

DOI: 10.5846/stxb201401260196

杜际增, 王根绪, 杨燕, 张涛, 毛天旭. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因分析. 生态学报, 2015, 35(18): - .

Du J Z, Wang G X, Yang Y, Zhang T, Mao T X. Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River source regions wetland. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因分析

杜际增^{1,2}, 王根绪^{1,*}, 杨 燕¹, 张 涛¹, 毛天旭¹

1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地环境演变与调控重点实验室, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:通过整理解译 1969 年航片、1986 年、2000 年、2007 年以及 2013 年 TM (Thematic Mapper) 影像数据, 对长江黄河源区的高寒湿地分布的时空变化特征进行分析, 并结合气象观测数据和人类活动状况, 运用主成分分析和灰色关联度法定量分析造成高寒湿地退化的气候因素和人为因素的贡献, 并揭示了高寒湿地退化与各环境因子之间的关联性。结果表明: 1969 年—2013 年间, 江河源区的高寒湿地面积减少了 19.16%, 各湿地类型的斑块分离度不断增大; 空间上, 高寒湿地的退化区主要分布在长江源区的东北部以及黄河源区的北部地区, 与该区域冻土的退化有显著的一致性; 1969 年以来, 江河源区的气候呈气温显著上升、相对湿度降低以及降水量微弱增加的暖干化趋势, 湿地的退化与气候变化在时间上有明显的同步性, 其中气温升高是形成湿地退化格局的主要原因, 降水量和相对湿度的变化会对湿地的变化产生重要影响, 尤其是对河流和湖泊的影响更为显著; 此外, 载畜量的变化是影响湿地变化最重要的人为因素。

关键词:江河源区; 高寒湿地; 时空变化; 驱动因素

Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River source regions wetland

DU Jizeng^{1,2}, WANG Genxu^{1,*}, YANG Yan¹, ZHANG Tao^{1,2}, MAO Tianxu^{1,2}

1 The Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Yangtze River and Yellow River source regions are part of the highest and largest distribution area of wetlands in the world and play a key role in sustaining the ecosystem balance in this region. Current global changes, such as climate change and human activity, are significantly affecting the landscape pattern of these wetlands. These changes have had a major effect on the water cycle and ecosystem balance in this region and have attracted widespread attention. In order to clarify the characteristics of these changes, this research examines the temporal and spatial variation of the distributive patterns of the alpine wetlands in the Yangtze River and Yellow River source regions. The analysis was conducted by using aerial photographs taken in 1969 and Thematic Mapper remote sensing data obtained in 1986, 2000, 2007, and 2013. Additionally, a principal component analysis model and the gray correlation method were carried out using meteorological and human activity data to quantitatively analyze the contribution rates of climate and human factors to alpine wetland degradation. The relationship between alpine wetland degradation and environmental factors was determined. The results show that areas of alpine wetlands in the Yangtze River and Yellow River source regions have decreased by 19.16% from

基金项目:国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2013CBA01807); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(40925002); 自然科学基金面上项目(41271224)

收稿日期: 2014-01-26; 网络出版日期: 2014-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanggx@imde.ac.cn

1969 to 2013. However, the degradation rate of alpine wetlands has gradually decreased since 2000 in this region. Even the total lake area has rebounded from a previous decline and has been increasing since 2007. The spatial separation patch between each kind of alpine wetland increased. There were obvious differences in how the landscapes have changed in each source zone. In the Yangtze River's source region, the landscape change was mainly due to the disappearance of a small patch of wetlands from 1969 to 2007 and fragmentation of the large patch of wetlands since 2007. In the Yellow River's source region, however, the landscape change was mainly due to fragmentation throughout the entire study period. The degradation of alpine wetlands has mainly occurred in the northeastern Yangtze River source region and the northern Yellow River source region, which is consistent with permafrost degradation in this region. The climate in this region has been warming and drying with a significant increase in air temperature, decrease in the relative humidity, and slight increase in precipitation since 1969. There is obvious synchronization between alpine wetland degradation and climate change. Thus, the large increase in air temperature is considered the main contributor to alpine wetland degradation, while the rainfall and relative humidity changes have affected the wetland variation, particularly in the cases of rivers and lakes. The increase in livestock is the most important human factor in alpine wetland degradation. There are still some deficiencies in our research. First, the limited remote sensing data might not capture the inter-annual variability of the rivers, leading to large errors in estimation of river area variation. Secondly, the research reveals only the correlation between the change of wetlands and the various environmental factors by statistical methods, rather than clarifying the driving mechanisms behind them. Thus, future research should attempt to reduce the amount of error by accumulating more remote sensing data and focus on the driving mechanisms of various environmental factors on alpine wetland changes by using a community land model.

