树模型提取两河流域2000—2018年湿地景观,得到沼泽湿地、沼泽化草甸湿地和湖泊等主要湿地类型的空间分布。2000年和2010年分别对应两种不同的湿地景观格局,以这两年为例进行展示如图2所示。由图2可见,黑河、白河流域湿地主要分布于两河干流两侧,北部黑河流域湿地面积分布比白河流域广,特别是中、下游地带多见沼泽湿地分布。两河流域湿地动态显著,特别是沼泽湿地,与2000年相比,2010年该类湿地显著减少。

根据分类结果进行空间统计,两河流域草甸湿地、沼泽湿地和湖泊面积的逐年变化如图3所示。由图3可见,两河流域以草甸湿地面积为最大,黑河流域3种主要类型湿地面积均大于白河流域。黑河流域草甸湿地面积在2000—2010年明显增加,2010年面积最大(3167.37 km²),之后发生减少,2014年面积最小(2680.70 km²),随后再度增加;白河流域草甸湿地面积在2000—2012年上下波动,无明显增减趋势,2012年开始出现减少,2014年出现最小值(738.51 km²),随后增加;黑河流域沼泽湿地面积在2010年之前、白河流域在2009年之前均呈减少趋势,之后开始增加,在2014年达到最大值,随后又逐渐减少;两河流域湖泊面积相对稳定,研究期间略有增加。

由上述分析可知,统计时段内两河流域湿地面积迥异,但变化具有一定趋同性,均以2009年、2010年、2014年为变化特征值年份。草甸湿地在2010年



(a) 2000 年

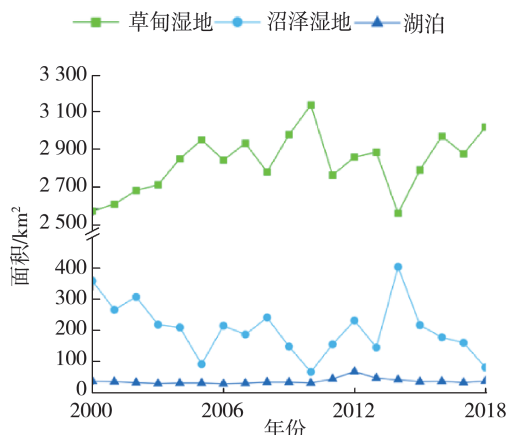


(b) 2010 年

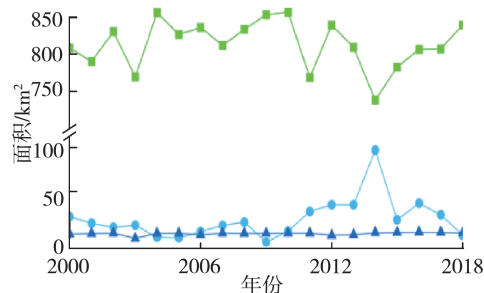
图 2 黑河和白河流域湿地的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of wetlands in Heihe River and Baihe River basins

达到最大值,在 2014 年达到最小值;沼泽湿地在 2009 年、2010 年面积较小,在 2014 年达到最大值。两河流域沼泽湿地和草甸湿地面积变化存在此消彼长的总体特征。2000—2018 年,黑河、白河流域草甸湿地面积的变化率分别为 $14.147 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $-0.111 \text{ km}^2/\text{a}$;沼泽湿地面积的变化率分别为 $-7.780 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.776 \text{ km}^2/\text{a}$;湖泊面积均有增加,变化率分别为 $0.349 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.068 \text{ km}^2/\text{a}$;湿地总面积变化率分别为 $5.486 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $0.837 \text{ km}^2/\text{a}$ 。总体来看,黑河流域以草甸湿地和湖泊增加、沼泽湿地



(a) 黑河流域



(b) 白河流域

图 3 两河流域主要湿地面积变化

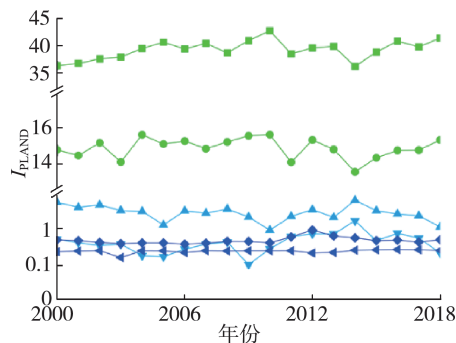
Fig. 3 Change of main wetland area in two basins

