

黄河首曲玛曲县高寒湿地景观格局演变

薛鹏飞^{1,2} 李文龙^{1,2*} 朱高峰³ 周华坤⁴ 刘陈立^{1,2} 晏和飘^{1,2}

¹草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000; ²兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业教育部工程研究中心, 兰州 730000; ³兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; ⁴中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008

摘要 高寒湿地是青藏高原地区最重要的生态水源涵养区之一, 也是局部气候的有效调节者, 其动态变化与成因的研究亟待深入。该研究基于遥感图像分析、地理信息系统空间分析和景观生态指数分析结合的方法, 以黄河首曲玛曲县高寒湿地为研究对象, 对1995–2018年6期湿地的动态变化进行研究。结果表明, 研究区湿地在1995–2010年间不断退化, 1995–2010年湿地面积总共减少了18 680.31 hm²。在2010–2018年间黄河首曲高寒湿地面积有所增加, 但与20世纪90年代相比, 21世纪初开始湿地的面积普遍呈现下降趋势; 1995–2010年湿地斑块数不断增加, 斑块密度不断增大, 平均斑块面积下降, 景观的破碎度升高; 2010–2015年湿地斑块数和斑块密度减少, 2015–2018年湿地斑块数和斑块密度增加, 平均斑块面积先增大后减小, 景观的破碎度先降低后升高。1995–2010年研究区高寒湿地景观Shannon多样性指数和Shannon均匀度指数均呈现下降的趋势, 湿地的景观结构趋于简单, 景观类型分布更加集中。2010–2018年湿地景观Shannon多样性指数和Shannon均匀度指数均呈现上升趋势, 湿地的景观结构趋于复杂, 景观类型增加且分布更加分散。进一步的驱动力分析表明, 引起黄河首曲高寒湿地景观格局演变的主要因素是蒸发量和降水量, 其次是人口数量和大牲畜数量等人类活动影响。气候因子是影响黄河首曲高寒湿地面积变化的主要原因, 过度的人类经济活动在一定程度上加剧了湿地的变化。

关键词 高寒湿地; 景观格局; 随机森林算法; 驱动力分析; 湿地变化

薛鹏飞, 李文龙, 朱高峰, 周华坤, 刘陈立, 晏和飘 (2021). 黄河首曲玛曲县高寒湿地景观格局演变. 植物生态学报, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0288

Changes in the pattern of an alpine wetland landscape in Maqu County in the first meander of the Yellow River

XUE Peng-Fei^{1,2}, LI Wen-Long^{1,2*}, ZHU Gao-Feng³, ZHOU Hua-Kun⁴, LIU Chen-Li^{1,2}, and YAN He-Piao^{1,2}

¹State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; ²Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou University; Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; ³College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; and ⁴Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract

Aims The alpine wetland is one of the most important sites for ecological and water conservation in Qingzang Plateau, and also an effective regulator of the local climate. Research is needed to understand the dynamics and drivers of changes in this alpine wetland landscape.

Methods This study was conducted with combination of methods in remote sensing image analysis, GIS spatial analysis and landscape attributes analysis. Changes in the alpine wetland patterns in Maqu County, which is located in the first meander of the Yellow River, was determined for six periodic samplings from 1995 to 2018.

Important findings The alpine wetland area in Maqu County continuously degraded from 1995 to 2010, and decreased by 18 680.31 hm² over the period. From 2010 to 2018, the wetland area increased. Compared with the level in 1990s, the wetland area has generally declined since the beginning of the 21st century. From 1995 to 2010, the patch number and density of the wetland increased continuously, but the average patch size decreased, with increased degree of landscape fragmentation. In contrast, from 2010 to 2015, the patch number and density of wetland decreased. From 2015 to 2018, the patch number and density of wetland increased, and the average patch size first increased and then decreased, with the landscape fragmentation first decreased and then increased.

收稿日期Received: 2020-08-21 接受日期Accepted: 2021-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406602)、国家自然科学基金(41471450)、中央高校基本科研业务费学科交叉创新团队建设项目 (lzujbky-2021)、现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-34)和青海省自然科学基金(2019-ZJ-908)。Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFC0406602), the National Natural Science Foundation of China (41471450), the Fundamental Research Fund for the Central Universities (lzujbky-2021), the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-34), and the Natural Science Foundation of Qinghai Province (2019-ZJ-908).

* 通信作者Corresponding author (wllee@lzu.edu.cn)

Both the Shannon diversity index and evenness index showed a downward trend from 1995 to 2010; the landscape structure tended to be simpler and the distribution of landscape types became more clustered. From 2010 to 2018, the Shannon diversity and evenness indices showed an upward trend; the landscape structure tended to be more complex, and the landscape types became more diverse and dispersed. Further analyses revealed that the main factors driving the changes in the alpine wetland landscape patterns in the first meander of the Yellow River are evaporation and precipitation, followed by human activities such as the population and the quantity of large livestock. Climate is the main factor driving the changes in the alpine wetland area in the first meander of the Yellow River. Intensive human economic activities have aggravated the wetland changes to some extent.