Key Words: the Yangtze River and Yellow River source regions; alpine wetland; temporal and spatial variation; driving factors

湿地是介于陆地和水体之间的特殊类型的生态系统,兼有两者属性,并且发挥着独特的生态功能^[1]。湿地与陆面水文过程联系密切,具有调蓄水资源和涵养水源的重要作用^[2];另外,湿地的生物多样性十分丰富,是地球上生产力最高、生态系统服务价值最大的生态系统^[3]。在陆地生态系统中,湿地生态系统对气候变化的响应最敏感^[4-6],因此在全球变化的背景下,全球范围内湿地生态系统都在加速退化。尤其是冻土区湿地生态系统的变化,会直接改变区域土壤的水热性质,从而影响土壤水分和 CO₂ 的流通,进一步对整个区域的生态系统产生深远影响^[7-8]。

江河源区是长江和黄河的发源地,也是世界上海拔最高的、面积最广的高寒沼泽湿地的集中分布区^[9],高寒湿地对江河源区的水循环与流域水文过程有重要影响,高寒湿地格局和分布的变化对江河源区生态环境和水安全有着重要意义^[10]。另外,湿地和冻土存在显著的共生关系^[11],因此江河源区高寒湿地发展变化与冻土环境演变关系密切,因此对全球气候变化高度敏感。已有研究发现,上世纪 80 年代中后期到本世纪初,江河源区的湿地的面积出现大幅度萎缩,景观结构出现明显退化,并且导致江河源区水源涵养和水资源调蓄能力显著下降^[10-12];虽然对江河源区湿地的变化及其驱动因素有了很多研究,但是时间尺度都比较短,分类方法简单,难以说明江河源区湿地长期的变化规律及其与全球变化的关系;而且鲜有研究从湿地的时空变化特征角度去分析探讨气候变化对高寒湿地的影响机制。

本文参照《湿地公约》和《全国湿地资源调查与监测技术规程》中湿地的划分标准,根据野外实地考察江河源区所获得的样点数据以及已有的研究成果^[10-14],将江河源区的湿地划分为:典型沼泽草甸、高寒泥炭沼泽、河流湿地以及湖泊湿地四种类型。此外,根据 O'Connell 对湿地退化标准的研究^[15],结合江河源区湿地的演变特征以及遥感观测的识别能力,本文将江河源区湿地退化类型分为面积减少、干旱化以及破碎化 3 种。然后利用长时间尺度航测和卫星遥感数据,结合地面调查,对江河源区高寒湿地的演变进行了系统分析,并从景观尺度对江河源区高寒湿地的动态变化进行分析,探究江河源区湿地在近 45 年的变化规律及其与气候变

化和人为因素的关系,并讨论分析各环境因子驱动江河源区湿地变化的机制。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

本文的研究区是长江源区和黄河源区,见图 1,长江源区选择以直门达水文站为界,大致位于 $90^{\circ}43'—96^{\circ}45'E, 32^{\circ}30'—35^{\circ}35'N$ 之间,流域控制面积约 13.78 万 km^2 。黄河源区以达日县吉迈水文站为界,大致位于 $96^{\circ}00'—99^{\circ}45'E, 33^{\circ}00'—35^{\circ}35'N$ 之间,面积约 6.48 万 km^2 。地貌上以高原丘陵为主,河网发育,俗称江河源区。研究区段的自然生态系统主要有高寒草原生态系统、高寒草甸生态系统、高寒沼泽湿地生态系统三大类型,局部在一些河谷地带分布稀疏的水柏枝 (*Myricaria bracteata*) 和毛枝山居柳 (*Salix cupularis*) 等高寒灌丛,在高大山体上部分布垫状与稀疏流石坡植被,另外在黄河源区东南端,有有林地、疏林地和少量灌木林地构成的森林生态系统面积很小,仅占江河源区土地面积的 0.01%,长江黄河源区在气候上处于高寒半干旱与半湿润过渡带,年均气温为 $-1.3—5.5^{\circ}C$,年均降水量为 270—540 mm^[13]。

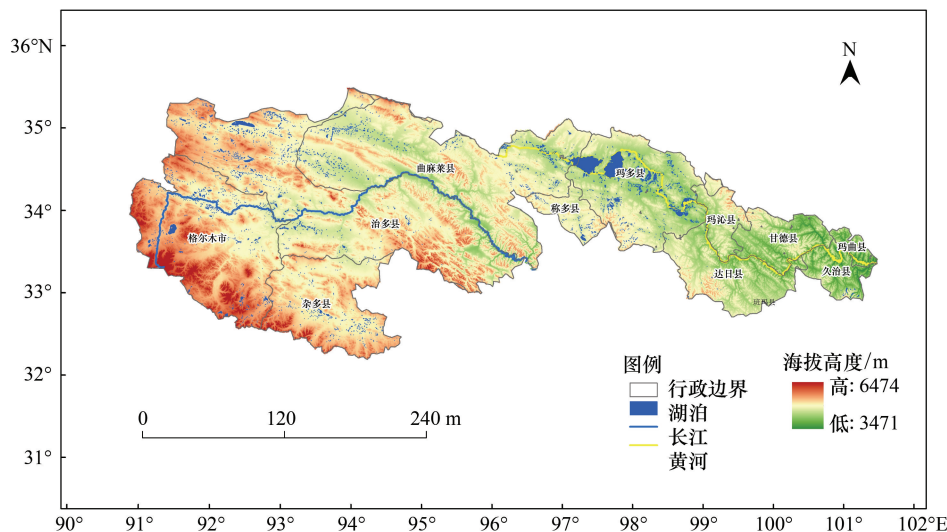


图 1 研究区概况

Fig.1 The Sketch map of Yangtze River's Source Regions and Yellow River's Source Regions

1.2 数据与研究方法

本文收集 1969 年航片数据和 1986 年、2000 年、2007 年以及 2013 年的 TM 数据,共五期的 6—9 月份生长季的影像数据,然后对影像进行统一的辐射校正和几何精纠正,并采用 UTM 地理坐标进行影像校正和利用地形图 (1:100000) 进行校正。通过野外实地考察考察,建立以高寒湿地生态系统为核心的 12 大类 23 个亚类的遥感解译标志库 (见表 1),采用目视解译并结合模糊分类模型^[14],对影像进行分类 (如图 2),得到江河源区各时期的土地覆被类型图,然后对比分析高寒湿地在各个时期的分布变化。

