

DOI: 10.5846/stxb201911062337

李娜娜, 高飞, 魏圣钊, 黄从德, 杜美霖, 兰素芯. 四川省湿地类型变化的自然-社会经济驱动力分析. 生态学报, 2020, 40(16): 5502-5512.

Li N N, Gao F, Wei S Z, Huang C D, Du M L, Lan S X. Natural and social economy driving forces of wetland types changes in Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5502-5512.

## 四川省湿地类型变化的自然-社会经济驱动力分析

李娜娜<sup>1,3</sup>, 高 飞<sup>2,3</sup>, 魏圣钊<sup>1</sup>, 黄从德<sup>1,\*</sup>, 杜美霖<sup>1</sup>, 兰素芯<sup>1</sup>

1 四川农业大学林学院, 成都 611130

2 四川大学网络空间安全学院, 成都 610207

3 四川省林业和草原调查规划院, 成都 610000

**摘要:**利用 Landsat 系列遥感影像对四川湿地进行遥感制图,通过 GIS 空间叠加分析获取 2000—2015 年间 2 期(2000—2010 年和 2010—2015 年)湿地变化时空数据库,选取平均风速、降雨量、平均气温、平均日照时间、平均相对湿度、国内生产总值、人均国内生产总值、农业生产总值和人口数量 9 个自然和社会经济影响因子,采用典型相关分析(CCA)方法,对四川省湿地类型变化的驱动力进行研究。(1)从 2000 年到 2015 年,四川省湿地变化面积 705374 hm<sup>2</sup>,沼泽和河流湿地是每期湿地面积变化的主体,库塘是变化最大的湿地类型,湖泊湿地最为稳定,主要的湿地变化类型是沼泽转化为非湿地、河流和非湿地转变为库塘。(2)平均气温、国内生产总值和人口数量分别解释湿地类型变化的 16.6%、30.7% 和 2.1%,而降雨量和平均相对湿度仅能解释 0.6% 和 0.3%,表明国内生产总值、平均气温和人口数量是四川省湿地类型变化的主要驱动因子。(3)四川不同湿地类型变化的驱动因子存在差异。具体表现为,随着国内生产总值的增加,沼泽湿地转化为非湿地的量减少,而且国内生产总值越高,非湿地和河流湿地转变为库塘的量越多;随着平均气温的增加,沼泽湿地转化为非湿地的面积增加。研究结果说明社会经济的快速发展对四川湿地面积的保护和增加起到了积极作用,但全球变暖仍然导致沼泽湿地在不断减少,因此在全球变化的背景下,加强对沼泽湿地的保护和恢复,对于稳定四川湿地资源具有重要的作用。

**关键词:**遥感;湿地类型变化;驱动力;CCA;四川省

## Natural and social economy driving forces of wetland types changes in Sichuan Province

LI Nana<sup>1,3</sup>, GAO Fei<sup>2,3</sup>, WEI Shengzhao<sup>1</sup>, HUANG Congde<sup>1,\*</sup>, DU Meilin<sup>1</sup>, LAN Suxin<sup>1</sup>

1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

2 College of Cybersecurity, Sichuan University, Chengdu 610207, China

3 Sichuan Forestry and Grassland Survey and Planning Institute, Chengdu 610000, China

**Abstract:** Landsat series remote sensing images were used to map the wetlands in Sichuan, and the GIS spatial overlay analysis was used to obtain wetland change spatio-temporal database in two periods (2000—2010 and 2010—2015). We chose nine natural and socio-economic factors including average wind speed, precipitation, average temperature, average sunshine duration, average relative humidity, gross domestic product, GDP per capita, gross agricultural output and population, and adopted the Canonical Correlation Analysis (CCA) method to analyze the driving forces of changes of wetland types in Sichuan Province. The results showed that (1) from 2000 to 2015, the changeable areas of the wetland in Sichuan Province were 705374 hm<sup>2</sup>. Swamps and rivers were the main changeable wetland areas in each period. The ponds were the most changeable wetland type, and lakes were the most stable. The main types of change were swamps transformed

基金项目:长江上游生态安全协同创新中心开放基金项目

收稿日期:2019-11-06; 网络出版日期:2020-06-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llyxq100@aliyun.com

into non-wetlands, rivers and non-wetlands changed into ponds. (2) The average temperature, GDP and population explained 16.6%, 30.7% and 2.1% of changes in wetland types respectively, while precipitation and average relative humidity could only explain 0.6% and 0.3%. So, GDP, average temperature and population were the main driving factors for the change of wetland types in Sichuan Province. (3) There were differences in driving factors for different wetland types in Sichuan. Specifically, as the GDP increased, the amount of swamp wetlands converted to non-wetlands decreased, and the higher the GDP, the more non-wetlands and river wetlands were converted into ponds; with the increase of average temperature, the area of swamp wetlands converted into non-wetlands increased. The results show that the rapid development of society and economy has played a positive role in protecting and increasing the area of Sichuan wetlands, but global warming still leads to the continuous reduction of swamps. Therefore, in the context of global change, strengthening the protection and restoration of swamps will play an important role in stabilizing Sichuan wetland resources.

**Key Words:** remote sensing; wetland types change; driving force; CCA; Sichuan Province

湿地独具陆地与水域的结构特征和功能,是自然界最富生物多样性的生态景观之一<sup>[1]</sup>。人类历史上就依水而居,众多城市因水而兴,湿地生态系统因其巨大的生态功能和服务价值,已经成为人类最重要的生存环境之一<sup>[2]</sup>。但自 18 世纪工业文明以来,人类对自然资源和生态环境的过度攫取和消耗,使得天然湿地资源被大量侵占、改造和破坏<sup>[3]</sup>。自 1900 以来,世界失去了 64%—71% 的湿地<sup>[4]</sup>,中国自 1950 年来,天然湿地和湿地总面积也经历了大幅下降的过程<sup>[5-6]</sup>,进入 21 世纪的 2009—2013 年,中国在受保护湿地范围增加的情况下,湿地面积仍然减少了 8.82%,自然湿地减少了 9.33% (第二次全国湿地资源调查结果)。令人担忧的是,多项研究仍表明湿地退化和丧失的速度超过了其他类型的生态系统,并预计今后全球气候变化、人口增长和经济开发活动将进一步加剧湿地的丧失和退化状况<sup>[7-8]</sup>。因此准确监测湿地的动态变化、类型变化、丧失数量,分析其驱动因素,对湿地保护和管理部门开展湿地资源保护利用,维护人类生存环境具有重要意义。