Key words alpine wetland; landscape pattern; random forest algorithm; driving force analysis; wetland change

Xue PF, Li WL, Zhu GF, Zhou HK, Liu CL, Yan HP (2021). Changes in the pattern of an alpine wetland landscape in Maqu County in the first meander of the Yellow River. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 00-00. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0288

湿地是地球上最重要的三大生态系统(森林、海洋、湿地)之一,是陆生生态系统和水生生态系统之间交错的一种过渡生态系统(何菊红, 2016)。按照国际湿地公约的定义,湿地指天然或人工、长久或暂时之沼泽地、湿原或水域地带,带有静止或流动,或为淡水、半咸水或咸水河流者,包括低潮时水深不超过6 m的水域(Wolfson *et al.*, 2002; 李文龙等, 2009)。湿地至少覆盖了地球表面积的6%,它们对环境变化敏感,是环境变化的重要指示器(彭飞, 2012),在水文和生物地球化学循环中扮演着重要的角色。湿地为人类提供了多种服务,具有补充地下水、调节气候、控制土壤、保护物种基因,稳固环境等重要的生态功能(Brinson & Malvarez, 2002; Mitra *et al.*, 2005; Verhoeven *et al.*, 2007; Junk *et al.*, 2013),为野生动物和渔业资源提供栖息地以及提供美学价值、精神消费等文化功能。

青藏高原是我国重要的湿地分布区,其湿地面积达到了 $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ (邢宇等, 2009),占全国湿地面积的20% (赵志龙等, 2014)。黄河首曲湿地是该区域典型的面积较大的高寒湿地,是中国特有的高寒湿地生态系统的代表,素有黄河“蓄水池”之称,是黄河上游地区重要的水源涵养地和补给区。首曲高寒湿地对周围内陆淡水资源的补给、气候调控、稳定流域内生态系统的平衡有着重要的作用(高跃鹏, 2019),其景观格局的变化一直以来是该区域湿地研究领域的重点,因此首曲湿地的退化和缺失会对当地的水资源涵养、植被生态系统演替及景观格局造成严重的影响(褚琳等, 2014)。胡小柯等(2012)从景观水平上研究黄河源区首曲高寒湿地景观空间分布格局的动态变化过程,发现1994–2008年间首曲高寒湿地斑块间隙越来越大,破碎化程度逐步加深。张志达(2012)以人工目视解译与计算机自动分

类相结合的方法对首曲湿地进行专题信息提取和分类,并对主要湿地类型的时空分布、景观特征和植被指数进行系统深入分析。

综上,湿地变化是一个受自然条件、人类活动等因素的综合作用的长期过程,而以往关于首曲湿地的研究基本侧重于较短时间(5–10年)或非等时间间隔的景观格局的变化,同时,以往研究缺少对湿地变化成因的有效分析,无法有效揭示高寒湿地变化的内在机制,且大多研究(胡小柯等, 2012; 张志达, 2012; 褚琳等, 2014)是在较短时间尺度来分析湿地的景观格局特征,这不利于解释研究时间段内湿地景观格局的演变规律。基于此,本文综合了遥感技术和景观动态模拟以及统计学的方法,研究首曲高寒湿地较长时间尺度上等时间间隔的景观格局演变,并分析造成景观格局演变的可能成因。研究结果对解释高寒湿地变化的成因有一定的通用性,对于研究高寒湿地的变化及有效保护具有重要的意义。

1 研究区概况

研究区黄河首曲湿地(图1)是典型的青藏高原高寒湿地,位于甘南藏族自治州西南部的玛曲县,地理坐标为 100.77° – 102.48° E, 33.10° – 34.38° N。全县总面积 $10\,109.67 \text{ km}^2$,海拔在 $3\,226$ – $4\,786 \text{ m}$ 之间,地势西高东低,由西北向东南倾斜。玛曲县境内黄河河长 433 km ,是该地区湿地水资源最主要的来源,素有黄河“蓄水池”和“中华水塔”的称号(伏怡萱等, 2014)。

2 数据和研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文所采用的遥感数据是在USGS上下载的

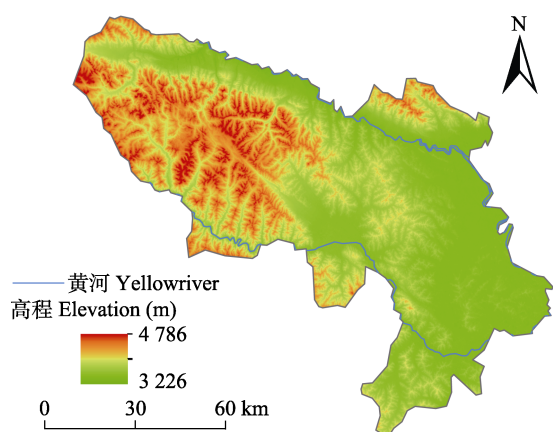


图1 玛曲县高寒湿地示意图。
Fig. 1 Sketch map of the alpine wetland in Maqu County.

landsat5和landsat8数据影像,行列号在WRS-2参考系统中分别为131/036、131/037、132/036、132/037,每期完整图由4景影像拼接形成。为了便于湿地信息的提取,选择遥感数据时将数据时相限定为7–10月,选择质量良好,云量较少的影像,云量较多时选择2景同期影像叠加去云。通过ENVI5.3进行镶嵌裁剪、辐射定标、大气校正等预处理。气象数据收集玛曲气象台站1990–2018的观测数据,数据来源于“中国气象局数据中心”。人口数量、牲畜数量、国内生产总值、第一、二、三产业产值、人均国内生产总值等统计数据来源于《甘肃省统计年鉴》。

2.2 样本选取

在参考近20年(1998–2018)野外调查数据和同时期Google Earth影像的基础下,通过ArcGIS 10.6在Landsat影像上选择和生成样本,共选择湿地样本750个,非湿地样本2250个,组成训练样本集。

2.3 分类特征构建

本文选取的图像分类特征变量共21个,其中光谱特征7个,地形特征3个,缨帽变换特征3个,纹理特征2个,遥感指数特征6个。

光谱特征为Landsat影像输出的7个波段(band 1–band 7)。地形特征为DEM高程数据以及基于地形分析得到的坡度(SLOPE)和坡向(ASPECT)。缨帽变换特征选取变换后的前3个分量信息,分别为亮度指数(BI)、绿度指数(GI)和湿地指数(WI)。纹理特征通过灰度共生矩阵计算影像7个波段的8种纹理特征,得到56个纹理特征变量,使用主成分分析对数据降维,最终选择前两个主成分作为纹理特征。遥感指数分别选择了改进归一化水体指数(MNDWI)、差值植

