

1991—2020年若尔盖湿地景观格局演变分析

孙玉¹, 陈建华¹, 刘帅¹, 王炳乾¹, 唐翼鹏¹, 陈炯玲¹, 潘芸²

(1. 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059;

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 湿地是地球上最具生态功能的生态系统之一, 在保持水土、调节气候、保护物种多样性方面发挥着重要作用。笔者以若尔盖湿地为研究对象, 1991—2020年Landsat影像为研究数据, 基于最大似然法提取湿地信息, 后利用计算得到的景观格局指数以及景观组分面积转移矩阵对若尔盖湿地的景观格局进行演变分析。研究表明: ①受研究区特殊的地势条件影响, 研究区的湿地分布存在明显的空间差异。大面积的泥炭沼泽湿地分布在地势低洼的若尔盖县、玛曲县的东部以及红原县的北部区域。研究区东部的湿地呈上升的趋势, 而西部即靠近玛曲县东部的区域湿地面积明显下降。②1991—2020年研究区的湿地面积变化呈先减小后增大再缓慢下降的趋势, 湿地总体面积下降20 855.69 hm²。1991—2020年研究区湿地景观破碎度呈先减小后增大的趋势, 但总体景观破碎度呈上升。总体来看湿地景观破碎度变化较小, 若尔盖湿地总体景观格局未发生太大变化。③研究区核心景观基质为草甸, 景观组分的变化趋势是其他组分先一定面积转化为草甸后又小幅度恢复, 在草本沼泽的面积变化上表现较为突出。④气温升高降水量下降以及人类活动的干扰加速了若尔盖湿地由河流→湖泊→泥炭沼泽→草本沼泽→草甸→裸地发展方向演变。若尔盖湿地的退化并不是一个简单的自然过程, 而是在自然因素与人为因素共同作用下反馈的结果。

关键词: 若尔盖湿地; Landsat影像; 景观格局; 演变分析

中图分类号: P901

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.14

0 引言

森林、海洋、湿地组成地球上最重要的三大生态系统, 湿地作为生态系统能为生物生存环境提供丰富的生态价值与功能, 同时湿地生态系统具有保持水土、改善水质、调节气候、保护物种多样性等价值^[1]。若尔盖湿地是中国面积最广分布最集中的泥炭沼泽湿地, 其得天独厚的自然条件孕育了丰富的湿地景观。若尔盖湿地属于典型的高寒湿地, 境内水系密集以及丰富的地下水资源成为了黄河上游的

水源涵养区。随着高强度人类活动干扰、湿地资源开发过度以及气候的影响使若尔盖生态环境急剧恶化^[2], 表现为地表水和地下水水位下降、湖泊变浅、草甸沙化、湿地面积减少以及生物多样性下降^[3], 且若尔盖区域海拔高、植被单一、结构简单, 导致若尔盖湿地一遭破坏就很难恢复, 给我国带来巨大的生态危机。恢复湿地生态系统迫在眉睫, 保护和合理利用湿地成为全球研究的热点^[4-5]。

传统的湿地生态系统研究采用的研究手段仍是人工实地调查为主, 但该方式耗时费力、成本高, 无法在大尺度上对湿地生态环境进行监测。随着研究

收稿日期: 2023-02-21

基金项目: 四川省阿坝州科技计划项目(R21YYJSYJ0011)

第一作者: 孙玉(1995—), 女, 硕士, 主要从事空间分析模型与资源环境应用研究, E-mail: 1150879640@qq.com。

的深入以及技术的发展,研究手段过渡为以遥感技术为主野外踏勘为辅的方式。目前,为了对湿地进行科学的保护以及合理的利用,湿地研究学者从不同领域对湿地进行了大量研究^[6-8],且对湿地的研究较为深入,体系也相对完善,但在对湿地研究的时间分辨率、影像质量以及分类方法上仍存在待挖掘的地方。

景观格局广义上指不同属性的景观要素在空间上的分布。研究景观空间格局是研究景观生态演化过程的有效手段之一,从景观尺度评价与监测生态系统服务功能对促进景观可持续性发展具有重要意义^[9]。随着“3S”技术的发展,国内外对湿地景观格局的研究热度迅速上升^[10-12],越来越多的学者将遥感技术和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术应用到湿地动态监测中^[13-15]。RS(Remote Sensing, RS)技术为获取湿地资源环境信息提供有效的空间信息源, GIS 具有空间信息处理和空间分析功能,能对湿地系统进行空间定位和动态分析。

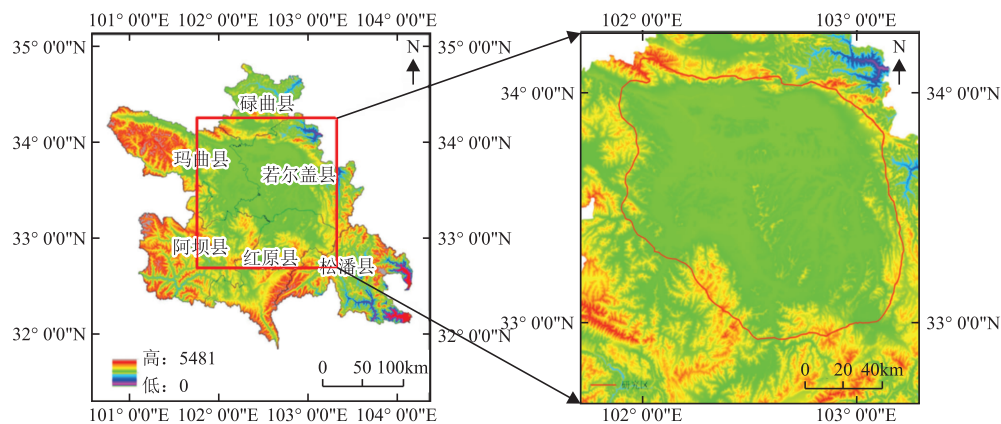
鉴于此,研究选用 Landsat 卫星影像作为基础数据源,根据研究区湿地地貌特点和属性特点建立湿地分类体系,采用最大似然法快速准确提取若尔盖湿地信息;选取景观格局指数对湿地景观格局变化进行分析,总结若尔盖湿地时空演变规律;最终为