湿地变化驱动机制研究是开展湿地保护和修复的抓手和切入点,国内外学者在这方面做了大量的研究。研究表明,驱动湿地发生变化的因子主要包括自然和社会经济因素<sup>[9]</sup>。自然驱动因子是湿地发生变化的内在动机,影响较大的是降水和气温<sup>[10]</sup>。其中湿地面积与降水量呈正相关,如 Withey 等<sup>[11]</sup> 研究指出,降水减少使加拿大西部地区湿地减少率为 7%—47%;张树清等<sup>[12]</sup> 的研究表明,1980—1996 年三江平原的湿地面积与降水的变化趋势一致;不同水源补给的湿地对气温响应程度不同,如青藏高原地区 65.57% 的湿地面积与气温呈正相关,气温升高增加了冰川融水的补给量,使得湿地面积增加<sup>[13]</sup>;而位于内蒙古东北部的呼伦湖,在气温升高 1℃ 时,湿地面积减少 28—80 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。社会经济因子则是湿地景观发生重塑的外在动力,包括如人口数量、国内生产总值和人均国内生产总值等<sup>[15]</sup>。如王泉泉等<sup>[16]</sup> 研究发现,社会经济因子对滇西北高原湿地面积和景观多样性指数变化的解释度高达 63.50%;陈恣恣<sup>[17]</sup> 等研究表明,人类活动是黄旗海流域 1976—2010 年景观变化的主要驱动力,经济增长需要消耗大量水资源,人工水利设施的建设改变了流域水资源的自然配置,导致湿地资源大量消失。

四川省作为长江、黄河上游的重要水源发源地及涵养区,湿地在其中扮演了重要的作用。然而有关四川省湿地的研究主要聚焦于若尔盖湿地退化及恢复、生态服务功能、生物多样性、历史生态学等方面<sup>[18-23]</sup>,缺乏全省尺度湿地变化驱动因子的研究,这难以满足四川省湿地保护和可持续发展的需要。基于此,本研究以四川省湿地为研究对象,利用 Landsat 系列遥感影像对四川湿地进行遥感制图,通过 GIS 空间叠加分析获取 2000—2015 年间 2 期(分别为 2000—2010 年和 2010—2015 年)湿地变化时空数据库,结合自然和社会经济数据,应用典型相关分析(CCA)方法,分析四川省湿地类型变化的主要驱动因子,为四川省湿地保护和恢复提供参考依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区域概况

四川省位于我国西南部,介于东经 97°21'—108°31'和北纬 26°03'—34°19'之间,地跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、秦巴山地和四川盆地五大地貌单元;气候类型复杂多样,包括亚热带到永冻带的各种气候类型,多年平均气温 14.8℃,多年平均降水量 967.4 mm,多年平均日照时数 1470.8 h。省内河流以长江水系为主,96.5%的土地均属长江水系,长江上游金沙江及主要支流雅砻江、大渡河、岷江、嘉陵江纵贯全境<sup>[24]</sup>。四川湿地是长江流域湿地的重要组成部分。

### 1.2 数据和数据处理

#### 1.2.1 湿地分类体系

参照《全国湿地资源调查与监测技术规程》(2008)和《四川省湿地资源调查技术实施细则》(四川省林业厅)的湿地类型及划分标准,并考虑到遥感影像可分辨的最小图斑、人工判读的可能性等因素,将湿地按自然属性划分为自然湿地和人工湿地 2 大类。其中:自然湿地包括河流湿地、湖泊湿地和沼泽湿地,人工湿地主要包括库塘(表 1),因水稻田作为农田资源,有较准确的数据,不纳入本次研究范围。

表 1 四川湿地景观分类体系

Table 1 The classification system of wetland landscape of Sichuan Province

类别 Types		类别描述 Types description	
湿地 Wetland	自然湿地	河流湿地	永久性、季节性或间歇性河流及在丰水季节由洪水泛滥的河滩、河心洲、河谷
		湖泊湿地	由淡水组成的永久性湖泊
		沼泽湿地	发育在有机土壤的、具有泥炭层的以苔藓植物为优势群落的沼泽
	人工湿地	库塘及其他	为蓄水、发电、农业灌溉、城市景观、农村生活为主要目的而建造的,面积不小于 8hm <sup>2</sup> 的蓄水区

#### 1.2.2 湿地遥感数据

本次使用 2000 年、2010 年和 2015 年覆盖四川地区的 Landsat 系列遥感影像为数据源(<http://www.gscloud.cn>)(表 2)。遥感影像均为 Level 1T 地形校正数据产品,已经过系统辐射校正和几何校正,坐标系使用影像源的 WGS1984 坐标系,UTM 投影方式,对成果影像数据不进行镶嵌、裁剪、投影转换处理,通过备选补充保证湿地人工目视解译处无云覆盖。

表 2 Landsat 遥感数据源情况

Table 2 The description of research Landsat images

研究时期 Time	卫星及传感器 Landsat type and sensor	空间分辨率 Spatial resolution/m	行列号 Path and row	解译使用 Interpretation of remote sensing image			备选补充 Complement of remote sensing image		
				景数	前后一年 内占比/%	4—10 月 占比/%	景数	前后一年 内占比/%	4—10 月 占比/%
2000	Landsat5 TM	30	路径:127—134	34	100.00	82.35	34	100.00	70.59
2010	Landsat7 ETM+	30	行:37—42	34	91.18	82.35	34	76.47	67.65
2015	Landsat7 ETM+ and Landsat8 OLI	30		34	94.12	85.29	61	85.25	77.05

#### 1.2.3 影响因子数据

根据相关文献<sup>[10, 15]</sup>以及对四川省湿地类型变化驱动因子的初步分析,选择 5 个自然影响因子(平均风速、降雨量、平均气温、平均日照时间和平均相对湿度)和 4 个社会经济影响因子(国内生产总值、人均国内生产总值、农业生产总值和人口数量)作为四川省湿地类型变化的影响因子。各影响因子的来源与处理方法详见表 3。对 2000、2010 年和 2015 年的影响因子做差值计算,获得 2000—2010 年和 2010—2015 年两期增量数据。