减少为主要变化特征;白河流域以草甸湿地减少、沼泽湿地和湖泊增加为主要变化特征;2000—2018 年,两河流域湿地总面积呈增加态势。

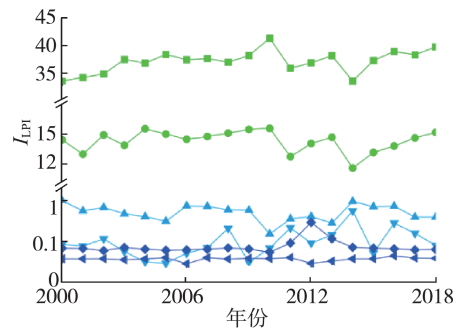
3.2 湿地景观动态变化结果

基于决策树模型分类结果,由 Fragstats4.2 景观格局指标分析软件计算斑块面积百分比 I_{PLAND} 、最大斑块指数 I_{LPI} 和斑块密度 I_{PD} 等 3 个指标,黑河、白河流域主要湿地类型的 3 个指标变化如图 4 所示。由图 4(a) 可见,黑河流域草甸湿地面积占比大于白河流域,统计期间呈增长趋势,白河流域则呈微弱减少趋势;两河流域沼泽湿地面积占比均较小,变化趋势与草甸湿地相反,特别是黑河流域沼泽湿地的减少较明显。由图 4(b) 可见,两河流域草甸湿地的 I_{LPI} 与 I_{PLAND} 在数值和趋势上都相近,表明草甸湿地在该区的完整性较好;沼泽湿地的 I_{LPI} 值小于 I_{PLAND} 值,表明沼泽湿地的破碎化程度高。由图 4(c) 可见,两河流域草甸湿地的 I_{PD} 值均发生下降,意味着该类湿地斑块密度变小,景观连通性提升;沼泽湿地的 I_{PD} 值上升,表明该类湿地斑块数量增加,破碎度进一步加剧。两河流域湖泊呈零星分布,3 个指标值在个别年份出现变动,与湖泊面积增加相对应。湿地景观及其动态分析表明,2000—2018 年,两河流域草甸湿地景观的连通性进一步增强,这一过程伴随着沼泽湿地景观的破碎化程度提升。

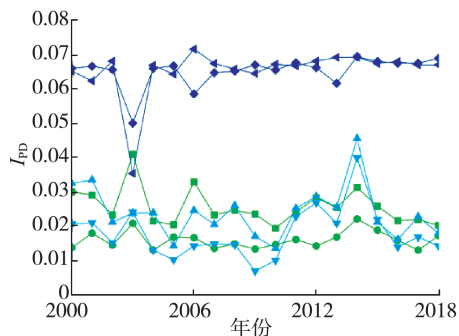
—黑河草甸湿地 —白河草甸湿地 —黑河沼泽湿地
—白河沼泽湿地 —黑河湖泊 —白河湖泊



(a) I_{PLAND}



(b) I_{LPI}



(c) I_{PD}

图4 两河流域3个湿地景观指数的变化
Fig. 4 Changes of three wetland landscape indexes in two basins

表3为2000—2018年两河流域景观斑块指标年际变幅,可见,黑河流域草甸湿地的 I_{PLAND} 增幅小于 I_{LPI} ,对应的 I_{PD} 减小,表明草甸湿地连片程度提升;从绝对变化量来看,黑河流域草甸湿地 I_{PLAND} 增幅大于沼泽湿地减幅,表明黑河流域草甸湿地的增加,并不完全对应沼泽湿地的退减,水文条件变好情形下,周边草甸也可转变为草甸湿地。上述情形在年代际尺度呈波动态势,总体来看,黑河流域草甸湿地面积整体呈扩大态势,破碎化程度降低;沼泽湿地整体呈减少态势,但存在局部发生连片的情形,对应斑块密度的降低,表明该区沼泽湿地变化的地域分异显著。白河流域情形相反,草甸湿地 I_{PLAND} 减幅小于 I_{LPI} ,对应的 I_{PD} 增加,表明白河流域草甸湿地减

少,破碎化程度提升;草甸湿地 I_{PLAND} 减幅小于沼泽湿地 I_{PLAND} 增幅,表明该区沼泽湿地的增加非完全来自草甸湿地,适宜地形和水文条件下,周边草甸也可转为沼泽湿地。两河流域湖泊各项指标变幅均为正值,表明2000—2018年,两河流域湖泊无论面积还是数量都呈增加趋势。