保护和合理利用湿地提供科学决策与数据支撑。

1 研究区域数据

1.1 研究区概况

若尔盖湿地处于青藏高原东北缘,行政范围包含四川省的若尔盖县、红原县、松潘县、阿坝县和甘肃省的玛曲县、碌曲县,总面积达 166 570.6 hm²,大面积的沼泽湿地一般作用于板块作用带的边缘和构造盆地,若尔盖湿地也不例外,若尔盖湿地的形成是由于青藏高原的隆起形成一个相对沉降区构成了若尔盖盆地,使得区内地势平坦,四面群山环抱,海拔高度介于 3 422 m~3 697 m 之间(图 1)。其特殊的地势构造使若尔盖沼泽湿地成为青藏高原重要的生态蓄水池,也是黄河重要的水源涵养地^[16]。研究区气温寒冷,常年无夏,四季不明,最冷月(1 月)最热月(7 月)多年平均气温分别为-10.6 °C 和 10.8 °C,年平均气温 1.4 °C^[17]。降水多集中在 4 月下旬至 10 月中旬,年平均降水量 560 mm~860 mm。区内有丰富的沼泽动物群落,包含黑颈鹤、白鹤、黑鹳、金雕、玉带海雕等。由于气候原因区内植被类型较为单一,使得若尔盖湿地生态系统脆弱,受外界影响时,其自身调节机制差,恢复能力弱,生态环境遭到破坏时,会发生退化和逆向演替现象。



(结合数字高程模型,通过目视解译法将若尔盖湿地四周的山地进行剔除,将剔除后的影像数据范围即图中红色矢量边界线范围作为论文的研究区)

图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 数据来源

1991—2020 年研究区的遥感影像数据采集来自美国地质调查局网站(United States Geological Survey, USGS),卫星为美国陆地卫星(Landsat)系

列,考虑影像质量问题,云量控制在 0.35 以下,影像空间分辨率为 30 m。结合研究区的气候特点,遥感影像时间选择在非霜冻期的 5 月上旬至 10 月下旬。影像信息如表 1 所示。

表 1 影像信息
Tab. 1 Image information

年份	卫星	传感器	多光谱波段数	影像位深/bit
1991—2005	Landsat 5	TM	7	8
2011	Landsat 7	ETM	8	8
2015—2020	Landsat 8	OLI	9	16

1.3 数据处理

由于 Landsat 影像已经过辐射校正和几何校正处理,因此笔者仅对影像做辐射定标和大气校正,为保持影像数据位深、波段数一致,便于湿地特征信息提取,需对 Landsat 8 影像进行位深降低和剔除无用波段,对 Landsat 7 剔除无用波段,使用 6 个多光

谱波段即红波段、绿波段、蓝波段、近红外波段、短红外波段 1、短红外波段 2。最后将处理后的影像数据进行镶嵌裁剪得到实验所需的影像数据集。影像数据处理流程图如图 2 所示。

2 若尔盖湿地景观组分提取

2.1 若尔盖湿地景观分类

对若尔盖湿地建立科学的分类体系是湿地资源保护、管理检测以及研究若尔盖湿地时空演变的基础。研究参照国内外的分类体系根据若尔盖研究区的区域特点以及影像数据的解译程度对若尔盖湿地进行二级划分,分类体系如图 3 所示。

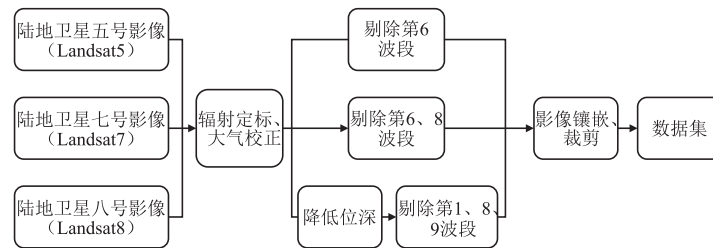


图 2 影像数据处理流程图

Fig. 2 Flow chart of image data processing

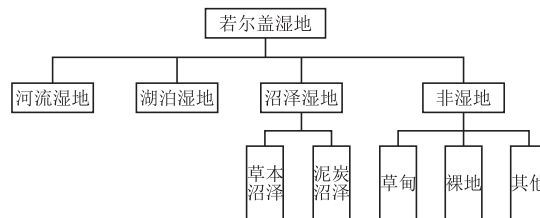


图 3 若尔盖湿地分类体系图

Fig. 3 Zoige wetland classification system diagram

2.2 若尔盖湿地景观提取

2.2.1 最大似然分类法

最大似然分类法是依据贝叶斯准则对遥感影像数据进行分类,是建立在极大似然原理基础上的一个统计分类方法。假设待分类遥感影像有向量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 将研究区分成 m 类 $w_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。根据贝叶斯公式,在 X 条件下,其属于第 w_i 的归属概率为^[18]:

$$T = \sum_{i=1}^m P(\mathbf{X}/w_i)P(w_i) \quad (1)$$

$$P(w_i/\mathbf{X}) = P(\mathbf{X}/w_i) \times P(w_i) / \sum_{i=1}^m P(\mathbf{X}/w_i)P(w_i) \quad (2)$$