被指数(DVI)、比值植被指数(RVI)、红色植被指数(RI)、归一化差异绿度指数(NDGI)、归一化差异植被指数(NDVI)。

2.4 分类方法

传统的机器学习算法,如决策树、支持向量机等都是单个分类器,有性能提升的瓶颈以及过度拟合的问题。随机森林算法作为多分类器集成算法,在噪声和异常值处理方面有较好的效果,在高维数据分类方法有很好的扩展性和并行性,被广泛应用于各领域(王奕森和夏树涛,2018)。在土地利用分类时,选择合适训练样本的情况下,利用随机森林方法可获得较高的遥感土地利用分类精度(周正龙等,2020);左晓庆等(2020)基于遥感影像的光谱波段、光谱指数和纹理特征相结合,构成多种特征组合进行随机森林算法分类比较,研究表明采用多源特征组合的随机森林算法的土地利用分类效果最佳。以往的土地分类研究大多应用于城区和山地,很少关注高寒地区。基于此,本研究选取与湿地分类相关的特征参数,通过随机森林算法进行高寒湿地的分类。

分类后的结果产生的孤岛效应通过分类后处理主要分析消除,结合野外实际调查信息和DEM高程数据对分类结果进行补充和修正。最终得到1995–2018年6期研究区范围的湿地分类解译图(图2)。

2.5 精度验证

本研究基于野外实际调查数据和高分辨率Google Earth影像选择验证样本集,建立混淆矩阵,利用kappa系数和总体精度对6期分类结果进行验证。精度结果表1显示分类结果能够满足空间分析和实际应用需求。

2.6 景观指数的选取与计算

景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某些方面特征的指标(邬建国,2007),可以用来定量描述和监测景观空间结构随时间的变化(白军红等,2008)。景观格局指数可以分为斑块水平指数、斑块类型水平指数以及景观

表1 遥感数据分类结果的Kappa系数与总体精度
Table 1 Kappa coefficient and overall accuracy of the classification results of remote sensing data

	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Kappa系数 Kappa coefficient(%)	88.0	90.0	86.5	89.5	92.0	87.0
总体精度 Accuracy	0.80	0.84	0.81	0.83	0.87	0.81

水平指数(黄茜等, 2014)。斑块水平指数是作为计算其他景观指数的基础, 斑块类型水平指数和景观水平指数对于描述和理解景观中不同斑块类型以及整体景观格局的特征具有重要的意义。根据本文的研究需要和各景观指数的生态学意义, 选取的景观指数有斑块面积指数、斑块类型所占景观面积比例指数、斑块数、斑块密度、平均斑块面积、景观多样性指数、景观均匀度指数。利用Fragstats 4.2软件, 进行景观指数的计算。

2.7 蒸发量计算公式

本研究采用气象因子(年平均气温、降水量和蒸发量)分析首曲高寒湿地面积变化的特征。气温和降水量数据来源于玛曲气象台站1990–2018年的实测数据。蒸发量数据是利用气象站逐月气温和降水量数据, 参照文献公式(郭洁和李国平, 2007; 甄硕等, 2016)计算而得出, 其计算公式为:

$$E = \frac{3100R}{\left(3100 + 1.8R^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235.0 + T}\right)\right)}$$

式中, E 为月蒸发量(mm); R 为月降水量(mm); T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$)

2.8 灰色关联度分析

基于灰色理论的灰色关联分析方法, 可以确定系统各因素之间对系统发展趋势的影响程度。关联度越大, 表明各因素对系统的发展趋势影响越大; 反之, 则影响越小(余翠, 2017)。灰色关联度计算公式如下:

(1)原始数据序列包括特征目标序列(x_0)和相关因素序(x_i)。

$$x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$$

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad i = 1, \dots, k$$

(2)关联系数计算

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i(\Delta_i(\min)) + 0.5\max_i(\Delta_i(\max))}{|x_0(k) - x_i(k)| + 0.5\max_i(\Delta_i(\max))}$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为第 k 个时刻相关因素序列 x_i 与特征目标序列 x_0 的相对差值, 称为 x_i 对 x_0 在 k 时刻的关联系数; 0.5为分辨系数; $\min_i(\Delta_i(\min))$ 为两个层次的最小差值; $\max_i(\Delta_i(\max))$ 为两个层次的最大差值。

(3)灰色关联度计算

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$$

式中, r_i 为特征目标序列(x_0)与相关因素序列(x_i)的关

联度。

3 研究结果

3.1 首曲湿地景观格局动态变化

通过对研究区1995、2000、2005、2010、2015、2018年6期湿地信息进行统计分析, 发现1995–2010年间首曲高寒湿地面积逐年减少, 2010–2018年间首曲高寒湿地面积逐年增加。由表2可以看出, 湿地面积从1995年的84 795.84 hm^2 减少到2010年的66 115.53 hm^2 , 15年间共减少了18 680.31 hm^2 , 减少幅度达到22.03%之多; 景观比率也从1995年8.877%下降到2010年的6.922%。斑块数量由1995年的759个增加到2010年的1 142个。湿地面积从2010年的66 115.53 hm^2 增加到2018年的74 498.13 hm^2 , 8年间共增加了8 382.6 hm^2 , 但与1995年相比, 湿地面积仍减少12.14%。

