

武汉城市圈湿地受损程度识别及驱动因素分析

彭凯锋^{1,2}, 蒋卫国^{1,2}, 邓越^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理学学部, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 基于 1995-2015 年的 5 期土地利用数据和连续时间序列的水体数据集, 探究武汉城市圈湿地受损程度及其对应的水体变化特征, 并使用 Logistic 模型进一步揭示湿地受损的驱动机制。结果表明: (1) 1995-2015 年, 武汉城市圈湿地面积呈先增加后减少的趋势, 其面积减少了 665.15 km²。湿地受损区域大多分布在武汉市、黄陂县、仙桃市等, 主要是由建设用地、旱地侵占湿地引起的; 湿地恢复区域大多分布在仙桃市、武汉市, 主要表现为由水田向功能湿地转变。(2) 20 年来, 湿地的变化与其水体的退化或增长变化特征相似, 即湿地受损区的水体面积减少, 湿地恢复区的水体面积增加。(3) Logistic 回归表明, 建设用地、降雨、GDP 是影响湿地受损风险的主要因子, 其中人类活动是湿地受损的主要因素。

关键词: 武汉城市圈; 湿地受损; 水体; 驱动因素

湿地是陆地与水体共同作用形成的一种生态系统^[1-2], 不仅能够为许多动植物提供栖息地, 同时在蓄洪防旱、调节气候、分解污染物等方面发挥重要作用^[3-4]。近年来, 由于全球气候变化以及人类活动的影响, 湿地生态系统在空间和类型上发生了很大的变化, 湿地状况总体呈退化趋势^[5-6]。因此, 科学认知湿地景观的演变规律, 并进一步探究湿地退化的驱动因素, 对于湿地生态系统保护、科学管理与规划具有重要意义。

遥感技术由于其覆盖范围大、重访周期短、空间分辨率高等优势, 已成为湿地资源调查与动态变化监测的重要手段^[7-8]。湿地景观演变及其驱动因素分析是遥感应用研究的热点之一。Sica 等^[9]研究了阿根廷帕兰河下游三角洲的土地利用变化对湿地退化的影响, 并对湿地退化的驱动因子进行分析。Ballanti 等^[10]使用多时相遥感影像和面向对象方法, 分析尼斯夸利河三角洲的湿地信息的时空变化。国内学者针对湿地景观的研究起步较晚, 但也取得了丰富的研究成果。毛德华等^[11]对东北地区的湿地景观演变进行分析, 并探究了气候因素和人类活动因素对湿地变化的影响。吕金霞等^[12]基于土地利用遥感解译数据, 分析了京津冀地区湿地景观演变及其驱动因素。宫宁等^[13]使用地理加权回归和遥感解译数据, 探究了 1978-2008 年间中国湿地变化的驱动机制。马学奎等^[14]分析了 6 个时期长江三角洲滨海湿地景观变化, 并进一步探究了湿地变化的驱动因素。

武汉城市圈处于长江中下游^[15], 湿地资源丰富, 其中武汉市更是有“千湖之城”的美誉。然而在中国经济快速发展的背景下, 武汉城市圈的湿地状况呈退化趋势^[16-17]。以往

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-06-02

项目基金: 国家自然科学基金项目 (41571077); 国家重点研发计划 (2016YFC0503002)

作者简介: 彭凯锋 (1991-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事生态变化与湿地遥感研究。

E-mail: pengkaifeng@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 蒋卫国 (1976-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 主要从事水文遥感大数据分析、洪水灾害监测评价及湿地生态空间模拟研究。E-mail: jiangweigu@bnu.edu.cn

的研究多着重于湿地类型的时空变化,对于武汉城市圈湿地资源受损程度及其对应湿地受损区的水体演变规律认知不够,同时湿地退化的驱动机制研究大多停留在定性分析阶段。武汉城市圈致力于资源节约型与环境友好型的城市发展道路^[18],科学认知研究区湿地景观时空演变及其驱动机制,对武汉城市圈的可持续发展具有重要意义。本文使用1995-2015年的五期土地利用数据研究武汉城市圈湿地时空格局演变及其受损程度类型,综合连续时间序列的水体数据集探究湿地退化与恢复所对应的水体变化规律,并利用Logistic回归模型分析湿地受损的驱动机制,以为城市湿地的保护与管理提供数据支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域概况