表 3 影响因子数据表

Table 3 The impact factors of research

类型 Types	因子 Factors	缩写 Abbreviation	数据来源 Data sources	数据处理 Data Processing
自然因子 Natural factors	平均风速	WIN	四川 53 个气象站台 1990 年以来的年值数据。2000 年数值为 1990—1999 年数据平均值。2010 年数据为 2000—2009 年数据平均值。2015 年数据为 2010—2015 年数据平均值。	ArcGIS 差值分析 (Interpolation) 中克里金法 (Kriging) 功能, 输出像元大小为 30 m。再使用 ArcGIS 区域统计 (Zonal statistics) 中以表格显示分区统计 (Zonal statistics as Table) 功能, 形成以县级行政单位为单元的数据结果
	降雨量	PRE		
	平均气温	TEM		
	平均日照时间	SUN		
	平均相对湿度	HUM		
社会经济因子 Social economic factors	国内生产总值	GDP	四川省统计年鉴 2001 年, 2011 年, 2016 年, 以县级行政单位为单元 (全省共 178 个县级单位)	Excel 中按统一的县级行政单位对变动行政单位统计数据进行处理
	人均国内生产总值	PGDP		
	农业生产总值	GDP1		
	人口数量	POP		

### 1.3 方法

#### 1.3.1 物种和环境数据矩阵

CCA 要求两个数据矩阵, 一个是植被数据矩阵, 一个是环境数据矩阵<sup>[25]</sup>。本研究将全省的县级行政单位作为样方, 湿地变化类型作为物种, 县级行政范围内各湿地转变类型变化总面积为多度, 形成植被数据矩阵, 每个县级行政单位的影响因子增量数据作为环境数据矩阵。2000—2010 年和 2010—2015 年两期的湿地变化样方均为 178 个, 两期的湿地变化类型共 17 种, 将两期数据合并形成 356×17 的物种数据矩阵 (Species2000—2015.dta) 及对应 356×5 的环境数据矩阵数据 (Environment2000—2015.dta)。

#### 1.3.2 CCA 分析方法

利用 CANOCO 4.5 软件, 将湿地变化类型和环境数据输入, 使用 DCA 计算环境梯度轴的长度, 如果 4 个 DCA 排序轴中梯度最大值超过 4, 选择单峰模型 (典型相关分析, CCA); 小于 3, 选择线性模型 (冗余分析, RDA), 介于 3—4 之间, 两种模型皆可<sup>[26]</sup>。本研究中, 4 个 DCA 排序轴的梯度长度分别为 4.038、2.354、1.790 和 2.021, 其梯度最大值超过 4, 因此采用典型相关分析。

利用方差膨胀因子 (VIF) 对所有影响因子进行共线性分析。当 VIF>10, 表明与其他因子具有较高的多重共线性, 会使模型估计失真或难以估计准确, 可依次删除 VIF>10 的影响因子, 直至所有变量的 VIF 值小于 10。本研究中, 平均风速、平均日照时间、人均国内生产总值和农业生产总值具有较高的 VIF 值 (VIF>10)。依次删除后, 模型中剩余驱动因子 (平均气温、降雨量、平均相对湿度、国内生产总值和人口数量) 的方差膨胀因子均小于 10。

## 2 结果和分析

### 2.1 湿地变化面积分析

#### 2.1.1 湿地面积变化总体特征

由图 1 和表 4 可知, 从 2000—2015 年四川省主要的湿地变化类型有非湿地转变为河流 ( $S_{NR}$ )、非湿地转变为沼泽 ( $S_{NS}$ )、非湿地转变为库塘 ( $S_{NP}$ )、河流转变为非湿地 ( $S_{RN}$ )、河流转变为沼泽 ( $S_{RS}$ )、河流转变为库塘 ( $S_{RP}$ )、沼泽转变为非湿地 ( $S_{SN}$ )、沼泽转变为河流 ( $S_{SR}$ ) 和库塘转变为非湿地 ( $S_{PN}$ )。其中,  $S_{NR}$  新增 104187  $hm^2$ ,  $S_{RN}$  新增 107422  $hm^2$ ,  $S_{RN}$  净增 3235  $hm^2$ ;  $S_{NS}$  新增 165096  $hm^2$ ,  $S_{SN}$  新增 191527,  $S_{SN}$  净增 26431  $hm^2$ ;  $S_{NP}$  新增 54853  $hm^2$ ,  $S_{PN}$  新增 28301  $hm^2$ ,  $S_{NP}$  净增 26552  $hm^2$ ;  $S_{RS}$  新增 15621  $hm^2$ ,  $S_{SR}$  新增 16803  $hm^2$ ,  $S_{SR}$  净增 1182  $hm^2$ ;  $S_{RP}$  新增 13927  $hm^2$ ,  $S_{PR}$  新增 199  $hm^2$ ,  $S_{RP}$  净增 13728  $hm^2$ 。总体上, 四川省从 2000 年到 2015 年间, 沼泽转变为非湿地净增 26431  $hm^2$ , 非湿地转变为库塘净增 26552  $hm^2$ , 河流转变为库塘净增 13728  $hm^2$ 。

### 2.1.2 各湿地类型变化特征

由表 4 可知,2 个时期中,各湿地类型变化面积占总变化面积比例的顺序为:沼泽>河流>库塘>湖泊。其中,沼泽湿地占总变化面积的 51.8%,河流湿地占 34.3%,库塘为 12.9%,湖泊占比在 1% 以下,变化量较小。各湿地类型变化面积占其 2000 年面积比例的顺序为:库塘>河流>沼泽>湖泊。其中,沼泽、河流和湖泊湿地变化占比分别为 32.2%、47.7% 和 29.1%,库塘占比达到了 124.8%。可见,沼泽和河流湿地是每期湿地面积变化的主体,库塘是变化最大的湿地类型,而湖泊湿地较为稳定。

表 4 2000—2015 年四川省湿地类型变化面积情况/hm<sup>2</sup>

Table 4 Change area of different wetland types in Sichuan Province (2000—2015)

年 Year	S <sub>NR</sub>	S <sub>NL</sub>	S <sub>NS</sub>	S <sub>NP</sub>	S <sub>RN</sub>	S <sub>LN</sub>	S <sub>SN</sub>	S <sub>PN</sub>	
2000—2010	55517	1132	93686	21524	57788	1928	106747	12005	
2010—2015	48670	1248	71410	33329	49634	1512	84780	16296	
总计 Total	104187 *	2380	165096 *	54853 *	107422 *	3440	191527 *	28301 *	
年 Year	S <sub>RL</sub>	S <sub>RS</sub>	S <sub>RP</sub>	S <sub>LR</sub>	S <sub>LS</sub>	S <sub>SR</sub>	S <sub>SL</sub>	S <sub>SP</sub>	S <sub>PR</sub>
2000—2010	15	7026	6021	8	429	10655	237	213	110
2010—2015	5	8595	7906	17	172	6148	493	29	89
总计 Total	20	15621 *	13927 *	25	601	16803 *	730	242	199