为进一步分析湿地面积变化, 按照斑块面积的大小将所有斑块分成了4级, 分别统计各级湿地总面积并采用当期面积相比上一期面积增加(或减少)的比例来具体表现不同小组湿地面积的动态变化。以湿地面积变化转折的2010年为界, 从统计结果表3分析得出, 2010年湿地面积较1995年在面积 $<50 \text{hm}^2$ 和50–1 000 hm^2 的级别上分别增加55.2%和10.6%, 而在1 000–10 000 hm^2 和 $>10 000 \text{hm}^2$ 的级别上分别下降17.9%和45.8%。大斑块向小斑块之间的转化伴随着小斑块的消失是这15年以来湿地面积减少的主要类型。2000年1 000–10 000 hm^2 级别湿地面积大幅降低, $<50 \text{hm}^2$ 、50–1 000 hm^2 的小斑块面积相对1995年反而增加, 这表明1 000–10 000 hm^2 的类型向 $<50 \text{hm}^2$ 、50–1 000 hm^2 转化是该时期的主要转化形式。2018年湿地面积较2010年主要的变化在1 000–10 000 hm^2 级别增加40.4%, 其余级别分别增

表2 玛曲县高寒湿地不同时期景观动态变化

Table 2 Dynamics of changes in alpine wetland in Maqu County

年 Year	斑块数 Patch number	面积 Area (hm^2)	景观比率 Landscape ratio (%)	以1995年为基准期减少百分比 Percentage reduction by base period (1995) (%)
1995	759	84 795.84	8.877	—
2000	860	73 574.91	7.702	13.24
2005	931	71 817.84	7.518	15.30
2010	1 142	66 115.53	6.922	22.03
2015	662	71 530.11	7.488	15.64
2018	786	74 498.13	7.792	12.14

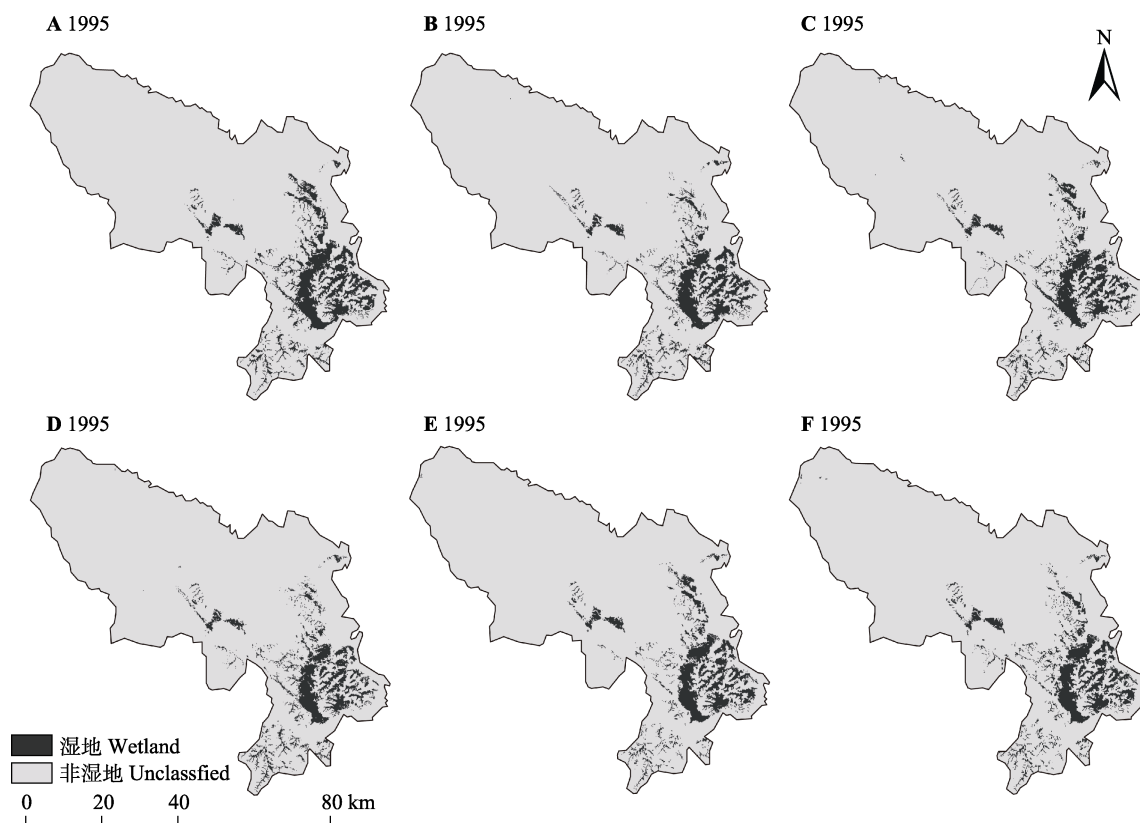


图2 玛曲县不同时期高寒湿地分布图。

Fig. 2 Distribution of alpine wetland in Maqu County at different times.

表3 1995–2018年玛曲县高寒湿地面积组成

Table 3 Area components of the alpine wetland in Maqu County during 1995–2018

	1995	2000	2005	2010	2015	2018
<50 hm ²	3 734.37	5 078.52 (+36.0%)	4 307.67 (−15.2%)	5 796.99 (+34.6%)	4 956.39 (−14.5%)	6 114.60 (+23.4%)
50–1 000 hm ²	17 723.34	21 753.54 (+22.7%)	17 647.92 (−18.9%)	19 600.56 (+11.1%)	14 940.45 (−23.8%)	18 917.73 (+26.6%)
1 000–10 000 hm ²	22 844.25	8 843.40 (−61.3%)	19 358.64 (+118.9%)	18 758.34 (−3.1%)	27 581.04 (+47.0%)	26 336.97 (−4.5%)
>10 000 hm ²	40 493.88	37 899.45 (−6.4%)	30 503.61 (−19.5%)	21 959.64 (−28.0%)	23 013.00 (+4.8%)	23 128.83 (+0.5%)
合计 Total	84 795.84	73 574.91 (−13.2%)	71 817.84 (−2.4%)	66 115.53 (−7.9%)	70 490.88 (+6.6%)	74 498.13 (+5.7%)