其中 $P(w_i)$ 表示先验概率,指分类结果影像中类别

w_i 出现的概率值; $P(\mathbf{X}/w_i)$ 为似然概率,指在 w_i 类别中像元 X 出现的概率。

公式(1)中先验概率值 $P(w_i)$ 大小根据先验经验来确定。由于其值大小受分母值影像较小,做判断时可将其省略。因此,在做概率计算时求出 $P(\mathbf{X}/w_i)$ 即可求出归属概率值, $P(\mathbf{X}/w_i)$ 的参数值由训练样本决定。若训练样本数据在特征空间中呈高斯正态分布,则向量 \mathbf{X} 在第 w_i 类的条件概率密度函数为:

$$T = \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{X} - \mu_i)^T \sum_i^{-1} (\mathbf{X} - \mu_i) \right\} \quad (3)$$

$$P(\mathbf{W}/w_i) = \frac{1}{2 \Pi^{n/2} |\sum_i|^{1/2}} \times T \quad (4)$$

式中 μ_i 和 Σ_i 分别表示第 i 类训练样本的均值向量和协方差矩阵。

依据贝叶斯判别准则将待分类像元归属到归属概率最大的类别中,即 $P(\omega_i/\mathbf{X}) = \max(P(\omega/\mathbf{X}))$, 则 $\mathbf{X} \in \omega_i$ 。

影像分类结果的可信度可用生产者精度、用户精度和 $Kappa$ 系数来判别。生产者精度指该类别真实地面像元被正确分类的概率。用户精度代表被分类的像元能准确表示该类别的概率。 $Kappa$ 系数

用以评估分类结果影像与原始影像数据的一致性, $Kappa$ 系数值越大一致性越高。

2.2.2 若尔盖湿地提取结果

实验选用 1991 年、1995 年、2000 年、2005 年、2011 年、2015 年、2020 年的若尔盖影像数据作为实验数据。对研究区内湿地影像数据进行分类。分类结果如图 4 所示。对 1991—2020 年若尔盖湿地分类的结果进行精度验证,其平均分类精度如表 2 所示。

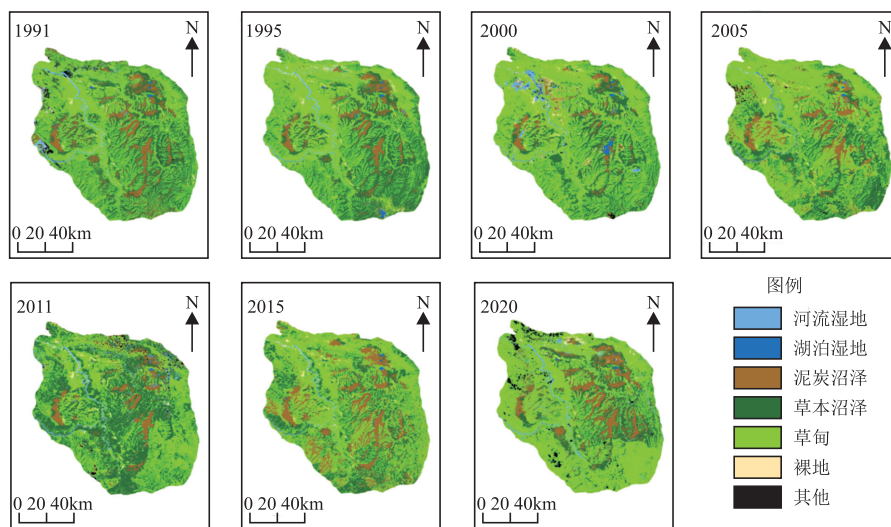


图 4 湿地分类结果图

Fig. 4 Wetland classification result chart

表 2 1991—2020 年若尔盖湿地平均分类精度

Tab. 2 Average classification accuracy of Zoige wetland from 1991 to 2020

	湖泊	河流	草本沼泽	泥炭沼泽	草甸	裸地	其他
用户精度	92.19	94.95	87.43	99.43	70.83	95.69	99.27
生产者精度	98.55	96.68	95.56	96.55	99.17	98.88	51.55
总体分类精度 = 144678/154866 = 93.42% $Kappa$ 系数 = 0.8758							

3 景观格局分析

3.1 景观格局指数选取

景观格局指数能高效浓缩景观空间格局的特征信息,又能反映各类别要素结构组成和空间配置相关的特征^[19],目前景观格局指数分析被广泛应用于景观生态学中^[20-22]。笔者根据研究内容选用了一些最能体现湿地景观格局变化特性的指数,在景观层面选取了景观面积(Total Area,

TA)、香农多样性指标(Shannon's Diversity Index, SHDI)、斑块数量(Number of Patches, NP)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、平均斑块面积(Area - Mean, $AREA_{MN}$)、聚合指数(Aggregation Index, AI)来反映湿地景观层面的空间分布特征。在类层面选取了斑块面积(Class Area, CA)、斑块面积百分比(Percent of Landscape, PLAND)、最大斑块指数、聚合指数、平均斑块面积来反映湿地各类别在空间中的分布特征。各景观指数含义如表 3 所示。

表 3 景观格局指数

Tab. 3 Landscape pattern index

指数类型	尺度水平	生态学意义	单位
CA	类型水平	某种类型斑块总面积	ha
PLAND	类型水平	某种类型斑块总面积与区域总面积比值	%
NP	类型水平/景观水平	斑块的个数或某一类景观斑块的个数	个
LPI	类型水平/景观水平	反映景观破碎化的程度,值越大则斑块连片的面积就越大	%
AI	类型水平/景观水平	反映斑块间的离散程度,值越小景观越离散	%
AREA _{MN}	类型水平/景观水平	反映斑块的平均面积大小	ha
TA	景观水平	表示一个景观的总面积	ha
SHDI	景观水平	反映景观异质性,SHDI 值就越大,不定性信息含量就越大	无