表3 2000—2018年两河流域景观斑块指标年际变幅
Table 3 Interannual variation of the landscape patch index in two basins from 2000 to 2018

湿地类型	黑河流域变幅		
	I_{PLAND}	I_{LPI}	I_{PD}
草甸湿地	0.1909 *	0.2048 *	-0.0003
沼泽湿地	-0.1050 *	-0.0100	-0.0002
湖泊	0.0047	0.0001	0.0002 *
湿地类型	白河流域变幅		
	I_{PLAND}	I_{LPI}	I_{PD}
草甸湿地	-0.0020	-0.0141	0.0001
沼泽湿地	0.0142	0.0043	0.0001
湖泊	0.0012 **	0.0001	0.0002

注:**表示通过0.05显著性检验,*表示通过0.1显著性检验。

3.3 湿地变化的驱动因素

3.3.1 变化趋势

两河流域湿地景观变化复杂。一方面,人类活动(如放牧,疏干等)导致沼泽湿地退演为草甸湿地;另一方面,丰水年降水量增加可导致部分草甸湿地转为沼泽湿地或致使湖泊面积、数量增加;此外,气候变暖的背景下,区域AET耗散增加,影响到湿地水文过程,也是各类湿地面积发生变化的重要原因。天然状态下,草甸湿地、沼泽湿地存续主要受地形和水文条件控制,因地形在较长时段内保持相对静态,因此,湿地景观动态受气温、降水等关键气候因子影响更为显著。以流域为单元进行空间统计,黑河流域多年平均降水量小于白河流域,气温则正好相反。2000—2018年,黑河流域最小降水量发生于2008年(498.31 mm),最大降水量发生在2018年(831.88 mm);最低气温出现在2000年(1.13℃),最高气温出现在2010年(2.67℃);湿地总面积在2001年最小(3021.20 km²),2010年最大(3263.67 km²)。白河流域最小降水量发生在2002年(531.54 mm),最大降水量发生在2018年(964.06 mm);最低气温发生在2000年(0.66℃),最高气温出现在2017年(2.40℃);湿地总面积在2003年最小(799.66 km²),2012年最大(890.26 km²)。由图5、6可见,2000—2018年,两河流域气温、降水量和各类湿地总面积呈趋同增长(图中趋势线上数字表示年际变幅),但从各因子极值发生年份来看,气温、降水量和湿地面积变化并不严格对应,如2018年两河流域降水量均达

到最高值,但湿地面积并未出现最大值。初步理解,更小时间尺度(如次、旬、月、季等)的气候因子动态以及人类活动对湿地水文过程的影响等起着重要调节作用,本研究暂不涉及。

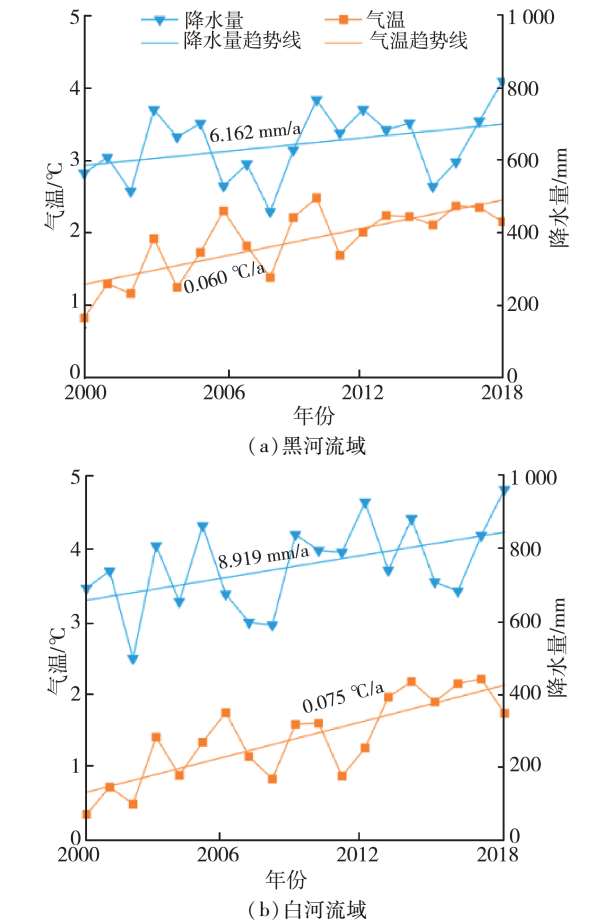


图5 2000—2018年两河流域气温和降水变化趋势
Fig.5 Variation trend of temperature and precipitation in two basins from 2000 to 2018