武汉城市圈地理位置是29°2′~31°51′N、112°30′~116°7′E,位于湖北省的东部,三面临山,西部和中部区域为辽阔的江汉平原^[19]。研究区以武汉市为中心,向周边辐射,包含周边的黄石、黄冈、咸宁、鄂州、孝感、潜江、仙桃、天门8个城市,即武汉“1+8”城市圈。作为国家综合改革示范区,武汉城市圈在中国经济发展中有着十分重要的作用,不仅是带动湖北省经济发展的重要引擎,也是中部经济振兴的战略支点。地貌类型以平原为主,依次为丘陵、山地^[20],区域内湿地资源丰富,不仅有长江和汉江穿过境内,同时也分布着众多湖泊、水库坑塘、沼泽地等。全区属于亚热带季风性湿润气候,全年四季分明,光照充足,年平均温度为16~18℃,其中夏季闷热、冬季湿冷;年平均降雨量为1130~1600mm,其中夏季降雨量最大。近年来,随着“中部崛起”战略的逐步实施,围湖造田、环境污染、资源浪费等问题对武汉城市圈湿地构成了严重威胁,开展湿地景观格局演变研究,对于城市湿地生态安全与保护有着十分重要的意义。

1.2 数据来源及处理

本文收集了1995年、2000年、2005年、2010年、2015年的土地利用数据,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),该数据是基于Landsat影像进行目视解译生产的,空间分辨率为30m,数据的分类精度达91.2%^[21]。参照《全国湿地资源调查与技术规程》,将武汉城市圈的湿地归为河流、湖泊、沼泽地、滩地、水库坑塘和水田6种类型,其中河流、湖泊、沼泽地、滩地属于自然湿地,水田和水库坑塘属于人工湿地。基于土地利用数据,绘制5个时相的湿地空间分布图,用于分析1995-2015年的湿地时空格局变化。

水体是湿地生态系统的基本要素之一,本文使用连续时间序列的水体数据集分析湿地退化与恢复所对应的

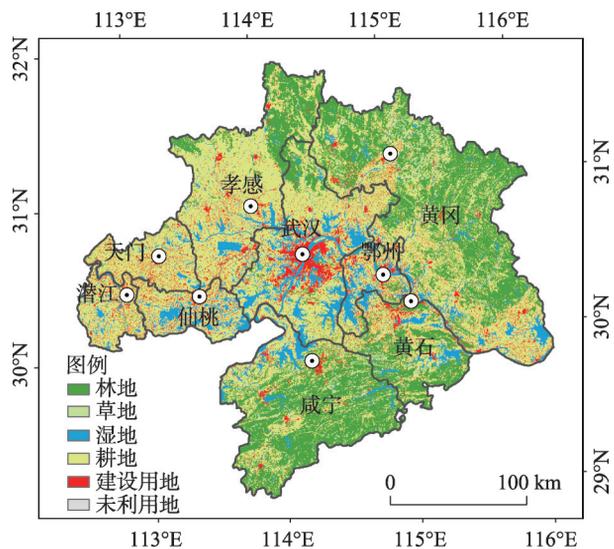


图1 武汉城市圈地理位置及行政区划

Fig. 1 Location of Wuhan Urban Agglomeration and the main cities

水体年际变化。由于收集的土地利用数据是每5年一期，为此，采用Deng等^[18]生产的水体数据。该数据是使用随机森林方法对1987-2015年武汉城市圈所有的Landsat影像进行分类生成的，空间分辨率为30 m，水体提取精度在90%以上。本文基于积水频率，将每年的水体数据进行合成，生产年最大水体淹没图。为了与湿地景观格局分析在时间上保持一致，选择1995-2015年的年最大水体淹没图分析水体的时空变化特征。

此外，为了进一步揭示湿地退化的原因，分别选择了气象因子、地理环境因子、社会经济因子作为驱动因素，使用回归拟合的方法，分析影响湿地退化的驱动力。驱动因子的说明及数据来源如表1所示。