本文还采用破碎度 C_{ki} 与斑块分离度 S_{ki} 来衡量江河源区高寒草地和高寒湿地在景观尺度上的变化:

$$C_{ki} = n_{ki} / LU_{ki} \quad (1)$$

$$S_{ki} = (0.5 \sqrt{\frac{n_{ki}}{LU_{ki}}}) / (LU_{ki} / LU_k) \quad (2)$$

式中, C_{ki} 和 S_{ki} 是 k 分区中第 i 类土地的破碎度和斑块分离度, n_{ki} 是对应的斑块数目; LU_{ki} , LU_k 分别是第 k 分区第 i 种土地类型的面积和总面积^[16]。本文中, k 分长江源区和黄河源区, i 分湖泊和沼泽两大类。

表 1 长江黄河源区土地覆盖类型对照表

Table 1 Lookup Table of Land Cover Types of Source Regions of Yangtze River and Yellow River

代号 Mark	名称 Name	子集与编码 Subset and Code
RA	居民区	包括城市居民地(510),农村居民地(520)
HA	人类活动区	耕地(120),人工草地(300)
H-AM	高覆盖高寒草甸	覆盖度>70%(312)
M-AM	中覆盖高寒草甸	50%<覆盖度<70%(322)
L-AM	低覆盖高寒草甸	覆盖度<50%(332)
H-AS	高覆盖高寒草原	覆盖度>50%(311)
M-AS	中覆盖高寒草原	30%<覆盖度<50%(321)
L-AS	低覆盖高寒草原	覆盖度<30%(331)
WL	湿地	包括河流(410)、湖泊(420)、高寒泥潭沼泽(641)以及沼泽草甸(640)
BL	裸地	包括沙地(610)、盐碱地(630)、滩地(460)、裸土地(620)以及裸岩(660)
G&S	冰川	冰川和永久性积雪(810)
WD	林地	包括乔木林(230),灌木林(220),疏林地(210)

RA: Residential Area, HA: Human activity Area, H-AM: High-cover Alpine Meadow, M-AM: Mid-cover Alpine Meadow, L-AM: Low-cover Alpine Meadow, H-AS: High-cover Alpine Steppe, M-AS: Mid-cover Alpine Steppe, L-AS: Low-cover Alpine Steppe, WL: Wetland, BL: Bare Land, G&S: Glacier and Snow, WD: Woodland

2 江河源区湿地的分布变化的时空特征

2.1 江河源区高寒湿地变化的时间特征

通过对江河源区各时期高寒湿地面积对比分析可知,从 1969 年至 2013 年间,江河源区湿地的面积发生了显著的变化,其中典型沼泽草甸和高寒泥炭沼泽的退化最为明显,长江源区典型沼泽草甸的面积减少了 1980.06 km²,占原有面积的 29.27%,高寒泥炭沼泽面积减少了 241.48 km²,占原有面积的 45.18%;黄河源区的典型沼泽草甸减少了 619.30 km²,占原有面积的 29.70%,高寒泥炭沼泽面积减少了 213.25 km²,占原有面积的 54.39%。长江源区的河流面积和湖泊面积略有减少,其中河流面积减少了 140.12 km²,占原有面积的 3.24%,湖泊面积减少了 36.3 km²,占原有面积的 3.34%。黄河源区河流面积的下降比较明显,总面积减少了 340.05 km²,占原有面积的 17.77%;湖泊的面积经历了逐渐减少到突然增加的过程,总面积仅少了 5.49 km²,占原有面积的 0.35%。

江河源区的湿地在各个时期的年均变化速率存在明显的不同,从图 3 可以看出,各类型的湿地面积基本上都在减少,而减少速率在各个时期的变化有明显差别。沼泽草甸的减少速率的年度变化经历了一个明显的先迅速增大后逐渐下降的过程,高寒泥炭沼泽的减少速率在第二时期迅速增大后,在第三时期也出现了回落,但是在第四个时期,长江源区和黄河源区高寒泥炭沼泽的减少速率变化趋势出现了不同,长江源区的高寒泥炭沼泽的减少显著加快,而黄河源区的高寒泥炭沼泽的减少速率则出现了大幅度的下降。河流的减少速率在前三个时期在逐渐增大,而在第四个时期,减少速率出现回落。湖泊的减少速率在第一时期到第二时期出现大幅度增长,在第三时期又出现大幅回落,在第四时期则出现面积大幅度增长的现象,也是这一时期湿地中唯一出现面积回升的湿地类型。