S<sub>NR</sub>:非湿地转变为河流, non-wetlands changed into rivers; S<sub>NL</sub>:非湿地转变为湖泊, non-wetlands changed into lakes; S<sub>NS</sub>:非湿地转变为沼泽, non-wetlands changed into swamps; S<sub>NP</sub>:非湿地转变为库塘, non-wetlands changed into ponds; S<sub>RN</sub>:河流转变为非湿地, rivers changed into non-wetlands; S<sub>LN</sub>:湖泊转变为非湿地, lakes changed into non-wetlands; S<sub>SN</sub>:沼泽转变为非湿地, swamps changed into non-wetlands; S<sub>PN</sub>: ponds changed into non-wetlands; S<sub>RL</sub>: 河流转变为湖泊, rivers changed into lakes; S<sub>RS</sub>: 河流转变为沼泽, rivers changed into swamps; S<sub>RP</sub>: 河流转变为库塘, rivers changed into ponds; S<sub>LR</sub>: 湖泊转变为河流, lakes changed into rivers; S<sub>LS</sub>: 湖泊转变为沼泽, lakes changed into swamps; S<sub>SR</sub>: 沼泽转变为河流, swamps changed into rivers; S<sub>SL</sub>: 沼泽转变为湖泊, swamps changed into lakes; S<sub>SP</sub>: 沼泽转变为库塘, swamps changed into ponds; S<sub>PR</sub>: 库塘转变为河流, ponds changed into rivers; \* 表示主要的湿地变化类型

### 2.2 湿地类型变化影响因子的动态

由图 2、图 3 和表 5 可见,从 2000 年到 2015 年,全省平均气温增加 0.5℃,增速为 0.03℃/a,降雨量增加 21.6 mm,平均相对湿度减少 4.7%;国内生产总值增加 26711.7 亿元,增速为 1780.8 亿元/a,全省人口数量增加 721.3 万人,增速为 48.1 万人/a。

表 5 2000—2015 年影响因子变化情况

Table 5 The change of impact factors in 1990—2015

年 Year	TEM/℃	PRE/mm	HUM/%	GDP/亿元	POP/万人
2000	15.0	954.7	75.8	3991.8	8437.8
2010	15.4	929.4	73.7	17077.9	9001.3
2015	15.5	976.3	71.1	30703.5	9159.1
2000—2015	0.5	21.6	-4.7	26711.7	721.3

TEM: 平均气温, mean temperature; PRE: 降雨量, precipitation; HUM: 平均相对湿度, mean relative humidity; GDP: 国内生产总值, gross domestic product; POP: 人口数量, population quantity

### 2.3 湿地类型变化驱动因子分析

对 2000—2015 年的湿地变化类型样本和影响因子进行 CCA 排序(表 6)。由表 6 可知,CCA 分析第一轴特征值为 0.387,湿地类型变化和影响因子相关性为 0.750,能解释湿地类型变化的 26.6%,能解释湿地类型变化和影响因子变化的 94.3%;第二轴特征值为 0.018,与湿地类型变化和影响因子相关性为 0.287,能解释湿地类型变化的 1.3%,能解释湿地类型变化和影响因子变化的 4.5%。可见,前两轴能够反映湿地类型变化与影响因子之间的相关关系,且主要由轴 1 决定。第 1 排序轴与降雨量、平均相对湿度、国内生产总值和人口数量呈正相关;与平均气温呈负相关;第 2 排序轴与降雨量、平均气温、国内生产总值呈正相关,与平均相对湿度和人口数量呈负相关。

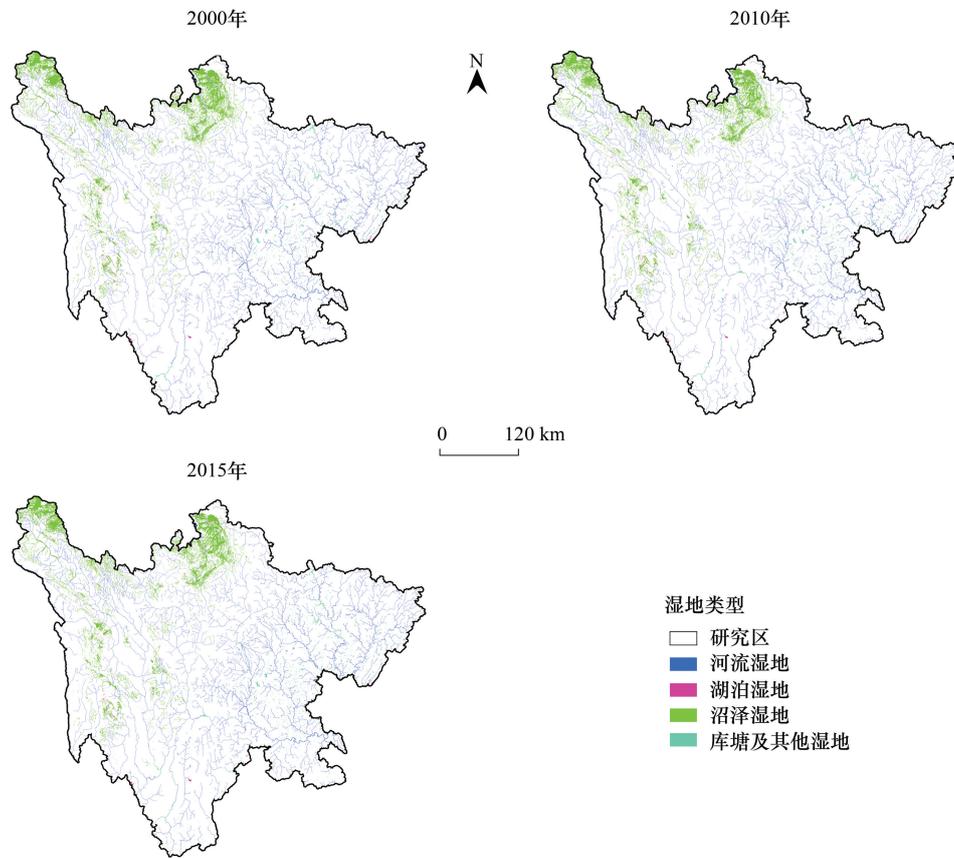


图 1 2000—2015 年四川省湿地类型分布图

Fig.1 The spatial distribution of wetland types in Sichuan Province (2000—2015)