5.32% (>10 000 hm²)。小斑块向大斑块之间的转化是这8年以来湿地面积增加的主要形式。

3.1.1 湿地的景观破碎化

斑块数、平均斑块面积、斑块密度可以用来综合反映湿地的景观破碎化程度，斑块数越多，平均斑块面积越小，斑块密度越大，景观的破碎度越高；反之，则景观的破碎度越低。结合表2和图3可以看出，1995–2018年首曲高寒湿地景观的斑块数和斑块密度指数总体变化趋势一致，平均斑块面积指数呈现相反的变化趋势。其中1995–2010年湿地斑块数不断增加，斑块密度不断增大，平均斑块面积下降，说明每km²的斑块数目增加，景观的破碎度升高；

2010–2015年湿地斑块数和斑块密度减少，2015–2018年湿地斑块数和斑块密度增加，平均斑块面积先增大后减少，说明景观的破碎度先降低后升高。

3.1.2 湿地的景观多样性

景观多样性的大小取决于斑块类型的多少和各斑块类型在面积上分布的均匀程度，随着多样性指数的增大，景观结构组成趋于复杂。均匀度指数反映景观中各斑块在面积上分布的不均匀程度，均匀度指数越小，景观的斑块分布越不均匀。由图4可以看出，1995–2010年首曲高寒湿地景观Shannon多样性指数和Shannon均匀度指数均呈现下降的趋势，说明湿地面积持续减少，导致湿地面积和非湿地面

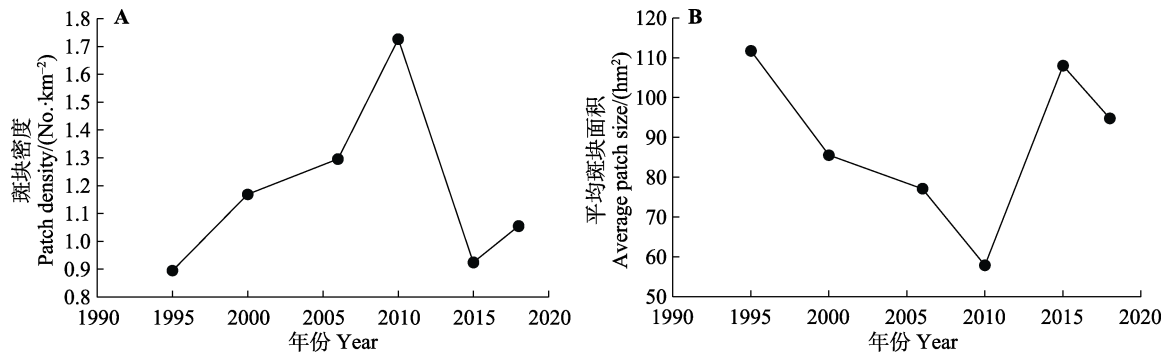


图3 玛曲县高寒湿地斑块密度(A)和平均斑块面积(B)。
Fig. 3 Patch density (A) and Mean patch size (B) of the alpine wetland in Maqu County.

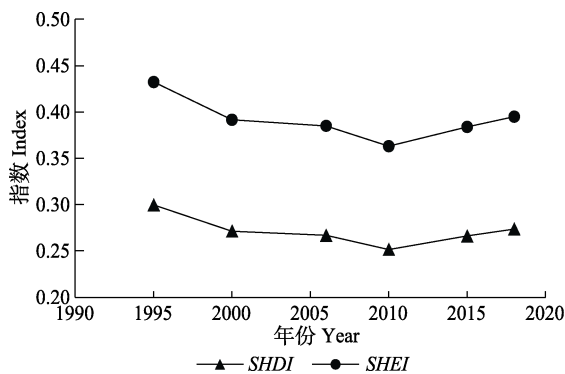


图4 玛曲县高寒湿地Shannon多样性指数(SHDI)和Shannon均匀度指数(SHEI)。
Fig. 4 Shannon's diversity (SHDI) and evenness indices (SHEI) of the alpine wetland in Maqu County.

积的差异愈来愈大,湿地的景观结构趋于简单,各斑块在面积上分布更加不均,景观类型分布更加集中。2010–2018年首曲高寒湿地景观Shannon多样性指数和Shannon均匀度指数均呈现略微上升的趋势。说明湿地面积持续增加,湿地面积和非湿地面积的差异愈来愈小,湿地的景观结构趋于复杂,各斑块在面积上分布更加均匀,景观类型分布更加分散。

3.2 湿地演变的驱动力

3.2.1 主要气候因子

玛曲的年平均气温、年降水量和年蒸发量见图5,此处的蒸发量为近地面空气蒸发量,因台站位于草地,故此处的蒸发量数据仅供参考,温度上升为主要考虑的因素。28年间研究区的年平均气温呈现明显升高的趋势,1990–2018年研究区的年降水量基本保持稳定,变化趋势平稳,呈现上升趋势,2018年降水量794.7 mm,远高于28年来的平均值599.5 mm,2015–2018年降水量增速为近些年来最大值;玛曲年蒸发量增加趋势不明显。

3.2.2 人类经济活动影响

畜牧业是首曲地区传统的支柱产业,畜牧业的发展变化可以通过牲畜头数的变化表现出来。从表4中可以看出,牲畜数量在1995–2010年间快速增长。牲畜数量的增加意味着生产和生活用水的增加,也意味着对草原的掠夺增加。牲畜数量在2010–2018年间逐渐下降,这应该与当地的退耕还林政策实施进展情况相关。

首曲地区人均国内生产总值持续上升,2018年达到了人均2.878万元,由表4可以看出,1995年开始首曲当地的人均GDP上升趋势加快,经济加速发展,产业结构趋于合理化,第一产业比重持续降低,第三产业比重增大,第二产业逐步趋于稳定,GDP的增长主要是由第三产业的增加引起的。虽然牧业是该区的传统产业,农林牧渔业生产总值不断增加,但在GDP中所占的比重不断下降,首曲的产业结构正在发生改变,逐渐趋于合理化。