2.2 江河源区高寒湿地景观尺度的变化

由于河流在景观尺度上属于廊道,统计其空间破碎度和空间分离度没有实际意义,本文将典型沼泽草甸

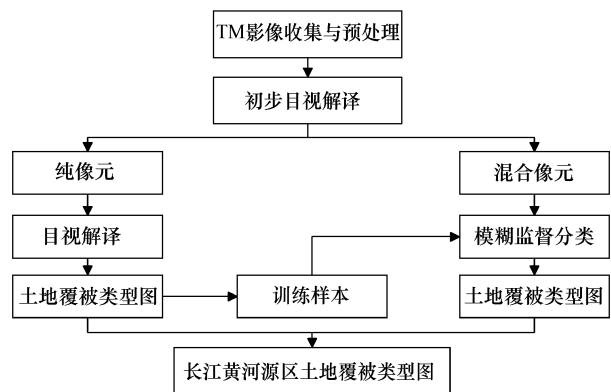


图 2 TM 影像解译分类流程图

Fig.2 Flow chart for Interpretation of TM images

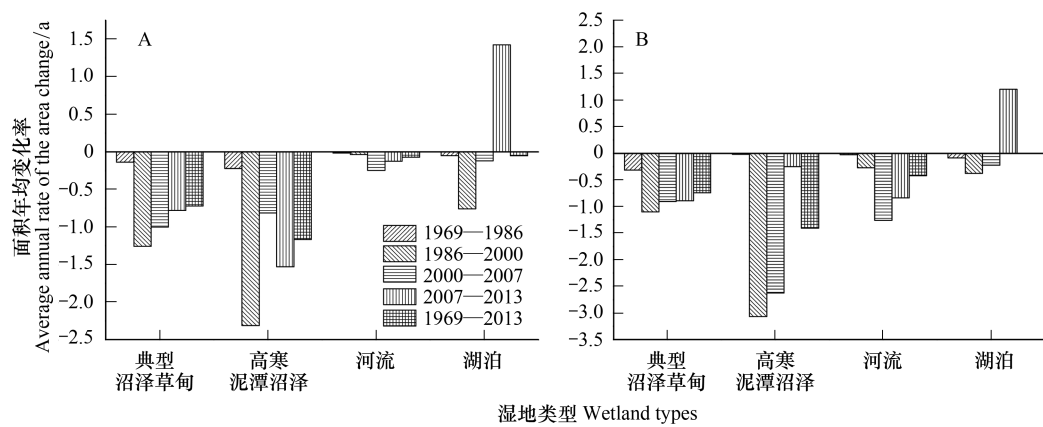


图 3 长江 (A) 与黄河 (B) 源区各时期、各典型高寒湿地的面积年均变化率

Fig.3 Average annual change rate of typical alpine wetlands area in the source region of Yangtze River (A) and Yellow River (B)

和高寒泥炭沼泽并为沼泽一类,统计分析沼泽和湖泊的景观指数变化,从表 2 可以看出,长江源区沼泽的空间分离度在前三个时期一直处于下降趋势,表明该时期沼泽的退化形式以大量分散的小斑块消失为主,在第四个时期沼泽的空间分离度和空间破碎度增加,表明该时期沼泽的退化形式转变为大斑块的破碎化;湖泊的分离度也是在前三个时期连续下降,表明这一时期大量分散的小湖泊干涸消失,第四个时期湖泊的空间分离度和空间破碎度转为增加,表明该时期小湖泊又大量出现。黄河源区沼泽湿地的空间破碎度和空间分离度一直处于上升状态,表明该区域沼泽的大斑块退化破碎成许多小斑块;湖泊的空间分离度和空间破碎度的变化和长江源区类似,区域内的小湖泊经历了大量消失后大量产生的过程。

表 2 江河源区高寒湿地生态系统空间分布格局变化					
Table 2 Spatial pattern changes Index of alpine wetland ecosystem in Yangtze River's Source Regions and Yellow River's Regions					
景观指数 Landscape index	时间 Time	长江 Yangtze River		黄河 Yellow River	
		沼泽 Swamp	湖泊 Lake	沼泽 Swamp	湖泊 Lake
破碎度 Fragmentation	1969	0.15	1.89	0.86	0.52
	1986	0.15	1.91	0.87	0.52
	2000	0.11	1.76	0.94	0.32
	2007	0.10	1.72	0.97	0.31
	2013	0.11	1.90		0.49
分离度 Spearation	1969	0.25	2.35	0.72	0.7
	1986	0.25	2.37	0.72	0.71
	2000	0.23	2.18	0.76	0.54
	2007	0.22	2.17	0.77	0.52
	2013	0.23	2.34	0.77	0.68

2.3 江河源区高寒湿地分布变化的空间特征

从图 4 可以看出,江河源区湿地的退化区比较分散,长江源区的湿地退化较为明显的区域主要分布在治多县的东南部、曲麻莱县的西北部以及格尔木市和杂多县南部的部分地区;黄河源区的湿地退化主要分布在两个区域,一个是玛多县北部的两湖地区,另一个是黄河源区西部的久治县、玛曲县以及甘德县的东部地区。高寒湿地转好或出现新增湿地的区域主要分布在长江源区的西部和北部地区,即格尔木市的西北部地区和曲麻莱县的中北部地区,黄河源区并没有明显的湿地转好区和新增湿地区,只是在中北部地区,即玛多县南部和达日县西北部有零星的区域出现湿地转好或新增湿地。

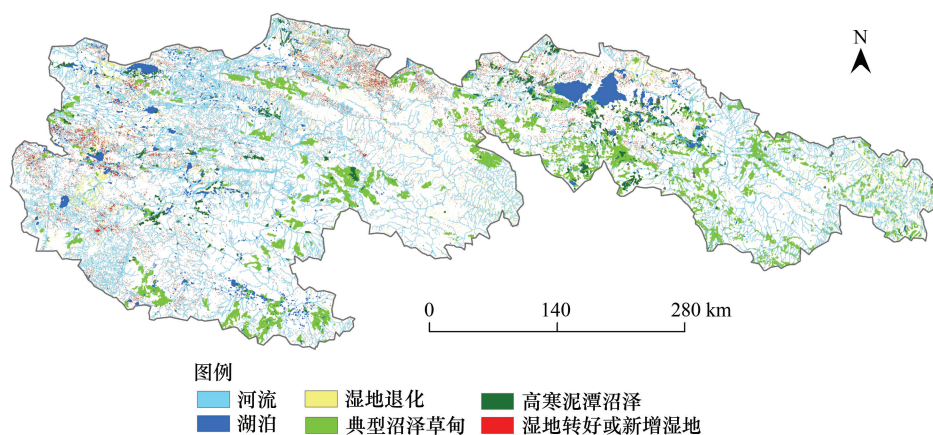


图 4 1969 年—2013 年江河源区湿地退化空间分布图

Fig.4 Spatial pattern of the wetland degradation from 1969 to 2013 in Yangtze River's Source Regions and Yellow River's Source Regions