表 6 CCA 分析排序轴特征值、湿地类型变化与影响因子相关系数

Table 6 Eigenvalues for CCA axis and wetland types changes-impact factors correlation

轴 Axes	第 1 轴 Axes 1	第 2 轴 Axes 2	第 3 轴 Axes 2	第 4 轴 Axes 4
PRE	0.0706	0.0757	0.0211	-0.208
TEM	-0.4874	0.0902	0.0616	0.1221
HUM	0.0051	-0.1104	0.0021	-0.0699
GDP	0.6643	0.1094	0.0364	0.0187
POP	0.1572	-0.0869	0.1428	0.0222
特征值 Eigenvalues	0.387	0.018	0.003	0.002
湿地类型变化与影响因子相关性 Correlations of wetland types changes and impact factors	0.750	0.287	0.155	0.228
湿地类型变化数据累计变化百分率 Cumulative percentage variance of wetlands types changes	26.6	27.9	28.1	28.2
湿地类型变化与影响因子数据累计变化百分率 Cumulative percentage variance of wetlands types changes and impact factors	94.3	98.8	99.5	99.9

蒙特卡罗置换检验结果显示(表 7),影响因子中平均气温、GDP 和人口数量对湿地类型变化的影响显著(permutation number = 499),能分别解释湿地类型变化的 16.6%、30.7%和 2.1%。而降雨量和平均相对湿度对湿地类型变化的影响不显著,仅能解释湿地类型变化的 0.6%和 0.3%。这表明,平均气温、GDP 和人口数量是湿地类型变化的主要驱动因子。

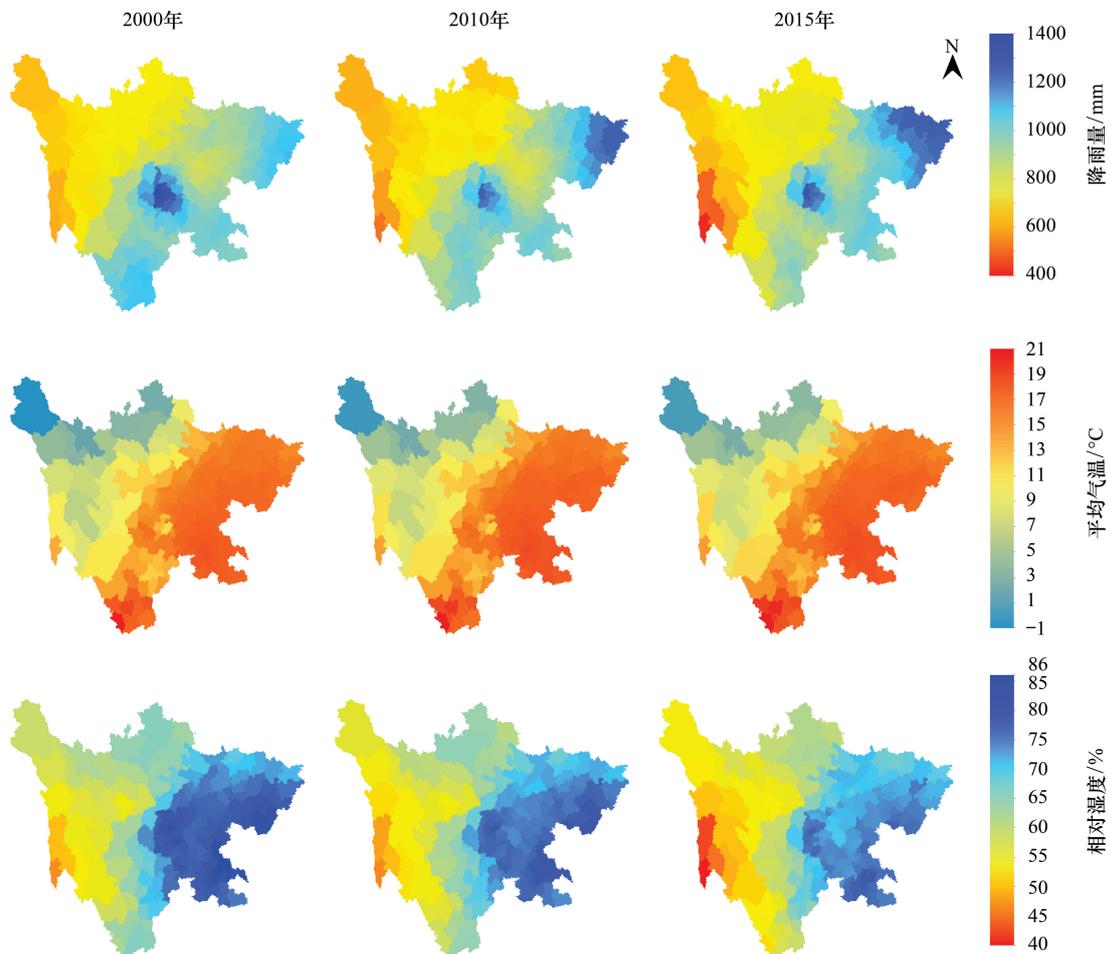


图2 2000—2015年四川降雨量、平均气温和平均相对湿度空间分布图

Fig.2 The spatial distribution of precipitation, temperature and humidity in Sichuan Province (2000—2015)

表7 冗余分析蒙特卡罗置换检验结果

Table 7 Results from redundancy analysis using Monte Carlo permutation test

结果 Results	TEM	PRE	HUM	GDP	POP
<i>F</i>	45.493	1.538	0.793	94.777	5.205
<i>P</i>	0.002	0.136	0.396	0.002	0.048
变量解释度 Variance explain	0.166	0.006	0.003	0.307	0.021

采用前2轴绘制湿地变化类型样本—影响因子的二维空间排序图(图4)。由图4可知,2000—2015年间,库塘转化为非湿地、非湿地转化成库塘和河流湿地转变为库塘这3种变化类型与GDP呈正相关,即GDP越高,越容易转化;沼泽湿地转变为库塘、沼泽湿地与河流湿地间的转换、沼泽湿地与非湿地间的转化与平均气温呈正相关,即在平均气温越高,转化量较多。此外,沼泽湿地与非湿地间的转化还与GDP和人口数量呈负相关,随着GDP和人口数量的增加,其转化量减少;湖泊转变为河流湿地与GDP呈负相关,主要发生在国内生产总值较低的区域;湖泊湿地与非湿地间的转化、河流湿地转变为湖泊湿地分布于第1轴的右下端,与平均相对湿度和人口数量呈正相关。