表1 湿地受损驱动因素及数据来源

Table 1 Driving factors of wetland damage and its data sources

类别	名称	单位	数据来源	
气象因子	年平均降雨	mm	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	
	年平均温度	℃		
地理环境因子	DEM	m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	
	坡度	°		
	距主要公路的距离	km		2015年全国矢量边界数据
	距主要铁路的距离	km		
距主要河流的距离	km			
社会经济因子	建设用地	—	土地利用数据	
	GDP	10 ³ 元/km ²	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)	
	人口	10 ² 人/km ²		

1.3 研究方法

本文从三个层次开展武汉城市圈湿地资源变化的研究。首先，利用1995-2015年5期土地利用数据，对武汉城市圈的六种湿地类型进行多时相空间制图，并根据湿地类型内部以及湿地与非湿地之间的时空演变，识别了湿地受损程度的五种类型。然后，使用连续时间序列的水体数据集，分析不同受损类型区域的水体年际变化，揭示湿地生态系统内部水体的时间变化特征。最后，基于气象、地理环境、社会经济等驱动因子，使用Logistic回归模型，探究武汉城市圈湿地受损的驱动机制。具体的流程如图2所示。

1.3.1 湿地受损程度识别

六种湿地类型在生态系统功能方面各有不同。河流、湖泊、沼泽地、滩地属于自然湿地，能够为多种动植物提供栖息地，具有较高的生态系统服务价值；水库坑塘属于人工湿地，但武汉城市圈位于长江流域，研究区内分布着许多大型水库，用于抵御干旱、洪水等自然灾害，因此水库坑塘具有水源涵养、防旱蓄洪的生态功能；水田是农业用地的的重要组成部分，虽然属于人工湿地，但已经丧失了大部分生态系统功能。因此，在湿地生态功能上，自然湿地和水库坑塘的功能价值高于水田湿地，而水田湿地的功能价值高于非湿地。Mao等^[22]认为，湿地转化水田为是湿地受损的一种现象。鉴于此，本文将河流、湖泊、沼泽地、滩地、水库坑塘归为功能湿地，并对功能湿地、水田、非湿地之间的相互转化重新归类，从而识别湿地受损程度的5种类型，如表2所示。

1.3.2 湿地受损区的水体年际变化分析

水体是湿地赖以生存的关键元素之一，探究湿地退化或恢复所对应的水体变化特

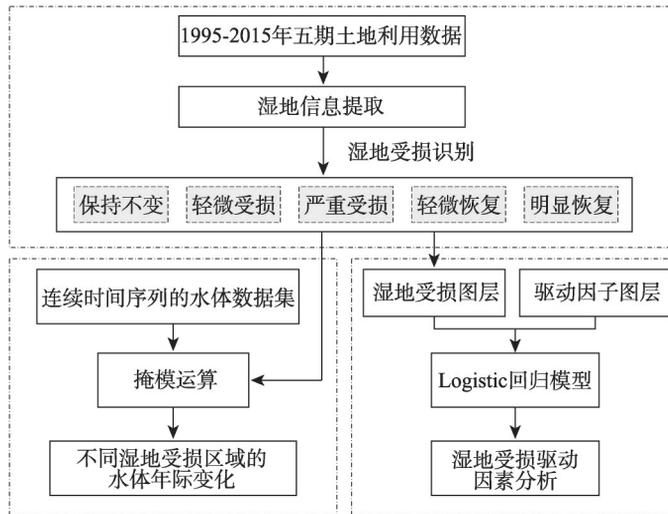


图2 技术流程

Fig. 2 Flowchart of the study

征，能够更加深层次地认知湿地景观格局演变规律。本文利用1995-2015年间的武汉城市圈水体数据集，分别探究保持不变、轻微受损、严重受损、轻微恢复、明显恢复5种不同受损程度的湿地区域的水体年际变化特征。

为了探究湿地受损区域的水体年际变化，基于年内多时相水体提取结果，通过计算积水频率生成每年的最大水体淹没范围。将生成的湿地受损空间分布图，分别生成5幅对应的湿地受损类型掩模图像，掩模图像的0值为背景值，1值为相应的湿地受损类型。最后，将5幅掩模图像分别与连续时间序列的水体数据集进行掩模运算，得到不同湿地受损区域内的水体淹没范围，统计分析不同湿地受损区内水体面积的变化趋势，从而揭示湿地受损与恢复所对应的水体演变规律。