3 江河源区湿地变化驱动因子分析

3.1 江河源区气候变化趋势

本文采用江河源区以及周边较近的托托河、曲麻莱、达日、清水河等 16 个气象站点的气象数据,按照泰森多边形法对江河源区的气象数据进行插值,根据每个气象站点的控制面积进行加权整合,然后分别对长江源区和黄河源区的总的年平均气温和年降水量进行分析,并通过 Mann-Kendall 法对这些气候指标的多年变化趋势进行检验。

1969 年—2013 年间,江河源区的气温整体上呈显著的上升趋势(见图 5),长江源区的年平均气温增长速

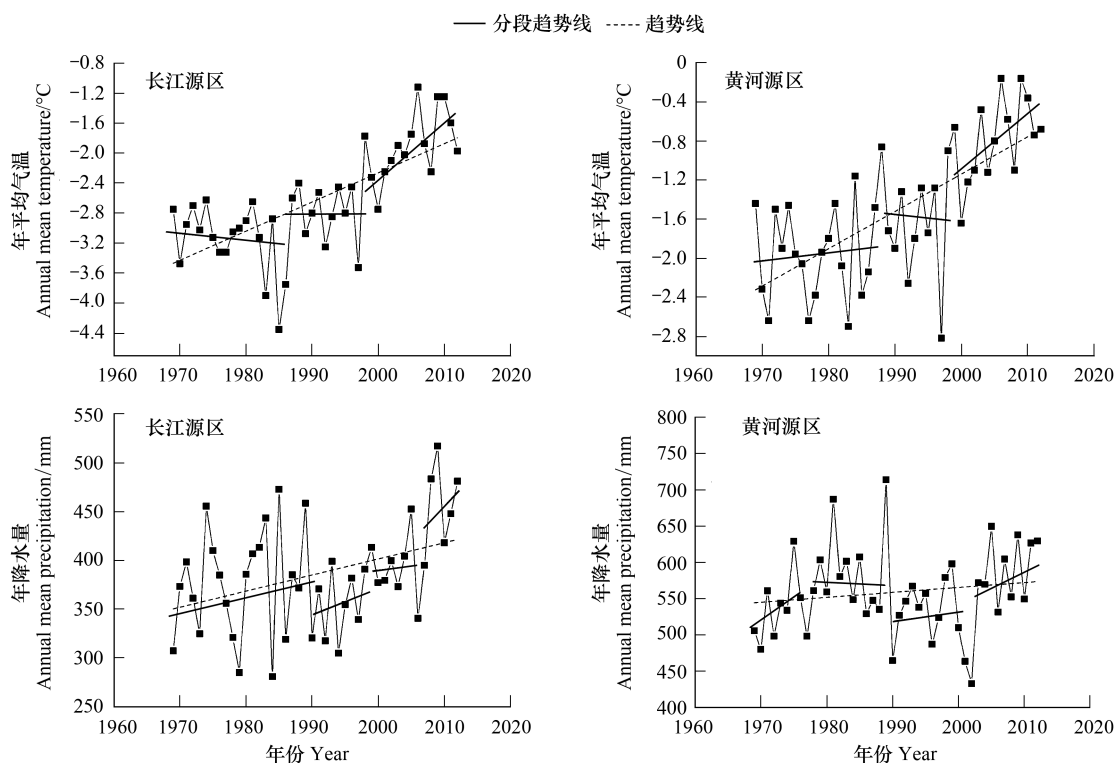


图 5 江河源区的年平均气温和年降水量的变化

Fig.5 Changes in mean annual temperature and annual precipitation in the Source of the Yangtze (a) and Yellow (b) Rivers

率为 0.41 ℃/10a,黄河源区的气温增长速率为 0.37 ℃/10a,气温的上升趋势都通过了 99%水平的置信度检验。长江源区和黄河源区年降水量的变化出现了明显差异,长江源区的降水量呈显著的增加趋势,年降水量的平均增长速率为 17.51 mm/10a,并通过了 95%的置信度检验,而黄河源区的年降水量并没有呈现明显的变化趋势。江河源区的气候变化还呈明显的阶段性特征,结合江河源区湿地的退化速率的变化可以看出,江河源区湿地退化速率较快的时期往往气温较高而降水偏少,而退化速率的降低则同步出现降水量的增加。

3.2 湿地变化驱动因子的主成分分析

在定量辨识生态系统退化的驱动因素的研究中,主成分分析法已经在生态、地理等领域被广泛采用^[33]。气候变化和人类活动是导致江河源区湿地变化的两个重要因素,本文将气温、降水量、相对湿度、载畜量以及人口数量与湿地联系密切的五个气候与人为因子作为自变量,分别计算出各自变量的相关系数、特征值以及主成分贡献率和累计贡献率,然后采用方差最大正交旋转法使各关系密切的因子载荷得到加强,并进一步得出主成分因子负荷矩阵。