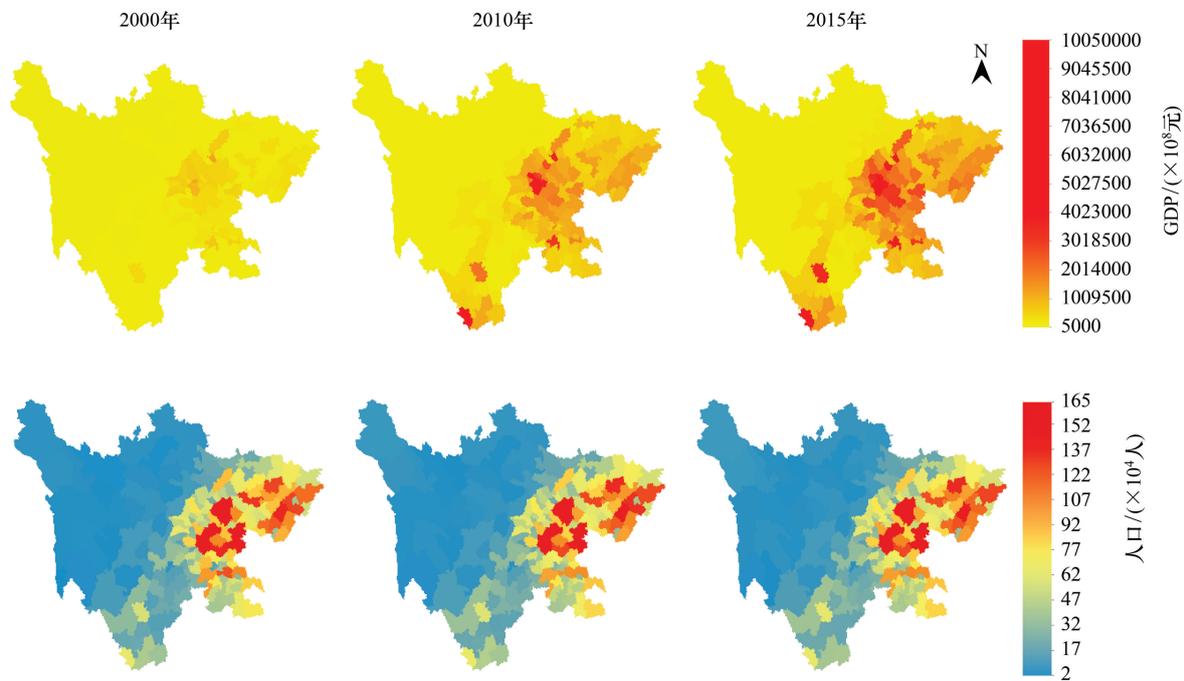


图3 2000—2015年四川GDP和人口空间分布图

Fig.3 The spatial distribution of GDP and population in Sichuan Province (2000—2015)

### 3 讨论

#### 3.1 四川省湿地类型变化的驱动力分析

大多数的研究表明,湿地变化是自然和社会经济因素共同作用的结果,其影响因子包括海拔、降水量、温度、平均湿度、蒸发量、国内生产总值、总人口数、政策因素和城市扩张等<sup>[27-32]</sup>。本研究也表明,平均气温、国内生产总值和人口数量是四川省湿地变化的主要驱动因子。这与大多数人的研究结果基本一致。

本研究还表明,四川不同湿地类型变化的驱动因子存在差异。其中,国内生产总值影响库塘的变化,随着国内生产总值的增加,非湿地和河流转变为库塘的面积增加。原因是随着四川经济的快速发展,四川省在大江大河上建设了大量的水电站,增加了库塘面积。四川省从2000年到2015年,国内生产总值增加26711.7亿元,在金沙江、大渡河、雅砻江干流上修建了溪洛渡水电站、沙湾水电站和锦屏水电站等大型水电站,水电工程建坝并蓄水成库,库塘增加68780 hm<sup>2</sup>,其中非湿地转化54853 hm<sup>2</sup>,河流转化13927 hm<sup>2</sup>。沼泽湿地变化主要受到平均气温和国内生产总值的影响。一方面,随着平均气温的升高,沼泽湿地转化为非湿地的面积增加,这与刘吉平等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。其原因是气温升高会造成沼泽湿地的丧失和退化。Withey等<sup>[11]</sup>的研究也说明了全球变暖会导致沼泽的丧失。另一方面,随着国内生产总值的增加,沼泽湿地转化为非湿地的量减少。这与张敏等研究结果有一定差异<sup>[15]</sup>。张敏等的研究表明,从1984到2014年,白洋淀湿地面积减少。并进一步指出,随着社会经济的快速增长,人口数量和工农业以及居民用水不断增加,导致白洋淀水位下降,湿地面积减少。而四川沼泽湿地主要分布于西部的阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州,该区域人口数量较少,工农业相对落后,用水量较少;同时,随着国内生产总值的增加(2015年这两个州的GDP达到476亿元,与2000年的60亿元相比增加了416亿元),政府加大了对湿地保护的资金投入,保护和增加了湿地面积。如2010到2011年,若尔盖花湖湿地开展了生态恢复工程,恢复湿地面积1317 hm<sup>2</sup>(<http://www.er-china.com/PowerLeader/html/2012/03/20120329081434.shtml>)。综上所述,尽管社会经济的快速发展对四川湿地面积的保护和增加起到了积极作用,但全球变暖仍然在导致湿地,特别是沼泽湿地的面积不断减少,因此在全球变