3.3.2 驱动因素分析

气温、降水量是影响黑河、白河流域湿地动态的主要气候因素。以总人口、国民生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值、肉类总产量等作为社会经济因素,对上述各类数据进行标准化处理后进行主

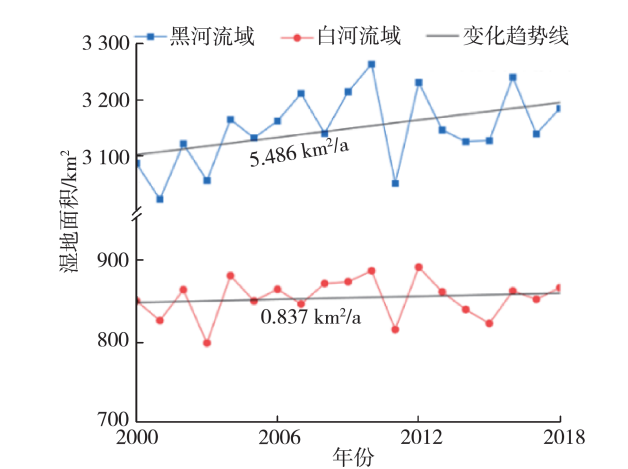


图6 2000—2018年两河流域湿地总面积变化趋势
Fig.6 Variation trend of total wetland area in two basins from 2000 to 2018

成分分析,结果见表4。黑河流域的3个主成分,其序列计算特征值分别为6.765、1.194和0.922,主成分累计贡献率为89%;白河流域的3个主成分,其序列计算特征值分别为7.042、0.983和0.882,主成分累计贡献率为89%。由表4可见,荷载系数越大,驱动因素对该类主成分的影响越大,进而对该类主成分所驱动湿地变化的贡献越大。黑河流域湿地变化的驱动力因素的主成分1由总人口、农林牧渔业从业人口、生产总值和第一产业增加值为主的社会经济因子构成;主成分2由肉类总产量和乡村人口等农牧业因子构成;主成分3主要是以降水量为主的气象因子构成。白河流域湿地变化的驱动力因素的主成分1由生产总值、第一产业增加值、第二产业增加值为主的社会经济因子构成;主成分2是以油料产量为主的农牧因子构成;主成分3是由降水量为主的气象因子构成。黑河与白河流域湿地变化驱动因子的主成分1均是由生产总值和第一产业增加值等社会经济因子为主,表明当地社会、经济 and 农业的发展总体上影响和控制着两河流域湿地变化的方向。

表4 主成分分析结果
Table 4 Principal component analysis results

驱动因素	黑河流域主成分荷载系数			白河流域主成分荷载系数		
	主成分1	主成分2	主成分3	主成分1	主成分2	主成分3
总人口	0.94	0.09	-0.04	0.90	0.23	-0.12
乡村人口	0.69	0.53	-0.04	0.92	0.21	-0.15
农林牧渔从业人口	0.97	-0.18	-0.04	0.93	-0.15	0.00
生产总值	0.94	-0.31	0.04	0.98	0.14	-0.10
第一产业增加值	0.95	-0.28	-0.01	0.98	0.11	-0.04
第二产业增加值	0.89	-0.39	0.14	0.96	0.18	-0.20
肉类总产量	0.59	0.65	-0.26	0.68	-0.05	0.58
油料产量	0.80	-0.07	-0.42	-0.50	0.84	0.08
降水量	0.46	0.26	0.80	0.57	0.03	0.64
气温	0.83	0.22	0.09	0.82	-0.31	-0.19

4 讨 论

黑河、白河流域地处若尔盖高原,是以藏族为主的少数民族聚集区,其特殊的地理位置、气候条件和水文、生态特性决定了当地的支柱产业为畜牧业。社会经济发展过程中,过牧等因素导致草甸、湿地生态系统退化;此外,两河流域湿地内分布着数量众多的与天然水系连通的人工开挖渠道,湿地地表水和地下水的补、径、排条件发生改变,区域输水能力和沟渠冲刷增强,引起地下水位下降、沼泽土质硬化、湿地植被退化等不良后果。两河流域是黄河上游重要的生态屏障区和水源涵养区,有必要加大湿地区水文生态保护力度,将人类活动对湿地生态系统的影响控制在合理范围,通过地方社会经济发展与湿地生态系统健康之间平衡体系的构建,实现生态环境和社会经济的可持续发展。