从表 3 中可以看出,在江河源区的第一主成分当中人口数量、载畜量和年平均气温的载荷量较大,而且载畜量的变化与第一主成分所代表的变化趋势呈负相关,表明该地区人口增长和气温升高是导致该地区湿地环境退化的主要因子,载畜量的减少在一定程度上抑制了这种变化的趋势;在第二主成分中,相对湿度和年降水量的变化起主要作用,相对湿度在一定程度上表征着该地区的蒸发量的大小,因此在第二主成分中水分条件是关键因素。长江源区和黄河源区差异在于第二主成分中年降水量和相对湿度载荷量的不同,这表明长江源区的水胁迫的加强主要是由于蒸散量的增加导致的,而黄河源区的水胁迫的增加主要是由于年降水量的减少引起的。

表 3 江河源区人为因素和气候因素与湿地退化主成分因子负荷矩阵

Table 3 The matrix of climate and human factors as well as the reasons for wetland degeneration over Yangtze River's Source Regions and Yellow River's Regions

变量 Variable	第一主成分 First Principal Component		第二主成分 Second Principal Component	
	长江 Yangtze River	黄河 Yellow River	长江 Yangtze River	黄河 Yellow River
气温 Temperature *	0.825	0.86	-0.318	0.059
降水量 Precipitation *	0.657	0.168	0.601	0.935
湿度 Humanity *	-0.205	-0.666	0.912	0.446
人口数量 Population	0.874	0.894	-0.018	0.057
载畜量 Livestock	-0.873	-0.917	-0.08	-0.041
方差贡献 Variance Contribution	53.61%	57.01%	26.01%	27.65%

其中气温为年平均气温,降水量为年降水量,湿度为年平均相对湿度

3.3 湿地变化与各环境因子关联分析

虽然分析得出个环境因子变化对江河源区湿地变化的贡献和作用,但是为弄清各类型湿地对各环境因子变化的敏感性,还要通过关联分析来定量确定各类型湿地与各环境因子的相关联程度。本文根据湿地的在各时间段的动态变化得出江河源区湿地逐年的变化情况,将湿地的面积变化序列与各环境因子序列进行标准化;为了平抑各环境因子异常值对关联度值的影响,并且便于各环境因子与各湿地类型变化之间关联度的比较,因此统一选取 0.5 作为分辨系数,然后对标准化后湿地面积变化与各环境因子做灰色关联度分析。

通过表 4 和表 5 可知,江河源区湿地变化与年平均气温、载畜量、年降水量和相对湿度都有显著的关联度。在第一主成分的各关键因素中,湿地变化与年平均气温和载畜量的关联度较高,表明气温和载畜量的变化是影响湿地变化的主要因素,其中长江源区的湿地变化对气温更加敏感,而黄河源区的湿地变化对载畜量的变化更加敏感;第二主成分的各关键因素与湿地的变化都存在显著的关联度,但与各湿地类型之间存在显著的差异,相对湿度和年降水量的变化与河流和湖泊的变化关联度相对较高。

表 4 长江源区湿地变化与各环境因子关联度

Table 4 Pertinence between wetland area and natural factor over the source region of Yangtze River's Source Regions					
类型 Type	湿度 * Humanity	降水量 * Precipitation	气温 * Temperature	载畜量 Livestock	人口数量 Population
典型沼泽草甸 Swamp Meadow	0.929	0.809	0.887	0.835	0.674
高寒泥潭沼泽 Alpine Quagmire	0.899	0.784	0.869	0.829	0.657
河流 River	0.978	0.853	0.889	0.846	0.705
湖泊 Lake	0.959	0.833	0.890	0.837	0.691

其中气温为年平均气温,降水量为年降水量,湿度为年平均相对湿度

表 5 黄河源区湿地变化与各环境因子关联度

Table 5 Pertinence between wetland area and natural factor over the source region of Yangtze River's Source Regions					
类型 Type	湿度 * Humanity	降水量 * Precipitation	气温 * Temperature	载畜量 Livestock	人口数量 Population
典型沼泽草甸 Swamp Meadow	0.864	0.801	0.801	0.839	0.519
高寒泥潭沼泽 Alpine quagmire	0.830	0.779	0.817	0.918	0.536
河流 River	0.919	0.844	0.781	0.794	0.521
湖泊 Lake	0.918	0.836	0.758	0.778	0.503