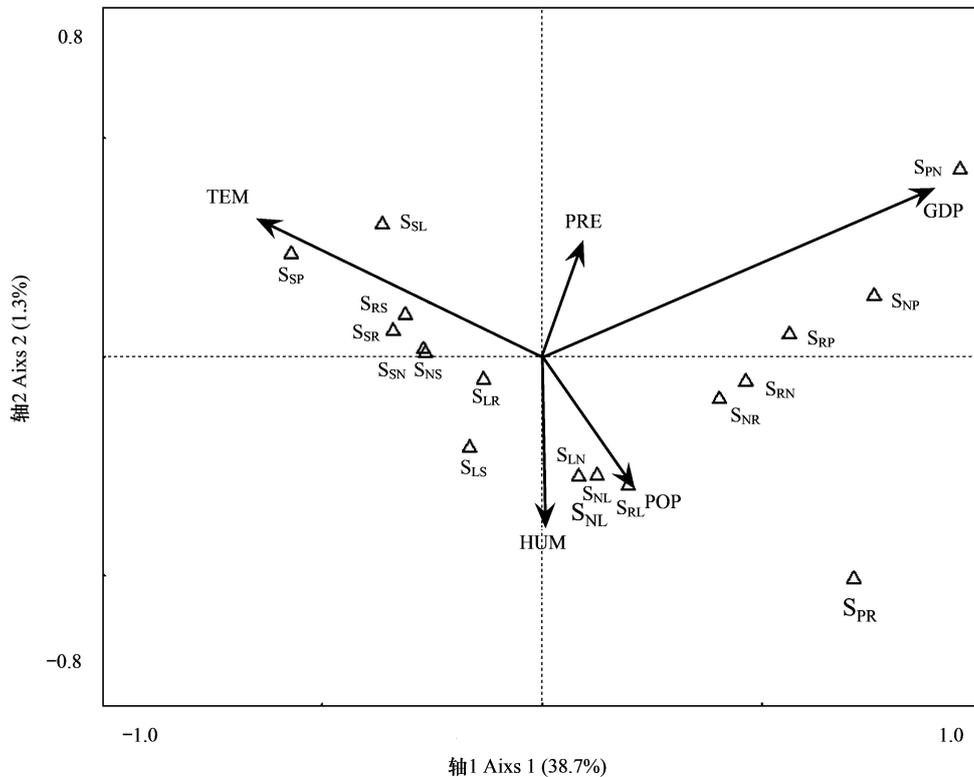


图 4 各湿地变化类型与影响因子间的 CCA 排序图

Fig.4 CCA order figure of different wetland conversion types and impact factors

$S_{NR}$ : 非湿地转变为河流, non-wetlands changed into rivers;  $S_{NL}$ : 非湿地转变为湖泊, non-wetlands changed into lakes;  $S_{NS}$ : 非湿地转变为沼泽, non-wetlands changed into swamps;  $S_{NP}$ : 非湿地转变为库塘, non-wetlands changed into ponds;  $S_{RN}$ : 河流转变为非湿地, rivers changed into non-wetlands;  $S_{LN}$ : 湖泊转变为非湿地, lakes changed into non-wetlands;  $S_{SN}$ : 沼泽转变为非湿地, swamps changed into non-wetlands;  $S_{PN}$ : ponds changed into non-wetlands;  $S_{RL}$ : 河流转变为湖泊, rivers changed into lakes;  $S_{RS}$ : 河流转变为沼泽, rivers changed into swamps;  $S_{RP}$ : 河流转变为库塘, rivers changed into ponds;  $S_{LR}$ : 湖泊转变为河流, lakes changed into rivers;  $S_{LS}$ : 湖泊转变为沼泽, lakes changed into swamps;  $S_{SR}$ : 沼泽转变为河流, swamps changed into rivers;  $S_{SL}$ : 沼泽转变为湖泊, swamps changed into lakes;  $S_{SP}$ : 沼泽转变为库塘, swamps changed into ponds;  $S_{PR}$ : 库塘转变为河流, ponds changed into rivers

化的背景下,加强对沼泽湿地保护和恢复,对于稳定四川湿地资源具有重要的作用。

### 3.2 湿地遥感制图精度及驱动因子选择的不确定性

Gong 等认为匹配误差和类型不确定性是造成湿地遥感制图误差的主要原因<sup>[33]</sup>。本研究的 TM、ETM+和 OLI 影像均来自统一的 Landsat 系列卫星系统,均为 Level 1T 地形矫正影像,数据产品已经过系统辐射校正和几何校正,在统一的坐标系下匹配误差并不显著;而在湿地变化类型分析中,湿地和非湿地边界定义是本研究不确定性的主要原因。首先,在数量上湿地和非湿地间的转化占湿地变化面积的比例超过 90%,远大于湿地内部间的转换;其次,湿地具有显著的时空动态特性<sup>[34]</sup>,水体本身的流动性及其来源动态增减是造成湿地范围及转化的核心因素。因此,湿地变化是动态状态下体现的趋势和规律,而使用相对静态的遥感解译方法,通过简单空间叠加和对比分析研究湿地变化,必然是一项持续、长期的研究工作。

在湿地变化驱动因子的研究中,由于研究时段、影响因子选择和分析方法的不同等原因,往往会得到不同的研究结果。如,李胜男等将 1950—2005 年黄河三角洲湿地面积与河流径流量、输沙量、气温和降水量进行回归分析与主成分分析,结果表明黄河三角洲湿地面积主要受河流径流量与输沙量的影响,并存在显著的正相关关系<sup>[35]</sup>;洪佳等通过构建 1973—2013 年黄河三角洲景观湿地化和人工化状态的表面湿地-人工状态指

数(SWCSI),并结合黄河入海水沙、区域降水以及地方生产总值、水产品产量和原盐产量,对黄河三角洲湿地景观演变驱动力进行了研究,结果表明黄河三角洲湿地景观变化是黄河水沙减少和人类活动加剧共同作用的结果<sup>[36]</sup>。本研究中,受影响因子数据获取的限制,仅选取了平均风速、降雨量、平均气温、平均日照时间、平均相对湿度、国内生产总值、人均国内生产总值、农业生产总值和人口数量9个因子来分析四川省湿地类型变化的驱动力,加之全省地域辽阔,不同市县的天然影响因子差异较大,因此要全面揭示四川省湿地变化的驱动力,还有待于进一步深入研究。

#### 4 结论

基于四川省2000—2015年2期湿地变化数据库和CCA排序分析方法,本研究得出以下结论:

(1)从2000年到2015年,四川省湿地变化面积705374 hm<sup>2</sup>,沼泽和河流湿地是每期湿地面积变化的主体,库塘是变化最大的湿地类型,湖泊湿地较为稳定。主要的变化类型是沼泽转化为非湿地、河流和非湿地转变为库塘。