3.3 灰色关联度分析

为了进一步探讨首曲高寒湿地景观格局变化与影响因素之间的关系,利用灰色关联分析对影响湿地景观格局变化的因素进行分析,计算了湿地景观格局变化与主要气候因子和人类经济活动因素之间的灰色关联度。由表5可知,蒸发量和年降水量对首曲高寒湿地面积的影响最大,其次是该地区人口数量和牲畜存栏数量的增加和年平均气温,一、二、三产业也在一定程度上影响首曲高寒湿地景观格局的变化。

4 讨论

1995–2010年间首曲高寒湿地不断退化,面积逐年减小。2010–2018年间首曲高寒湿地面积逐年增

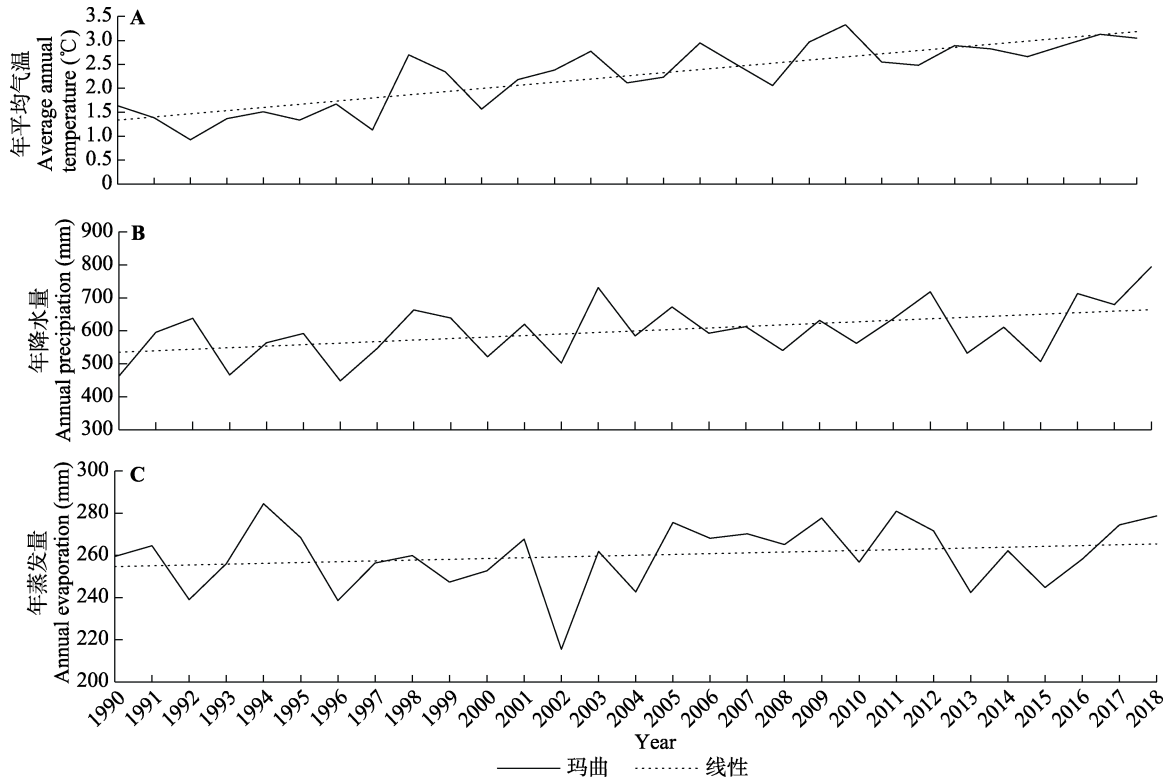


图5 玛曲县高寒湿地年平均气温(A)、年降水量(B)和年蒸发量(C)趋势。

Fig. 5 Trends of annual average temperature (A), annual precipitation (B) and annual evaporation (C) of the alpine wetland in Maqu County.

表4 玛曲县高寒湿地各产业总值及其产业结构

Table 4 Total values of economic production and the structure of industrial types in the alpine wetland in Maqu County

Year 年	国内生产总值 Gross domestic product (10 ⁴ yuan)	第一产业值 Primary industry (10 ⁴ yuan)	第二产业值 Secondary industry (10 ⁴ yuan)	第三产业值 Tertiary industry (10 ⁴ yuan)	产业结构 Industrial structure (%)	Population 人口数量	牲畜数量 Number of livestock (10 ⁴)	人均生产总值 Per capita GDP (10 ⁴ yuan)
1995	13 961	8 541	3 563	1 857	61/26/13	31 745	60.71	0.422 7
2000	23 751	10 394	9 620	3 737	44/41/15	37 100	68.09	0.632 2
2005	42 750	12 433	20 470	9 847	29/48/23	45 100	78.17	0.954 2
2010	95 165	28 269	34 998	31 898	30/37/33	51 400	105.10	1.853 3
2015	134 546	46 826	23 610	64 128	35/18/49	52 040	100.10	2.364 9
2018	172 886	77 898	16 615	78 373	45/10/45	58 200	94.10	2.878 0

表5 玛曲县高寒湿地面积与各影响因子的关联度和关联顺序

Table 5 Correlativeness and ranking of correlation between wetland area and various influencing factors in the alpine wetland in Maqu County

影响因子 Influencing factor	年蒸发量 Annual evaporation	年降水量 Annual precipitation	总人口 Total population	大型动物存栏数 Large livestock inventory	年平均气温 Average annual temperature	第一产业 Primary industry	第二产业 Secondary industry	第三产业 Tertiary industry
相关系数 Correlativeness	0.929	0.849	0.802	0.795	0.738	0.658	0.582	0.512
排序 Sort	1	2	3	4	5	6	7	8