1.3.3 湿地受损驱动因素分析方法

Logistic回归是一种广义的线性回归模型，常常用于二分类变量的回归模拟。模型不直接计算因变量与自变量的线性关系，而是计算因变量发生概率的函数变换值与自变量之间的线性关系，来构建回归模型，其计算公式如下^[23]：

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \tag{1}$$

式中： p 表示 y 取值为1时发生概率，这里对应的是湿地受损发生的概率； x_1, x_2, \dots, x_n 表示自变量，这里对应10个驱动因子； α 是回归方程的截距； $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 是回归方程的斜率。

表2 湿地受损程度类型及其定义

Table 2 Types of wetland damage degree and their definition

湿地受损类型	定义
保持不变	功能湿地→功能湿地 水田→水田
轻微受损	功能湿地→水田 水田→非湿地
严重受损	功能湿地→非湿地
轻微恢复	非湿地→水田 水田→功能湿地
明显恢复	非湿地→功能湿地

为了量化武汉市城市圈的湿地受损情况,将1995-2015年湿地不变的像元值定义为0,将湿地轻微受损和严重受损的像元定义为1,进而得到研究区的湿地受损图层,并将此图层定义为 y ,将10个驱动因子定义为 x ,构建Logistic回归模型,分析各个因子对于湿地退化的影响。此外,为了评估回归模型的拟合精度,研究选择Homsmer-Lemeshow(简称HL)指标评估模型性能。一般情况下,如果HL的不存在明显的显著性,即 $P>0.05$,则模型的拟合精度较好,反之,模型的拟合精度较差^[24]。

由于距离较近的样本点之间存在空间自相关,使得拟合的模型存在不稳定性,为此,采取随机采样方法生成样本点数据集。由于湿地类型不变的面积极远远大于湿地受损的区域的面积,为此按照2:1的比例分别采集湿地不变($y=0$)和湿地受损($y=1$)的样本点,即使用随机采样的方法生成5000个湿地不变类型的样本点和2500个湿地受损类型的样本点。对于Logistic回归模型,类别样本数量的不均等只会影响模型的常数项,不影响模型拟合精度和回归系数^[25],因此选择的样本点能够满足模型训练与拟合的要求。

2 结果分析

2.1 武汉城市圈湿地的时空变化特征

通过GIS湿地制图与时空分析发现,武汉城市圈的湿地类型在地理分布上呈明显的差异性(图3)。水田是武汉城市圈面积最大的湿地类型,占2015年湿地总面积的72.57%,主要分布在地势平坦的平原地区,包括武汉市北部、孝感市、黄冈市南部等;其次是水库坑塘、湖泊,大多分布在武汉市、仙桃市、鄂州市;再次是河流,主要是指长江及其支流区域;滩地和沼泽地的面积较小,呈零星分布,主要分布在河流、湖泊湿地周边。总体上,武汉城市圈湿地面积较大,截至2015年,湿地占武汉城市圈行政区域