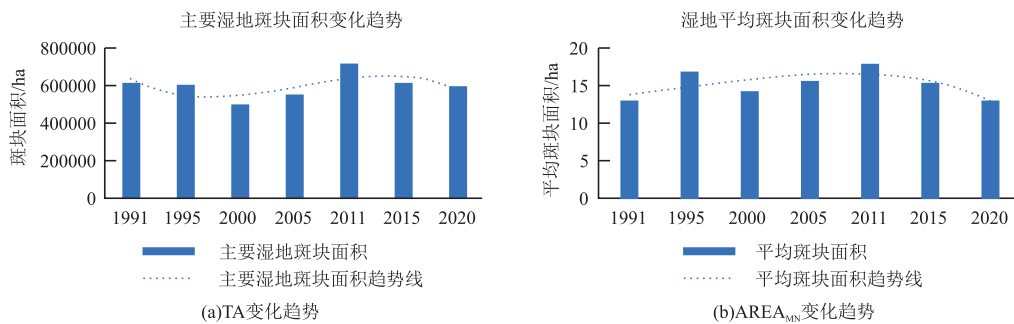
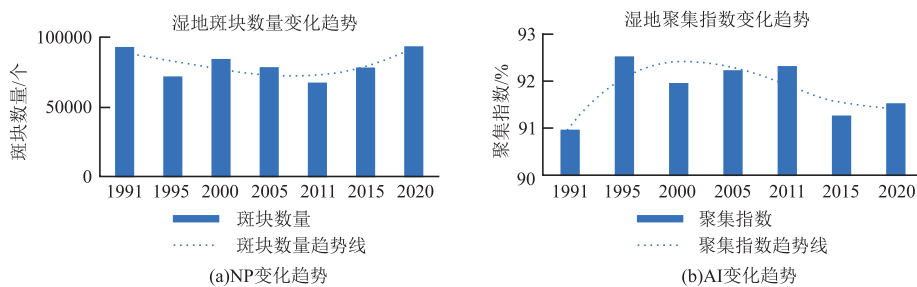
图 5 1991—2020 年湿地 TA、AREA_{MN} 变化趋势图Fig. 5 Change trend of wetland TA and AREA_{MN} from 1991 to 2020

图 6 1991—2020 年湿地 NP、AI 变化趋势图

Fig. 6 Change trend of wetland NP and AI from 1991 to 2020

3.2 景观格局指数分析

图 5(a)为 1991—2020 年若尔盖高原主要湿地类别面积的变化趋势图,即河流、湖泊、草本沼泽、泥炭沼泽湿地。由图可知 1991—2020 年湿地总面积变化趋势呈先下降再上升后下降,总体面积下降 20 855.69 hm²。图 5(b)可知 1991—2020 年湿地的平均斑块面积呈先上升后下降的趋势,总体变化趋于稳定。

图 6 可知 1991—2020 年若尔盖湿地的景观破碎度呈先下降后上升的趋势。且若尔盖湿地的聚集指数变化趋势与若尔盖湿地的离散性变化趋势相反,结论相互验证。

图 7 可知最大斑块指数变化趋势呈先上升后下

降,拐点出现在 2000 年。1991—2020 年间若尔盖湿地的异质性呈先减小后增加的趋势。

3.3 类层次景观格局分析

3.3.1 类层次景观格局指数分析

由图 8 可知,草本沼泽和草甸面积变化趋势较大,且多年来草本沼泽和草甸面积明显高于其他类别,说明草甸在若尔盖湿地生态系统中优势度最高,其次是草本沼泽、泥炭沼泽。

由图 9 可知 1991—2020 年草本沼泽、草甸、裸地斑块数量呈下降趋势,泥炭沼泽、河流斑块数量呈上升趋势,湖泊斑块数量趋于稳定。草本沼泽、泥炭沼泽、草甸是引起若尔盖湿地斑块变化的主要因素。

3.3.2 景观类型转移变化趋势

土地利用转移矩阵能够从整体上分析研究区域的土地利用变化的结构特征以及不同土地类型之间面积的转移情况^[23]。为了直观地分析若尔盖湿地景观组分的动态变化过程建立了土地利用转移模型,模型公式为^[24]:

$$S_{ij} = P_{ij} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (5)$$

式中: P_{ij} 为两时间点的景观组分 i 转换为景观组分 j 的转换概率; S_{ij} 表示景观组分 i 转变为景观组分 j 的面积(km^2)。

根据公式(6)计算得到各时间点的景观组分面积转移矩阵。表 4 可知 1991—1995 年河流近一半面积向内转移,向外转移中裸地、草甸面积占比最大,转移面积分别为 60.07 km^2 、 63.69 km^2 。湖泊向外转移的类别中,泥炭沼泽面积占比最大,转移面积为 7.83 km^2 。泥炭沼泽有 422.84 km^2 面积向草本沼泽转移,面积占比为 33.17% 。草本沼泽、草甸主要向内转移,向外转移的面积占比分别为 21.12% 、 15.67% 。裸地主要向草甸转移,转移面积为 54.77 km^2 。