加,但与90年代相比,湿地减少情况依旧严峻。结合湿地面积组成(表3),1995–2010年湿地面积的减少主要类型是大斑块向小斑块之间的转化伴随着小斑块的消失;2010–2018年湿地面积的增加主要类型是小斑块向大斑块的转化。

28年间首曲的年平均气温呈现升高的趋势,

1995–2010年年均气温增长趋势明显超过2010–2018年,降水量基本保持稳定,变化趋势平稳,呈现上升趋势,蒸发量在这15年之中呈现先下降后上升的趋势,在2005年之后达到较高水平,这与2005–2010年湿地面积减少幅度较大有关;2010–2018年间,平均气温增幅放缓,此时降雨量开始上升,蒸发量在

这几年呈现一个较低的水平,同时,首曲的牲畜数量在2010年开始呈现较为明显的下降趋势,这样的气候因子变化加之载畜量的下降是湿地面积上升的主要原因。灰色关联度进一步表明降水量、蒸发量是导致首曲湿地景观格局变化的主要因素。

由表2可知,2005–2010年湿地退化面积相对于1995–2005年有所减少。结合表4可知,首曲产业结构逐渐趋于合理化,这主要是由于2003年实施了《草原法》,2008年环境部发布的《全国生态功能区划》将若尔盖高原地区划分为水源涵养重要区,《草原法》的实施和《全国生态功能区划》的发布,促进了一系列生态保护措施的制定,如实施生态移民工程,调整政策产业结构,发展生态旅游等。这些政策的实施对湿地的退化起到了一定的缓解作用,阻止了湿地生态系统的进一步恶化。湿地退化主要受蒸发量、年降水量、人口数量和牲畜存栏量的影响,2005–2010年人口和牲畜存栏数量上升趋势最快,2010年当地牲畜存栏量达到最大值。2010–2018牲畜数量出现下降趋势,且人口数量上升速度放缓,故2010年之后,湿地面积有所增加。

结合表4可知,2005年以后该区域经济增长加快,第三产业的比重增加。该区域旅游业的发展,促进了当地交通、住宿以及餐饮等服务业的发展,旅游人数的增加,导致该区域人口压力过大,这在一定程度上导致该地区资源消耗的急剧增加以及对湿地资源的掠夺和破坏。相关研究表明,首曲载畜量已经严重超出草地的实际载畜能力,2007年玛曲县超载率72%(秦冬梅和冯今,2014)。虽然首曲产业结构趋于合理化,但由表4、表5可知,相对于气象因素,第一、二、三产业对湿地景观格局的影响较小。2010–2018年首曲的人口数量趋于稳定,年降水量增速较快,蒸发量相对减少,2018年牲畜存栏量较2015年下降11万头,这些使玛曲湿地面积得以增加,但与20世纪90年代相比,该地区水资源的供需矛盾依然较严重,湿地退化形势依然相当严峻。

5 结论

本研究主要结论如下:

(1) 1995–2010年间黄河首曲高寒湿地面积逐年减少,湿地退化严重。

(2) 2010–2018年间黄河首曲高寒湿地面积有所增加,但与20世纪90年代相比,湿地面积减少的情

况依旧严峻。

(3) 近20年间,湿地景观破碎度整体呈现先升高后降低的趋势,景观多样性呈现先下降后上升的趋势。

(4) 气候因子是影响首曲高寒湿地面积变化的主要原因,人类过度的经济活动在一定程度上加剧了湿地的退化。

由于高寒湿地独特的区域资源性和生态脆弱性,在二次青藏科学考察项目支持下,对高寒湿地的变化及驱动力进行深入研究具有重要的实际价值和科学意义。研究表明,在今后高寒湿地的利用和保护中应加强合理政策导向,提高湿地保护区的综合管理水平,科学地保护性利用湿地资源;改进湿地区域的产业结构,限制工业发展,推进现代节水节能型产业发展,防止传统工业用水和用地对湿地资源的破坏;引导生态放牧,严格控制载畜量,同时配合轮牧、定牧等措施,缓解湿地及周边草场压力。研究结果将为相关高寒湿地、草地的保护及可持续发展提供科学依据。

致谢 感谢中国科学院西北高原生物研究所生态研究中心开放课题(2020-KF-09)资助。

参考文献

- Bai JH, Ouyang H, Wang QG, Ding QY, Gao HF (2008). Application of Apack software on analyzing spatial pattern of wetland landscape on the Zoige Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 16, 1253–1256. [白军红, 欧阳华, 王庆改, 丁秋祎, 高海峰 (2008). 基于Apack的若尔盖高原湿地景观空间格局分析. *中国生态农业学报*, 16, 1253–1256.]
- Brinson M, Malvarez AI (2002). Temperate freshwater wetlands: types, status and threats. *Environmental Conservation*, 29, 115–133.
- Chu L, Huang C, Liu GH, Liu QS (2014). Changes in ecological patterns of Maqu alpine wetland in Yellow River Source Area during 2000–2010. *Progress in Geography*, 33, 326–335. [褚琳, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生 (2014). 2000–2010年黄河源玛曲高寒湿地生态格局变化. *地理科学进展*, 33, 326–335.]
- Fu YX, Zhao J, Li W (2014). Ecological sensitivity assessment of Maqu wetland in upper Yellow River. *Yellow River*, 36(1), 65–66, 70. [伏怡萱, 赵军, 李巍 (2014). 黄河上游玛曲湿地生态敏感性评估. *人民黄河*, 36(1), 65–66, 70.]
- Gao YP (2019). *Study on Degradation Evolution Process and Restoration Priority of Maqu Alpine Wetland in Gannan*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University,