已有研究表明,湿地变化是社会经济因素和自然因素共同作用的结果,其影响因子包括国内生产总值、总人口、政策因素、城市扩张、降水量和温度等^[28-31],两河流域湿地变化的驱动机制具有“社会经济+农牧业因素+气候变化”交互作用的特征。李娜娜等^[17]对四川省湿地类型变化驱动力进行了分析,李志威等^[18]若尔盖沼泽湿地萎缩机制进行了研究,何菊红^[32]对若尔盖湿地与气候变化及人类活动进行了研究,这些研究中得到的结论与本研究基本一致。

黑河、白河流域相对丰沛的降水和山间宽阔平缓谷地共同促成湿地发育,流域降水是该区湿地形成发育的水文基础^[33];社会经济发展因素,如开沟排水、泥炭开采、旅游业和畜牧业发展等导致湿地和河网沟渠间水力传输条件发生改变,重塑了湿地面域-线状连贯通穿格局,极大地改变了湿地汇、蓄、排泄过程,湿地地表-地下系统的水分补给、径流和排泄过程变异,湿地景观形塑格局由此奠定并长期受到影响;农牧业因素,如草场分布、饲草种植、围栏放牧等会影响区域蒸散发和地表产汇流过程,也对湿地变化产生影响。黑河流域湿地面积占比大,降水相对较少,沼泽湿地分布相对分散;研究期间,草甸湿地增加、沼泽湿地减少,或与社会经济及农牧业因素促发沼泽湿地疏干进程加剧(并演化为草甸湿地)有关。白河流域变化趋势相反,该区降水较丰沛,流域面积、沼泽湿地面积、最大斑块指数和密度值与黑河流域相比较小,社会经济因素驱动下,沟渠系统向沼泽湿地输水,或使其外围及地势低洼处明水面积增加,沼泽湿地面积增加,相应地,草甸湿地面积减少。两河流域湖泊呈增加趋势,与当地湖库

保护及建设有一定关系^[34]。需要说明的是,主成分分析结果表明 2000—2018 年两河流域湿地变化具有“社会经济+农牧业因素+气候变化”交互作用的特征,并不意味着气候要素效应,如升温促增蒸散发、降水的湿地水分供应等不重要,只是说明高寒地区气温和降水变化对湿地的影响,比之人口和经济体量增加的区域环境效用,其显示度较低。

两河流域湿地变化的时空异质性很强,不同时空尺度主要影响因素及驱动机制也有所不同,研究时段、因子选取以及分析方法显得尤为关键^[35-38]。2000—2018 年,两河流域湿地变化系由社会经济驱动因素主导,但气候变化的影响仍不容忽视。有研究发现,除了国内生产总值等社会经济因素为高寒区湿地变化的主要驱动因素外,增温背景下沼泽湿地转化为草甸湿地或非湿地的可能性也较为显著^[39-44]。后续研究将在本研究的基础上,通过完善气温、本地降水、上游来水和湿地出水等与湿地面积之间的多元回归统计关系,进一步分析气候变化和人类活动对湿地变化的影响,厘清湿地变化与气候环境、社会经济各因子之间的数量关系。

5 结 论

a. 2000—2018 年,黑河流域草甸湿地面积增加,沼泽湿地面积减少,白河流域湿地变化呈相反态势;两河流域草甸湿地和沼泽湿地存在此消彼长的特征,湿地总面积增加。

b. 景观指数分析表明,黑河流域草甸湿地和沼泽湿地的破碎化程度均有所降低,白河流域则相反;研究期间两河流域的湖泊面积和数量均增加。

c. 两河流域湿地变化具有“社会经济+农牧业因素+气候变化”交互作用的特点,年代际尺度社会经济和农牧业因素对高寒草甸及沼泽湿地变化的影响更具显示度。

参考文献:

- [1] 白军红, 欧阳华, 杨志锋, 等. 湿地景观格局变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 36-45. (BAI Junhong, OUYANG Hua, YANG Zhifeng, et al. Changes in wetland landscape patterns: a review[J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 36-45. (in Chinese))
- [2] WEI X D, WANG S N, WANG Y K. Spatial and temporal change of fractional vegetation cover in North-western China from 2000 to 2010[J]. Geological Journal, 2018, 53(52): 427-434.
- [3] 苏晓虹, 毛旭锋, 魏晓燕, 等. 基于生物-环境-服务功能模型的三江源高寒草甸湿地不同恢复措施效果评价

- [J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1377-1384. (SU Xiaoxia, MAO Xufeng, WEI Xiaoyan, et al. A biology-environment-service model based evaluation of three restoration measures of alpine meadow wetlands in the Sanjiangyuan Region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1377-1384. (in Chinese))
- [4] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 7-11. (CHEN Yiyu, LYU Xianguo. The wetland function and research tendency of wetland science[J]. Wetland Science, 2003, 1(1): 7-11. (in Chinese))
- [5] 汪爱华, 张树清, 张柏. 三江平原沼泽湿地景观空间格局变化[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 237-243. (WANG Aihua, ZHANG Shuqing, ZHANG Bai. A study on the change of spatial pattern of wetland in the Sanjiang Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 237-243. (in Chinese))
- [6] 刘红玉, 张世奎, 吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 698-705. (LIU Hongyu, ZHANG Shikui, LYU Xianguo. Processes of wetland landscape changes in Naoli River Basin since 1980s[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(6): 698-705. (in Chinese))
- [7] DANIEL M D, ROBERT J B, GAIL M A. Wetland diagenesis and traces of early hominids, Olduvai Gorge, Tanzania[J]. Quaternary Research, 2002, 57(2): 271-281.
- [8] 丁圣彦, 梁国付. 近 20 年来河南沿黄湿地景观格局演化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 653-661. (DING Shengyan, LIANG Fuguo. Landscape pattern change of regional wetland along the Yellow River in Henan Province in the last two decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 653-661. (in Chinese))
- [9] LYLE M V, DAVID A E, KIRK J H. A geomorphological model of intertidal cove marshes with application to wetlands management[J]. Ecological Engineering, 2003, 19(5): 339-347.
- [10] WANG Xuelei, NING Longmei, YU Jing, et al. Changes of urban wetland landscape pattern and impacts of urbanization on wetland in Wuhan City[J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(1): 47-53.
- [11] 神祥金, 张佳琦, 吕宪国. 青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6259-6268. (SHEN Xiangjin, ZHANG Jiaqi, LYU Xianguo. Spatio-temporal change of marshes NDVI and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6259-6268. (in Chinese))
- [12] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige wetland basin and its response to climate change[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))
- [13] 李苑菱, 黄丽俐, 陈毅青, 等. 海口市湿地生态功能价值评估及其对气候变化的响应分析[J]. 热带林业, 2020, 48(2): 32-37. (LI Yuanling, HUANG Lili, CHEN Yiqing, et al. Evaluation of ecological function value of urban wetland in Haikou City and its response to climate change[J]. Tropical Forestry, 2020, 48(2): 32-37. (in Chinese))
- [14] 白军红, 欧阳华, 徐惠风, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 1-9. (BAI Junhong, OUYANG Hua, XU Huifeng, et al. Advances in studies of wetlands in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Progress in Geography, 2004, 23(4): 1-9. (in Chinese))
- [15] 赵志龙, 张懿锂, 刘林山, 等. 青藏高原湿地研究进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1218-1230. (ZHAO Zhilong, ZHANG Yili, LIU Linshan, et al. Advances in research on wetlands of the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1218-1230. (in Chinese))
- [16] NIU Z, ZHANG H, GONG P. More protection for China's wetlands[J]. Nature, 2011, 471(7338): 305.
- [17] 李娜娜, 高飞, 魏圣钊, 等. 四川省湿地类型变化的自然-社会经济驱动力分析[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 1-11. (LI Nana, GAO Fei, WEI Shengzhao, et al. Nature and social economy driving forces of wetland types changes in Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 1-11. (in Chinese))
- [18] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 172-180. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, ZHANG Chengdi, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruorgai swamp[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 172-180. (in Chinese))
- [19] 邢伟, 鲍崑山, 韩冬雪, 等. 全新世以来东北地区沼泽湿地发育过程及其对气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1391-1402. (XING Wei, BAO Kunshan, HAN Dongxue, et al. Holocene wetland developing history and its response to climate change in northeast China[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1391-1402. (in Chinese))
- [20] 罗磊. 青藏高原湿地退化的气候背景分析[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 190-199. (LUO Lei. Analysis of climatic background of wetlands degradation in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Wetland Science, 2005, 3(3): 190-199. (in Chinese))
- [21] ZHANG Wenjiang, YI Yonghong, SONG Kechao, et al. Hydrological response of Alpine wetlands to climate warming in the eastern Tibetan plateau[J]. Remote