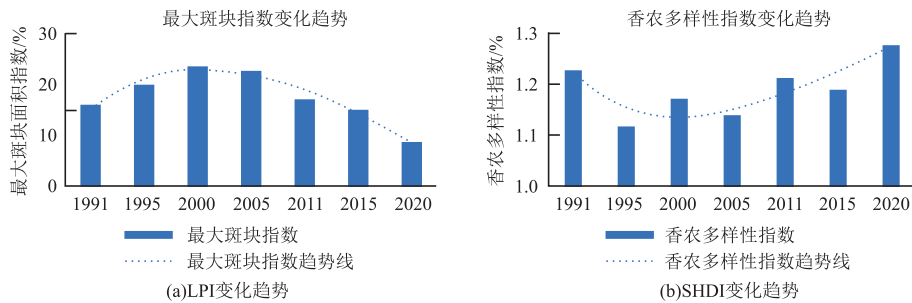


图 7 1991—2020 年湿地 LPI、SHDI 变化趋势

Fig. 7 Change trend of wetland LPI and SHDI from 1991 to 2020

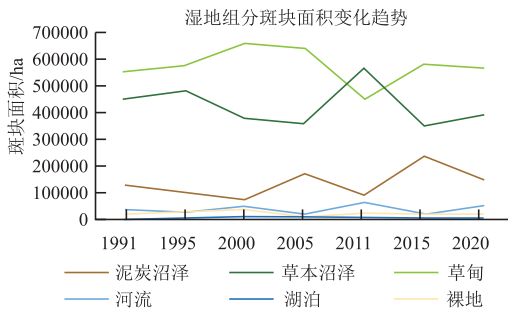


图 8 1991—2020 年湿地 CA 变化趋势图

Fig. 8 Change trend of wetland CA from 1991 to 2020

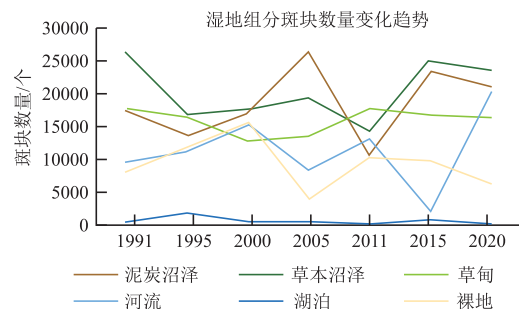


图 9 1991—2020 年湿地 NP 变化趋势图

Fig. 9 Change trend of wetland NP from 1991 to 2020

表 4 1991—1995 年湿地组分面积转移矩阵(km^2)

Tab. 4 Wetland component area transfer matrix from 1991 to 1995(km^2)

		1991 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
1995 年	河流	171.45	1.62	22.27	13.26	12.70	26.88	9.05
	湖泊	15.09	17.36	15.48	13.55	0.04	7.70	0.46
	泥炭沼泽	23.22	7.83	769.78	123.64	0.74	16.66	3.81
	草本沼泽	33.50	0.18	422.84	3 576.76	16.71	700.70	41.18
	裸地	60.07	0.46	19.90	25.34	90.50	52.13	17.13
	草甸	63.69	0.09	23.59	723.40	54.77	4 722.47	179.74
	其他	0.00	0.00	0.31	0.50	0.00	0.71	0.01

由表 5 可知,1995—2000 年间河流向外转移的主要类型为草甸,转移面积为 44.82 km^2 。湖泊向外转移的趋势较为明显,有 74.3% 的面积向外转移。泥炭沼泽向外转移中,草本沼泽转移面积占比

最大,转移面积为 389.9 km^2 。草本沼泽向草甸转移的面积同其他类型面积相比占比最大,转移面积为 $1 496.36 \text{ km}^2$ 。在裸地类别中向外转移面积最大的为草甸。草甸主要向内转移,向外转移趋势不

明显。

由表 6 可知河流向草甸转移的面积占比为 42.42%，大于其向内转移的面积。湖泊向泥炭沼泽转移的面积是其向内转移面积的四倍之多。泥炭沼泽向外转移的类别中主要转移为草甸，转移面积为

184.00 km²。草本沼泽主要表现为向内转移，有 836.1 km² 的草本沼泽转移为泥炭沼泽，760.48 km² 转移为草甸。裸地向草甸转移了 288.4 km² 大于其向内转移的面积。草甸向外转移的类别中草本沼泽尤为突出，转移面积为 1 286.04 km²

表 5 1995—2000 年湿地组分面积转移矩阵(km²)

Tab. 5 Wetland component area transfer matrix from 1995 to 2000(km²)

		1995 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
2000 年	河流	130.88	11.08	38.09	45.86	25.65	201.37	0.03
	湖泊	3.39	17.94	46.76	0.81	0.02	0.38	0.00
	泥炭沼泽	21.41	10.78	428.08	117.91	14.60	141.44	0.07
	草本沼泽	11.55	14.62	389.90	3 102.38	23.88	234.35	0.59
	裸地	21.21	0.38	7.51	24.31	92.05	246.76	0.00
	草甸	44.82	7.71	31.49	1 496.36	67.79	4 921.88	0.39
	其他	23.99	7.14	3.88	4.70	41.60	22.74	0.42

表 6 2000—2005 年湿地组分面积转移矩阵(km²)

Tab. 6 Wetland component area transfer matrix from 2000 to 2005(km²)

		2000 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
2005 年	河流	105.73	8.10	12.49	24.67	9.18	25.30	18.47
	湖泊	5.36	11.42	2.23	0.49	0.12	0.07	0.07
	泥炭沼泽	72.96	46.76	427.97	836.10	33.24	241.96	15.25
	草本沼泽	47.97	1.48	15.25	2 138.66	6.78	1 286.04	10.80
	裸地	17.58	0.04	1.87	1.46	52.11	21.39	32.42
	草甸	192.19	0.61	184.00	760.48	288.40	4 934.76	25.65
	其他	11.20	0.89	6.68	15.78	2.40	61.09	1.84

由表 7 可知河流主要表现为向内转移，向外转移的面积相对较少。湖泊主要向内转移，但有 35.26% 面积的湖泊转化为河流。泥炭沼泽主要表现为向外转移，向外转移的类别中有 694.09 km²