- Beijing. [高跃鹏 (2019). 甘南玛曲高寒湿地退化演化过程及恢复优先性研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Guo J, Li GP (2007). Climate change in Zoigê plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation. *Plateau Meteorology*, 26, 422-428. [郭洁, 李国平 (2007). 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响. 高原气象, 26, 422-428.]
- He JH (2016). *Monitoring Wetland Change and Driving Factor Analysis from 2000 to 2014 in Zoigê*. Master degree dissertation, Chengdu University of Technology, Chengdu. [何菊红 (2016). 2000—2014年若尔盖湿地变化监测及驱动因子分析. 硕士学位论文, 成都理工大学, 成都.]
- Hu XK, Wei HD, Chen F, Xu XY, Zhou JH, Tang JN (2012). Dynamic changes of alpine-cold wetland landscape in Maqu County in the Yellow River source region. *Journal of Southwest Forestry University*, 32(6), 43-47. [胡小柯, 魏怀东, 陈芳, 徐先英, 周坚华, 唐进年 (2012). 黄河源区玛曲县高寒湿地景观动态变化. 西南林业大学学报, 32(6), 43-47.]
- Huang Q, Lan L, Yang WN, Deng DZ, Yan WX (2014). Analysis of landscape pattern changes of alpine wetland in Zoigê. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 35(6), 60-63. [黄茜, 蓝岚, 杨武年, 邓东周, 鄢武先 (2014). 若尔盖高寒湿地景观格局变化分析. 四川林业科技, 35(6), 60-63.]
- Junk WJ, An SQ, Finlayson CM, Gopal B, Květ J, Mitchell SA, Mitsch WJ, Robarts RD (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 75, 151-167.
- Li WL, Wang J, Guo SM, Wang Y (2009). Dynamic change of marsh landscape patterns and its driving forces in Maqu. *Pratacultural Science*, 26(8), 57-62. [李文龙, 王晶, 郭述茂, 王莺 (2009). 玛曲沼泽湿地景观格局变化研究及驱动力分析. 草业科学, 26(8), 57-62.]
- Mitra S, Wassmann R, Vlek PLG (2005). An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 88, 25-35.
- Peng F (2012). *Soff Moisture Quantitative Study of the Nanhui Tidal Flat in the Yangtze River Estuary*. Master degree dissertation, Shanghai Ocean University, Shanghai. [彭飞 (2012). 长江口南汇潮滩土壤湿度遥感研究. 硕士学位论文, 上海海洋大学, 上海.]
- Qin DM, Feng J (2014). Study on natural grassland production potential and livestock capacity in Gannan. *China Herbivore Science*, 34(5), 40-42. [秦冬梅, 冯今 (2014). 甘南天然草地生产潜力与载畜量研究. 中国草食动物科学, 34(5), 40-42.]
- Verhoeven JTA, Arheimer B, Yin CQ, Hefting MM (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 96-103.
- Wang YS, Xia ST (2018). A survey of random forests algorithms. *Information and Communications Technologies*, 12, 49-55. [王奕森, 夏树涛 (2018). 集成学习之随机森林算法综述. 信息通信技术, 12, 49-55.]
- Wolfson L, Mokma D, Schultink G, Dersch E (2002). Development and use of a wetlands information system for assessing wetland functions. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 7, 207-216.
- Wu JG (2007). *Landscape Ecology*. 2nd ed. Higher Education Press, Beijing. 106-107. [郭建国 (2007). 景观生态学. 2版. 高等教育出版社, 北京. 106-107.]
- Xing Y (2015). Spatial responses of wetland change to climate in 32 years in Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing for Land & Resources*, 27(3), 99-107. [邢宇 (2015). 青藏高原32年湿地对气候变化的空间响应. 国土资源遥感, 27(3), 99-107.]
- Yu C (2017). *Sustainable Development of the Tibetan Plateau Based on the Energy Ecological Footprint Model—Taking Qinghai and Tibet as an Example*. Master degree dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [余翠 (2017). 基于能值生态足迹模型的青藏高原地区可持续发展研究——以青海省、西藏自治区为例. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Zhang ZD (2012). *Dynamic Monitoring of Maqu Wetland Based on 3S Technology*. Master degree dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [张志达 (2012). 基于3S的玛曲湿地动态监测研究. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Zhao ZL, Zhang YL, Liu LS, Liu FG, Zhang HF (2014). Advances in research on wetlands of the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 33, 1218-1230. [赵志龙, 张懿锂, 刘林山, 刘峰贵, 张海峰 (2014). 青藏高原湿地研究进展. 地理科学进展, 33, 1218-1230.]
- Zhen SH, Suolang D, Dong L, Yao P, Zheng R (2016). Analysis on climate change characteristics of Zoige Plateau during 1967–2014. *Journal of Southwest Forestry University*, 36(5), 138-143. [甄硕, 索朗夺尔基, 董李勤, 姚鹏举, 郑茹敏 (2016). 若尔盖高原1967–2014年气候变化特征分析. 西南林业大学学报, 36(5), 138-143.]
- Zhou ZL, Sha JM, Fan YX, Shuai C, Gao S (2020). Remote sensing land usage classification and landscape pattern analysis based on random forest. *Computer Systems & Applications*, 29(2), 40-48. [周正龙, 沙晋明, 范跃新, 帅晨, 高尚 (2020). 基于随机森林的遥感土地利用分类及景观格局分析. 计算机系统应用, 29(2), 40-48.]
- Zuo XQ, LI XY, Liu HP (2020). Research on urban land cover classification based on random forest algorithm. *Journal of the Hebei Academy of Sciences*, 37(1), 8-16. [左晓庆, 李潇雨, 刘怀鹏 (2020). 基于随机森林算法的城区土地覆盖分类研究. 河北省科学院学报, 37(1), 8-16.]

责任编辑: 曾波 责任编辑: 李敏