其中气温为年平均气温,降水量为年降水量,湿度为年平均相对湿度

4 结论与讨论

近十几年来,有国内外开展了很多针对江河源区湿地动态变化的研究,但是大多数研究都只是阐述了江河源区湿地在较短时间段内的变化特征,鲜有研究能对江河源区长期的变化规律、未来发展趋势以及与气候变化的响应机制方面进行探究,究其原因,首先是关于江河源区的研究尚处于初级阶段,对很多陆面过程机理和陆-气交互机制并不清楚;其次,研究的时间较短,数据较少,很难对其变化规律和发展趋势做出分析。本研究发现,江河源区的湿地在近 45 年间一直呈退化趋势,湿地面积共减少了 3576.04 km²,占原有面积的 19.16%。其中高寒泥炭沼泽减少幅度最大,其次是典型沼泽草甸与河流,湖泊由于近期面积的增加,所以变化并不明显,这与李林和刘华等人对江河源区湿地变化的研究结果一致^[27,28]。但本文进一步分析了江河源区湿地在各个时期退化速率的变化,发现江河源区湿地的退化速率在各个时期有显著的不同,沼泽湿地的变化大致经历了先迅速增加后逐渐降低的过程,河流的退化速率也出现先增加后降低的特征,但是河流退化速率最快的时期是第三时期,相对于沼泽湿地要滞后一些,这可能是由于温度升高导致冰川冻土的融化,增加了对河流的补给,削弱了降水减少对河流的影响,并进一步改变了河流退化的特征,这很可能也是江河源区河流退化的速率和幅度相对于其他湿地类型明显偏低的原因。湖泊的退化速率的变化特征与沼泽湿地类似,但是湖泊对降水量的变化更加敏感,因此在第四个时期降水量显著增加后,江河源区的湖泊面积随即出现回升,在长江源区由于湖泊面积的增加,淹没了部分高寒泥炭沼泽,从而使同时期长江源区高寒泥炭沼泽的退化速率显著增大。

借助于遥感技术和实地的野外考察,本文对江河源区湿地变化的空间特征进行了分析,江河源区湿地的退化有明显的空间差异性,湿地的退化区主要集中在江河源区海拔相对较低的季节冻土区与多年冻土区的交汇处,如长江源区的曲麻莱县的西北部和治多县的东南部、黄河源区的北部和东部的部分地区。王春鹤等根据三江平原地区湿地的研究发现,湿地和冻土之间存在显著的共生关系^[29,30,31],冻土的对土壤水下渗的截留作用而使地表呈过湿状态是湿地形成的必要条件。江河源区的冻土和湿地之间可能也存在这种共生关系,由于江河源区富含砂质土壤,砂土孔隙度大,水分容易下渗流失,再加上降水量较少,因此江河源区的冻土对湿地的存在和变化的影响更加关键。这种共生关系在湿地退化的空间特征上表现的很明显,沼泽湿地退化的区域和多年冻土退化的区域基本一致^[32],而且湿地转好的区域主要分布在多年冻土区降水量增加的区域。另

外本文从景观尺度对江河源区湿地的变化进行分析发现,长江源区沼泽湿地的退化在前三个时期是以小斑块的大量消失为主,第四个时期是以大斑块的萎缩破碎为主;而黄河源区的沼泽湿地一直是以大斑块的萎缩破碎为主,黄河源区沼泽湿地的变化明显要比长江源区超前,这可能和黄河源区为长江源区的温度高,全球升温的大趋势下,黄河源区气温升高的超前导致了其湿地退化过程的超前性。

根据对 1969 年—2013 年间江河源区年平均气温和年降水量的变化特征分析可知,江河源区在近 45 年的气温存在显著的升温趋势,长江源区的降水量也呈显著的增加,而黄河源区的降水量没有明显的变化趋势。江河源区气温和降水的变化还存在显著的阶段性特征,并且这种阶段性特征和江河源区湿地在各个时期退化速率的变化存在明显的同步性,即湿地退化速率较高的时期往往是气温较高、降水偏少的时期,退化速率较低的时期往往对应着降水量的增加。

为了更明确的分析湿地变化与各环境要素之间的关系,本文采用主成分分析和灰色关联度法对江河源区湿地变化与各环境因子的变化进行了分析。分析发现,气温升高是导致江河源区湿地退化的主要气候因素,其次是降水量和相对湿度的变化。放牧是对江河源区湿地变化影响最为显著的人为因素,随着近期江河源区载畜量的下降^[34,35],对江河源区的湿地退化趋势有明显的抑制作用。不同湿地类型对环境因子的敏感性不同,河流和湖泊对降水量和蒸散量的变化更加敏感,而沼泽湿地对气温和载畜量的变化更加敏感,这一特点在黄河源区体现的更加明显。对比长江源区和黄河源区的气候因子对湿地变化的贡献和关联度可以发现,长江源区湿地对温度的变化更加敏感,这可能与长江源区多年冻土分布更广有关,而且长江源区的降水量更低,从而使湿地对多年冻土的依赖性更大。

综上所述,本文的得出以下结论:

(1) 近 45 年来,江河源区的湿地呈显著的退化趋势,主要表现为面积减少和斑块分离度增大,退化速率在 1986 年—2000 年间最快,2000 年以后湿地的退化速率逐渐降低,而且湖泊湿地的面积在 2007 年以后出现回升,湿地退化速率的变化与气温和降水的阶段性特征有明显的同步性。

(2) 江河源区的湿地退化有明显的空间异质性,长江源区的湿地退化主要分布在治多县的东南部、曲麻莱县的西北部以及格尔木市和杂多县南部的部分地区;黄河源区的湿地退化主要分布在玛多县北部的两湖地区以及久治县、玛曲县、甘德县的东部地区,江河源区湿地退化和冻土退化在空间分布上有显著的一致性。另外,江河源区出现了少量新兴的湿地,主要分布在多年冻土区降水量增加的区域。

(3) 江河源区呈气温显著升高、相对湿度下降以及降水微弱增加的暖干化趋势。其中气温升高是导致高寒湿地退化的主要因素,气温的升高一方面增大了湿地的蒸散发量,加强了湿地区的水胁迫;另一方面破坏了沼泽湿地赖以生存的冻土环境。降水量和相对湿度的变化也是造成湿地退化的重要气候因素,两者主要通过控制湿地水分的供给与耗散来影响湿地变化。放牧是影响湿地变化的最重要的人为因素,载畜量的下降能够显著抑制江河源区湿地的退化趋势。