转移为草本沼泽，279.28 km² 转移为草甸。草本沼泽、裸地主要表现为向内转移，向外转移的突出类别均为草甸面积占比最大。草甸向草本沼泽转移的面积占比最大。

表 7 2005—2011 年湿地组分面积转移矩阵(km²)

Tab. 7 Wetland component area transfer matrix from 2005 to 2011(km²)

		2005 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
2011 年	河流	130.24	6.97	100.32	98.47	7.84	258.77	13.57
	湖泊	0.29	7.95	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03
	泥炭沼泽	13.64	4.22	541.27	145.19	2.55	191.43	2.83
	草本沼泽	23.24	0.19	694.09	2 630.72	2.01	2 265.26	46.88
	裸地	17.27	0.24	39.24	11.55	93.72	94.15	1.78
	草甸	17.12	0.07	279.28	676.10	19.09	3 477.36	33.57
	其他	2.11	0.11	19.92	28.22	1.67	98.62	1.17

由表 8 可知河流主要表现为向外转移,其中草甸的面积占比最大,其次为草本沼泽。湖泊、泥炭沼泽、草甸均主要表现为向内转移,向外转移面积较少。草本沼泽、裸地向外转移的类别中草甸面积占比最大。

由表 9 可知河流表现为向内转移。湖泊主要向

泥炭沼泽、草本沼泽转移,面积占比分别为 50.35%、15.20%。泥炭沼泽主要向草本沼泽、草甸转移,面积占比分别为 36.17%、22.6%。草本沼泽向外转移面积占比最大的类别为草甸。裸地向草甸和河流转移的面积占比较大,分别为 31.31%、22.21%。

表 8 2011—2015 年湿地组分面积转移矩阵(km²)

Tab. 8 Wetland component area transfer matrix from 2011 to 2015(km²)

		2011 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
2015 年	河流	135.36	0.19	8.32	8.65	11.51	3.83	1.32
	湖泊	6.40	8.13	17.10	3.06	0.20	0.03	0.34
	泥炭沼泽	92.60	0.01	620.28	1 106.91	23.90	488.16	33.22
	草本沼泽	137.97	0	81.44	2 545.33	10.79	701.30	32.09
	裸地	20.87	0	14.67	8.97	131.0	33.70	3.77
	草甸	222.79	0	159.13	1 983.28	80.42	3 264.38	81.05
	其他	0.20	0	0.17	6.22	0.09	11.21	0.01

表 9 2015—2020 年湿地组分面积转移矩阵(km²)

Tab. 9 Wetland component area transfer matrix from 2015 to 2020(km²)

		2015 年						
		河流	湖泊	泥炭沼泽	草本沼泽	裸地	草甸	其他
2020 年	河流	149.99	1.48	69.37	65.79	47.33	171.21	0.61
	湖泊	1.22	10.55	1.1	0.09	0.16	0.1	0
	泥炭沼泽	10.08	17.77	850.2	459.78	7.36	148.42	1.4
	草本沼泽	4.31	5.36	855.75	1 577.64	6.84	1 458.87	5.17
	裸地	0.14	0.05	22.17	10.06	65.64	85.67	0.07
	草甸	0.78	0	534.62	1 319.25	66.71	3 742.57	10.52
	其他	2.71	0.07	31.93	76.44	18.96	184.69	0.19

4 讨论

湿地的空间分布方面,受研究区特殊的地势条件影响,研究区的湿地分布存在明显的空间差异。大面积的泥炭沼泽湿地分布在地势低洼的若尔盖县、玛曲县的东部以及红原县的北部区域。大部分草本沼泽湿地是由泥炭沼泽退化而来其上广泛孕育着水生植物,主要分布在区内河流流经的土壤湿地大的区域以及泥炭沼泽的边缘。区内水系密集贯穿了整个研究区,且多为闭流,有利于湿地的孕育。研究区东部的湿地呈上升的趋势,而西部即靠近玛曲县东部的区域湿地面积明显下降,可能是受早期人工开渠以及鼠虫害的影响,破坏了土壤的结构,使得该地区的干旱程度提升造成湿地大面积退化。

景观尺度方面,1991—2020 年间湿地面积变化

呈现三个趋势,1991—2000 年间湿地面积开始下降,2000—2011 年间湿地面积开始回弹呈上升趋势,2011—2020 年湿地面积又开始缓慢下降,拐点出现在 2000 年和 2011 年。1991—2020 年湿地总体面积下降 20 855.69 hm²。从湿地面积的时间变化上看可以看出研究区内土壤湿度总体出现“减—增—减”的趋势。1991—2020 年间若尔盖湿地景观破碎度呈先减小后增大的趋势,但总体景观破碎度呈上升。从类尺度上看,1991—2020 年间湿地组分的斑块面积大小排序为草甸>草本沼泽>泥炭沼泽>河流>裸地>湖泊。1991—2020 年间湿地组分斑块数量大小排序为草本沼泽>泥炭沼泽>河流>草甸>裸地>湖泊。草甸的斑块面积远大于其他类别且在研究区内成片分布,连接性好。说明草甸是若尔盖湿地生态系统中的优势度最高的种群,其次是草本沼泽、泥炭沼泽。1991—2020 年湿地景观破碎

度变化较小,说明若尔盖湿地总体景观格局未发生太大变化。

动态变化方面,1991—2020年研究区内景观组分的变化趋势是,其他景观组分先大面积转化为草甸后又小幅度恢复,其中草本沼泽转化为草甸的趋势尤为明显并且存在泥炭沼泽向草本沼泽过渡的趋势,主要集中在研究区的东北和西南方位。