- Sensing, 2016, 8(4): 336.
- [22] SHUANG Xiang, GUO Ruqing, NING Wu, et al. Current status and future prospects of Zoige Marsh in Eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 553-562.
- [23] 戴洋, 罗勇, 王长科, 等. 1961—2008 年若尔盖高原湿地的气候变化和突变分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 35-42. (DAI Yang, LUO Yong, WANG Changke, et al. Climate variation and abrupt change in wetland of Zoige Plateau during 1961-2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 35-42. (in Chinese))
- [24] 李晋昌, 王文丽, 胡光印, 等. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3451-3459. (LI Jingchang, WANG Wenli, HU Guangyin, et al. Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3451-3459. (in Chinese))
- [25] 闵泓翔. 若尔盖高原湿地退化现状、成因及恢复对策研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [26] 张媛. 黑白河流域下垫面变化及其水源涵养功能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [27] 邹文涛, 张怀清, 鞠洪波, 等. 基于决策树的高寒湿地类型遥感分类方法研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(4): 464-469. (ZOU Wentao, ZHANG Huaiqing, JU Hongbo, et al. Study on highland wetlands remote sensing classification based on decision tree algorithm[J]. Forest Research, 2011, 24(4): 464-469. (in Chinese))
- [28] 徐晓龙, 王新军, 朱新萍, 等. 1996—2015 年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1897-1911. (XU Xiaolong, WANG Xinjun, ZHU Xinping, et al. Landscape pattern changes in Alpine Wetland of Bayanbulak Swan Lake during 1996-2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(11): 1897-1911. (in Chinese))
- [29] 刘吉平, 高佳, 董春月. 1954—2015 年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4821-4831. (LIU Jiping, GAO Jia, DONG Chunyue, et al. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang Plain from 1954 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4821-4831. (in Chinese))
- [30] 孔令桥, 张路, 郑华, 等. 长江流域生态系统格局演变及驱动力[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749. (KONG Lingqiao, ZHANG Lu, ZHENG Hua, et al. Driving forces behind ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 741-749. (in Chinese))
- [31] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 近 30 年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503. (LYU Jinxia, JIANG Weiguo, WANG Wenjie, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing - Tianjin - Hebei region in recent 30 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4492-4503. (in Chinese))
- [32] 何菊红. 2000-2014 年若尔盖湿地变化监测及驱动因子分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [33] 李常斌, 杨林山, 杨文瑾, 等. 洮河土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 848-855. (LI Changbin, YANG Linshan, YANG Wenjin, et al. Land use and land cover change in Taohe River Basin and its driving forces [J]. Science Geographica Sinica, 2014, 34(7): 848-855. (in Chinese))
- [34] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 等. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2245-2252. (BAI Junhong, OUYANG Hua, CUI Baoshan, et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoige Plateau in the past four decades [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2245-2252. (in Chinese))
- [35] 满苏尔·沙比提, 王雯静. 新疆湿地资源时空变化特征及其保护[J]. 水资源保护, 2007, 23(6): 84-88. (SABIT Mansur, WANG Wenjing. Spatial-temporal variation and protection of wetland resources in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(6): 84-88. (in Chinese))
- [36] 王春燕, 王刘明, 张媛, 等. 基于 SEaTH 的决策树方法在区域尺度土地覆被分类中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 11-18. (WANG Chunyan, WANG Liuming, ZHANG Yuan, et al. Application of SEaTH algorithms-based decision trees in regional land cover classification[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2019, 55(1): 11-18. (in Chinese))
- [37] 玉苏普江·艾麦提, 阿里木江·卡斯木, 阿布都沙拉木·热合曼. 基于 RS 和 GIS 的艾比湖湿地信息提取及面积动态分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 57-61. (AMAT Yusupjan, KASIMU Alimujiang, RAHMAN Abdusalam. Information extraction and dynamic area change in Ebinur Lake Wetland based on RS and GIS [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 57-61. (in Chinese))
- [38] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进步, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))