(2)全省湿地类型的变化是自然和社会经济因素共同作用的结果,国内生产总值、平均气温和人口数量是湿地类型变化的主要驱动因子,能分别解释湿地变化的30.7%、16.6%和2.1%。随着国内生产总值的增加,沼泽湿地转化为非湿地的量减少,而且国内生产总值越高,非湿地和河流湿地转变为库塘的量越多;随着平均气温的增加,沼泽湿地转化为非湿地的面积增加。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Goodwin P, Mehta A J, Zedler J B. Tidal wetland restoration: an introduction. *Journal of Coastal Research*, 2001, 27: 1-6.
- [ 2 ] Ramachandra T V, Rajinikanth R, Ranjini V G. Economic valuation of wetlands. *Journal of Environmental Biology*, 2005, 26(2 Suppl): 439-447.
- [ 3 ] Cui B S, He Q, Gu B H, Bai J H, Liu X H. China's coastal wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, 2016, 36(1): 1-9.
- [ 4 ] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934-941.
- [ 5 ] An S Q, Li H B, Guan B H, Zhou C F, Wang Z S, Deng Z F, Zhi Y B, Liu Y H, Xu C, Fang S B, Jiang J H, Li H L. China's natural wetlands: past problems, current status, and future challenges. *Ambio*, 2007, 36(4): 335-343.
- [ 6 ] Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, Yao W B, Zhou D M, Zhao K Y, Zhao H, Li N N, Huang H B, Li C C, Yang J, Liu C X, Liu S, Wang L, Li Z, Yang Z Z, Qiao F, Zheng Y M, Chen Y L, Sheng Y W, Gao X H, Zhu W H, Wang W Q, Wang H, Weng Y L, Zhuang D F, Liu J Y, Luo Z C, Cheng X, Guo Z Q, Gong P. Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2813-2823.
- [ 7 ] Finlayson M, Cruz R D, Davidson N, Alder J, Cork S, de Groot R S, Lévêque C, Milton G R, Peterson G, Pritchard D, Ratner B D, Reid W V, Revenga C, Rivera M, Schutyser F, Siebentritt M, Stuij M, Tharme R, Butchard S, Dieme-Anting E, Gitay H, Raaymakers S, Taylor D. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. Washington DC: Island Press, 2005.
- [ 8 ] Niu Z G, Zhang H Y, Gong P. More protection for China's wetlands. *Nature*, 2011, 471(7338): 305.
- [ 9 ] 宫宁,牛振国,齐伟,张海英.中国湿地变化的驱动力分析. *遥感学报*, 2016, 20(2): 172-183.
- [ 10 ] 苏洁琼,王烜.气候变化对湿地景观格局的影响研究综述. *环境科学与技术*, 2012, 35(4): 74-81.
- [ 11 ] Withey P, Van Kooten G C. The effect of climate change on optimal wetlands and waterfowl management in Western Canada. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 798-805.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 孟焕,王琳,张仲胜,薛振山,吕宪国,邹元春.气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究. *湿地科学*, 2016, 14(5): 710-716.
- [ 14 ] 赵慧颖,乌力吉,郝文俊.气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响. *生态学报*, 2008, 28(3): 1064-1071.
- [ 15 ] 张敏,宫兆宁,赵文吉,阿多.近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. *生态学报*, 2016, 36(15): 4780-4791.
- [ 16 ] 王泉泉,王行,张卫国,王志保,肖德荣.滇西北高原湿地景观变化与人为、自然因子的相关性. *生态学报*, 2019, 39(2): 726-738.
- [ 17 ] 陈恣恣,刘俊国.黄旗河流域景观格局动态分析. *西北林学院学报*, 2014, 29(3): 165-170, 182-182.

- [18] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 王庆改, 陈辉. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化. 生态学报, 2008, 28(5): 2245-2252.
- [19] 邓茂林, 田昆, 杨永兴, 王进琼. 高原湿地若尔盖国家级自然保护区景观变化及其驱动力. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 58-62.
- [20] 汪学华, 田昆. 若尔盖湿地研究进展. 西南林业大学学报, 2015, 35(6): 104-110.
- [21] 王云川, 易桂花, 张廷斌, 别小娟, 王继斌, 孙姣姣. 近 35a 若尔盖高原泥炭沼泽变化趋势与驱动力分析. 干旱区研究, 2017, 34(2): 403-410.
- [22] 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 姚鹏举. 2007 年和 2016 年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化. 湿地科学, 2017, 15(4): 522-525.
- [23] 王元云, 何奕沂, 鞠佩君, 朱求安, 刘建亮, 陈槐. 层次分析法在若尔盖湿地退化研究中的应用. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 46-52.
- [24] 降初, 顾海军, 彭培好. 中国湿地资源·四川卷. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [25] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Ithaca: Microcomputer Power, 2002.
- [27] 徐晓龙, 王新军, 朱新萍, 贾宏涛, 韩东亮. 1996-2015 年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1897-1911.
- [28] Bao R, Alonso A, Delgado C, Pagés J L. Identification of the main driving mechanisms in the evolution of a small coastal wetland (Traba, Galicia, NW Spain) since its origin 5700 cal yr BP. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 247(3/4): 296-312.
- [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. 生态学报, 2019, 39(13): 4821-4831.
- [30] 孔令桥, 张路, 郑华, 徐卫华, 肖焱, 欧阳志云. 长江流域生态系统格局演变及驱动力. 生态学报, 2018, 38(3): 741-749.
- [31] Li S N, Wang G X, Deng W, Hu Y M, Hu W W. Influence of hydrology process on wetland landscape pattern: a case study in the Yellow River Delta. Ecological Engineering, 2009, 35(12): 1719-1726.
- [32] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 陈坤, 邓越, 陈征, 荔琢. 近 30 年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(12): 4492-4503.
- [33] Gong P, Niu Z G, Cheng X, Zhao K Y, Zhou D M, Guo J H, Liang L, Wang X F, Li D D, Huang H B, Wang Y, Wang K, Li W N, Wang X W, Ying Q, Yang Z Z, Ye Y F, Li Z, Zhuang D F, Chi Y B, Zhou H Z, Yan J. China's wetland change (1990-2000) determined by remote sensing. Science China Earth Sciences, 2010, 53(7): 1036-1042.
- [34] 李大冲, 许盼盼, 牛振国, 张海英. 历史专题图的大空间范围湿地专题图自动更新. 遥感学报, 2018, 22(6): 1060-1075.
- [35] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 胡远满. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响. 水科学进展, 2009, 20(3): 325-331.
- [36] 洪佳, 卢晓宁, 王玲玲. 1973—2013 年黄河三角洲湿地景观演变驱动力. 生态学报, 2016, 36(4): 924-935.