驱动因子方面,近几十年若尔盖气候变化呈暖干化趋势,气温以 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速率上升,受气候影响降水量以 $17.19\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的变化速率下降^[25],有学者认为气温上升和增加的蒸发蒸腾量是导致若尔盖湿地退化的主要原因。早年牧民的过度放牧、大规模的挖渠排水再加上研究区内含有丰富的旅游资源包含若尔盖湿地保护区、漫泽塘湿地、花湖以及日干乔湿地等,以及近年来当地政府大力推进民俗旅游业态发展,导致当地游客量增多,诸多因素共同作用加速了若尔盖湿地的退化。

鉴于湿地的复杂性以及演化过程的持续性,研究仍存在一些不足之处。遥感数据获取湿地的局限性,研究使用空间分辨率为 30 m 的 Landsat 影像作为数据源对每期影像进行人工解译,绘制不同湿地类别的矢量边界,建立湿地类型数据库,数据精度超过 95% 以上,湖泊、河流的数据精度近乎 100%,但是草本沼泽、泥炭沼泽、草甸本身解译标志较模糊导致勾绘的湿地边界与实际边界存在差异,从而影响了湿地的总体分类精度。在今后的研究中可尝试使用高分卫星数据、MODIS 影像等多源遥感数据进行研究以提高数据精度。实验在湿地演变时间跨度确定上采用跳跃选取的方式,该方式容易错过研究区域真实的演变规律,得出错误的结论,在之后的研究中可选择每年一期影像进行湿地分类从而对若尔盖湿地进行高时间分辨率的湿地演变研究。

5 结论

笔者以若尔盖湿地为研究对象,1991—2020年间 Landsat 影像为研究数据,根据研究区湿地特点提出若尔盖高原湿地分类体系,基于最大似然法对研究区影像进行监督分类,对不同层面的景观格局指数以及景观类型转移矩阵进行分析,得到若尔盖高原湿地空间格局时空演变规律。实验表明,若尔盖湿地主要分布在若尔盖县、玛曲县的东部以及红原县的北部,从分布特征上看地势低洼水含量大以及河流流域有利于湿地的形成。若尔盖地区的湿地

总面积在缩减,湿地景观破碎度在上升,景观优势度在下降,湿地呈退缩的趋势。研究区核心景观基质为草甸,景观组分的变化趋势是,其他组分先大面积转化为草甸后又小幅度恢复,在草本沼泽的面积变化上较为突出。大规模的人工沟渠、过度放牧以及旅游业的大力发展加速了若尔盖湿地由河流→湖泊→泥炭沼泽→草本沼泽→草甸→沙化的方向演化。若尔盖湿地的退化并不是一个简单的自然过程,而是在自然因素与人为因素共同作用下的结果。近几十年,随着经济的发展湿地资源的过度开采以及全球气候的变化,湿地面积已大面积萎缩,对湿地进行保护已刻不容缓。若尔盖湿地是我国面积最大最集中的泥炭沼泽湿地,其内泥炭土壤强大的储碳能力对减缓全球气候变化具有重要贡献^[26],因此研究长时序的若尔盖湿地演化规律对当地政府对湿地保护决策有着举足轻重的作用。

参考文献:

- [1] PELLETIER M C, TOCOCK M, MACDONALD D H, et al. Does information matter in the value of a wetland? [J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2022, 65(7): 1323—1348.
- [2] 蒋桂芹, 毕黎明, 贺逸清. 若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12688—12694.
JIANG G Q, BI L M, HE Y Q. Spatiotemporal variation of water conservation and its influencing factors in zoigê wetland[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12688—12694. (In Chinese)
- [3] 杨阳, 张亦. 我国湿地研究现状与发展[J]. *水污染防治*, 2014, 10(01): 43—50.
YANG Y, ZHANG Y. Current situation and development of wetland research in China[J]. *Prevention and control of water pollution*, 2014, 10(01): 43—50. (In Chinese)
- [4] 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 Z W, WANG Z Y, ZHANG C D, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruoergai swamp[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 172—180. (In Chinese)
- [5] 姜焯, 孙建国, 谢家丽, 等. 近 20a 若尔盖湿地水土流失变化的遥感评估[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 1088—1093.
JIANG Y, SUN J G, XIE J L, et al. Remote sensing assessment of water and soil loss changes of zoigê wet-