由于研究方法与数据的限制,本研究尚存在许多不足。首先本文采用 TM 数据进行研究,由于数据中云层影响以及时间分辨率较低,所以对于年内变化幅度较大的河流湿地的研究十分有限,因此需要改进对河流湿地分布的监测手段,增强其年际对比的可信度;其次,本文只是在分析湿地退化与各环境因子的关联度以及与冻土变化的一致性基础上,根据目前对多年冻土区湿地变化的研究成果,初步探究各环境因子对湿地变化的驱动机制,并没有对湿地水热通量变化做定量分析,因此需要进一步引入模型手段,配合湿地变化物理过程的研究,定量化分析各环境因子对湿地变化的驱动机制。

致谢:感谢中国气象局李元寿研究员提供气象数据以及技术支持。

参考文献 (References):

- [1] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(3): 358-389.
- [2] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrological perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 3-9.

- [3] Constanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] Burkett V, Kusler J. Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 313-320.
- [5] Vourltis G L, Oechel W C. Landscape-scale CO₂, H₂O vapour and energy flux of moist-wet coastal tundra ecosystems over two growing seasons. *Journal of Ecology*, 1997, 85(5): 575-590.
- [6] Lahmer W, Pfützner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology. Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(7/8): 565-575.
- [7] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, Osterkamp T E. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change*, 2001, 48(4): 551-579.
- [8] McGuire A D, Sturm M, Chapin F S III. Arctic transitions in the Land-Atmosphere system (ATLAS): Background, objectives, results, and future directions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2003, 108(D2): doi: 10.1029/2002JD002367.
- [9] 孙广友, 邓伟, 邵庆春. 长江河源区冰缘环境沼泽的研究. *地理科学*, 1990, 10(1): 86-92.
- [10] 王根绪, 李元寿, 王一博, 陈玲. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化. *地理学报*, 2007, 62(5): 481-491.
- [11] 孙广友. 试论沼泽与冻土的共生机理-以中国大小兴安岭地区为例. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 309-316.
- [12] 陈锦, 李东庆, 孟庆州, 雍国武才. 江河源区湿的退化现状和驱动力分析. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(4): 43-49.
- [13] 王根绪, 丁永建, 王建, 刘时银. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化. *地理学报*, 2004, 59(2): 163-167.
- [14] 潘竞虎, 王建, 王建华. 长江、黄河源区高寒湿地动态变化研究. *湿地科学*, 2007, 5(4): 298-304.
- [15] O'Connell M J. Detecting, measuring and reversing changes to wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 2003, 11(6): 397-401.
- [16] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 202-208.
- [17] 李郁竹, 曾燕. 应用 NOAA/ AVHRR 数据测算局地水稻种植面积方法研究. *遥感学报*, 1998, 2(2): 125-130.
- [18] 王根绪, 刘进琪, 陈玲. 黑河流域典型区土地利用格局变化及影响比较. *地理学报*, 2006, 61(4): 339-348.
- [19] 徐兴奎, 陈红, Levy J K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析. *科学通报*, 2008, 53(4): 456-462.
- [20] 王根绪, 吴青柏, 王一博, 郭正刚. 青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响. *科技导报*, 2005, (1): 8-13.
- [21] 张德铨, 阎建忠, 刘林山, 摆万奇, 李双成, 郑度. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例. *地理学报*, 2002, 57(3): 253-266.
- [22] 陈晓丹. 青藏铁路格拉段环境影响分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6): 135-138.
- [23] 任继周, 林慧龙. 江河源区草地生态建设构想. *草业学报*, 2005, 14(2): 1-8.
- [24] Poiani K A, Johnson W C, Swanson G A, Winter T C. Climate change and northern prairie wetlands: Simulations of long-term dynamics. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(5): 871-881.
- [25] Schmidt R, Wunsam S, Brosch U, Fott J, Lami A, Löffler H, Marchetto A, Müller H W, Pražáková M, Schwaighofer B. Late and post-glacial history of meromictic Längsee (Austria), in respect to climate change and anthropogenic impact. *Aquatic Science*, 1998, 60(1): 56-88.
- [26] 张树清, 张柏, 汪爱华. 三江平原湿地消长与区域气候变化关系研究. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 836-841.
- [27] 李林, 李凤霞, 朱西德, 常国刚, 肖建设. 黄河源区湿地萎缩驱动力的定量辨识. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1246-1255.
- [28] 刘华, 鞠洪波, 赵峰, 邹文涛. 长江源典型区湿地对区域气候变化的响应. *林业科学研究*, 2013, 26(4): 406-413.
- [29] 王春鹤. 三江平原融冻作用与沼泽地及农业生产关系 // 第二届全国冻土学术会议论文选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 85-93.
- [30] 王春鹤. 中国东北冻土区融冻作用与寒区开发建设. 北京: 科学出版社, 1999: 77-81.
- [31] 中国科学院长春地理研究所沼泽研究室. 三江平原沼泽. 北京: 科学出版社, 1983: 58-74.
- [32] 王坤. 基于 RS/GIS 的青藏高原冻土分布模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [33] 董玉祥. 我国半干旱地区现代沙漠化驱动因素的定量辨识. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 412-417.
- [34] 曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化成因机制分析. *自然灾害学报*, 2009, 18(1): 45-52.
- [35] 汪诗平. 青海省“三江源”地区植被退化原因及其保护策略. *草业学报*, 2003, 12(6): 1-9.