- land in last 20 years[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 1088—1093. (In Chinese)
- [6] 张一然,文小航,罗斯琼,等. 近 20 年若尔盖湿地植被覆盖变化与气候因子关系研究[J]. *高原气象*, 2022, 41(2): 317—327.
ZHANG Y R, WEN X H, LUO S Q, et al. Study on the relationship between vegetation cover change and climate factors in zoige wetland in recent 20 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 317—327. (In Chinese)
- [7] 侯静,侯鹏,陈妍,等. 近 15 年来若尔盖地区土壤湿度变化特征及驱动分析[J]. *环境生态学*, 2019, 1(7): 67—71.
HOU J, HOU P, CHEN Y, et al. Characteristics of soil moisture changes and analysis of driving factors in Ruoergai Region during 2001—2015[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(7): 67—71. (In Chinese)
- [8] 侯蒙京,殷建鹏,葛静,等. 基于随机森林的高寒湿地地区土地覆盖遥感分类方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 220—227.
HOU M J, YIN J P, GE J, et al. Land cover remote sensing classification method of alpine wetland region based on random forest algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 220—227. (In Chinese)
- [9] 赵文武,房学宁. 景观可持续性景观可持续性科学[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2453—2459.
ZHAO W W, FANG X N. Landscape sustainability and landscape sustainability science[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2453—2459. (In Chinese)
- [10] LI Z W, WANG Z Y, BRIERLEY G, et al. Shrinkage of the Ruoergai Swamp and changes to landscape connectivity, Qinghai—Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2015, 126: 155—163.
- [11] LI W L, XUE P F, LIU C L, et al. Monitoring and landscape dynamic analysis of alpine wetland area based on multiple algorithms: A case study of zoige plateau[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7315.
- [12] 宁晓刚,常文涛,王浩,等. 联合 GEE 与多源遥感数据的黑龙江流域沼泽湿地信息提取[J]. *遥感学报*, 2022, 26(2): 386—396.
NING X G, CHANG W T, WANG H, et al. Extraction of marsh wetland in Heilongjiang Basin based on GEE and multi—source remote sensing data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(2): 386—396. (In Chinese)
- [13] ZHOU K. Wetland landscape pattern evolution and prediction in the Yellow River Delta[J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(8): 190.
- [14] ZHAN W, CHENG H F, SHEN S Y. Simulation and prediction of Zhuzhou urban wetland landscape pattern based on LCM model[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2021, 20(2): 447—458.
- [15] QUINTERO C J, COHEN M J. Scale—dependent patterning of wetland depressions in a low—relief Karst landscape[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, 124(8): 2101—2117.
- [16] 李国明,刘江,李胜,等. 若尔盖湿地近 25 年湿地变化及分形特征分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(7): 34—36.
LI G M, LIU J, LI S, et al. Fractal characteristics analysis of wetland changes of Ruoergai wetland nearly 25 years[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40(7): 34—36. (In Chinese)
- [17] 王艳. 若尔盖湿地遥感动态监测与景观格局分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
WANG Y. Remote sensing dynamic monitoring and landscape pattern analyse on wetland resource in ruoergai[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (In Chinese)
- [18] 刘怀鹏,安慧君. 利用最大似然法识别呼和浩特市绿化树种[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(7): 157—160.
LIU H P, AN H J. Maximum likelihood in identifying huhhot greening tree species[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(7): 157—160. (In Chinese)
- [19] 王晶,李国庆,丁鹏凯,等. 若尔盖湿地景观与生态功能变化主导因子分析[J]. *人民黄河*, 2016, 38(5): 77—81.
WANG J, LI G Q, DING P K, et al. Zoige area wetland landscape and ecological function changes influenced by the dominant factors[J]. *Yellow River*, 2016, 38(5): 77—81. (In Chinese)
- [20] JIANG P H, CHENG L, LI M C, et al. Analysis of landscape fragmentation processes and driving forces in wetlands in arid areas: A case study of the middle reaches of the Heihe River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 46: 240—252.
- [21] DJODJIC F, GERANMAYEH P, COLLENTINE D, et al. Cost effectiveness of nutrient retention in constructed wetlands at a landscape level[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116325.
- [22] 冯佳,董鑫,赵姗姗. 四川省若尔盖保护区景观生态格局动态分析[J]. *四川林业科技*, 2021, 42(1): 52—

- 59.
- FENG J, DONG X, ZHAO S S. Dynamic analysis of landscape ecological pattern in zoige nature reserve, Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2021, 42(1): 52—59. (In Chinese)
- [23] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544—1550.
- LIU R, ZHU D L. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544—1550. (In Chinese)
- [24] 张建国, 李晶晶, 殷宝库, 等. 基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 131—134.
- ZHANG J G, LI J J, YIN B K, et al. Evaluation of land use change of jungar banner based on land use transfer matrix[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 131—134. (In Chinese)
- [25] 游宇驰, 李志威, 李希来. 1990—2011年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 62—69.
- YOU Y C, LI Z W, LI X L. Land cover change in Zoige Plateau during 1990—2011[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 62—69. (In Chinese)
- [26] JOVANI—SANCHO A J, CUMMINS T, BYRNE K A. Soil respiration partitioning in afforested temperate peatlands[J]. Biogeochemistry, 2018, 141(1): 1—21.

Analysis of Zoige wetland landscape pattern evolution from 1991 to 2020

SUN Yu¹, CHEN Jianhua¹, LIU Shuai¹, WANG Bingqian¹,
TANG Yipeng¹, CHEN Jiongling¹, PAN Yun²

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A wetland is one of the most ecologically functional ecosystems on the earth and plays an important role in water and soil conservation, climate regulation, and species diversity protection. This paper takes Zoige wetland as the research object, Landsat images from 1991 to 2020 as the research data, extracts wetland information based on the maximum likelihood method and then uses the calculated landscape pattern index and landscape component area transfer matrix to analyze the landscape pattern evolution of Zoige wetland. The research shows that: 1) Due to the particular terrain conditions in the study area, there are significant spatial differences in the distribution of wetlands in the study area. Large peat swamp wetlands are distributed in the low-lying areas of Zoige County, the east of Maqu County, and the north of Hongyuan County. The wetland area in the east of the study area shows an upward trend, while the wetland area in the west, which is close to the east of Maqu County, is significantly lower. 2) From 1991 to 2020, the wetland area change in the study area showed a trend of first decreasing, then increasing, then slowly decreasing, and the total wetland area decreased by 20 855.69 hectares. From 1991 to 2020, the fragmentation degree of the wetland landscape in the study area decreased and then increased, but the overall fragmentation degree of the landscape increased. In general, the change in wetland landscape fragmentation is small, and the overall landscape pattern of Zoige wetland has not changed much. 3) The core landscape matrix in the study area is meadow, and the change trend of landscape components is that other components first convert into meadow in a specific area and then recover slightly, which is more prominent in the area change of herbaceous marsh. 4) The increase in temperature and the decrease in precipitation, as well as the interference of human activities, accelerated the development of Zoige wetland from river → lake → peat swamp → herbaceous swamp → meadow → bare land. The degradation of Zoige wetland is not a simple natural process but a feedback result under the joint action of natural and human factors.

Keywords: Zoige wetland; Landsat image; landscape pattern; evolutionary analysis