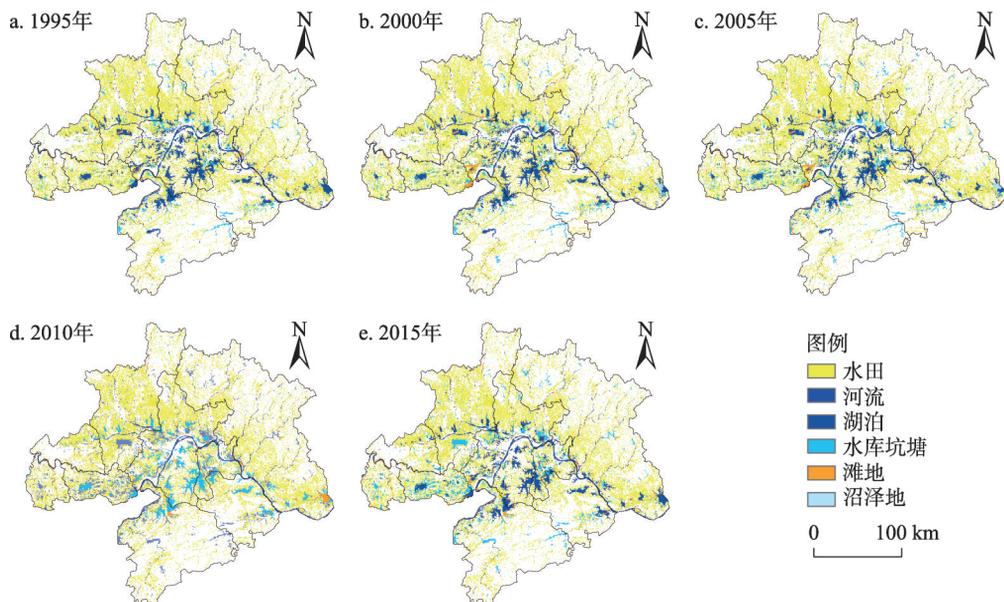


图3 1995-2015年武汉城市圈湿地空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of wetlands in Wuhan Urban Agglomeration during 1995-2015

的41.02%，其中人工湿地为19723.94 km²，占湿地总面积的83.14%；自然湿地为4001.36 km²，占湿地总面积的16.87%。

1995-2015年间，武汉城市圈湿地类型面积统计如图4所示。近20年来，武汉城市圈湿地面积呈先增加后减少的趋势，其中1995-2005年间，湿地面积呈增加趋势，至2005年的湿地面积最大，较1995年，湿地面积增加了236.47 km²；2005-2015年间，湿地面积呈退化趋势，至2015年湿地面积最小，较1995年，湿地面积减少了655.15 km²。人工湿地中，水田面积在减少，面积减少量为1487.63 km²；水库坑塘面积在增加，面积增加量为818.19 km²。自然湿地中，河流、滩地面积在增加，面积增加量分别为79.87 km²、369.29 km²；湖泊、沼泽地面积在减少，面积减少量分别为422.88 km²、11.99 km²。统计结果发现，武汉城市圈湿地面积总体呈退化趋势，湿地面积退化主要是由于水田和湖泊面积减少导致的。

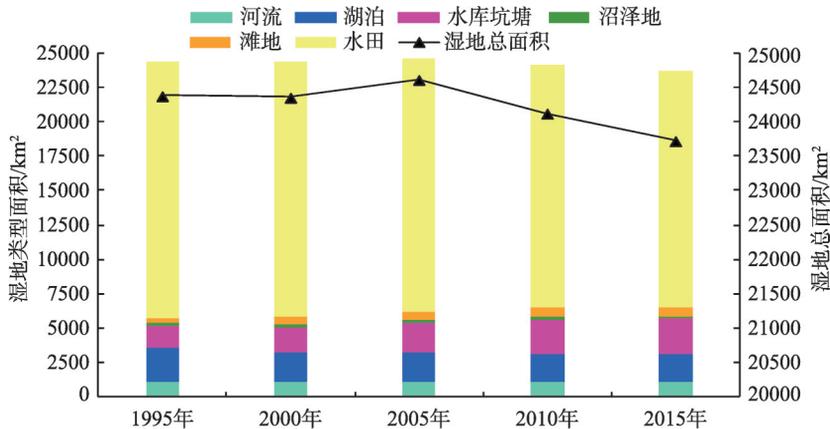


图4 1995-2015年武汉城市圈湿地面积变化

Fig. 4 The area changes of various wetland types in Wuhan Urban Agglomeration during 1995-2015

2.2 武汉城市圈湿地受损类型识别

图5绘制了1995-2015年间湿地受损类型的空间分布图。结果表明：武汉市城市圈的湿地状况在空间上发生了较大的变化，湿地变化类型主要是轻微受损类型和轻微恢复类型，严重受损类型和明显恢复类型的面积较小。轻微受损区域主要分布在武汉市的中部、邻近武汉的孝感市和鄂州市的中心地区，湿地轻微受损主要是由于非湿地侵占水田引起的，其中建设用地侵占水田面积最大（值为1122.58 km²）。严重受损区域的面积较小，主要分布在武汉市的汉口区、武昌区以及黄州市中心等地区，邻近长江沿岸，湿地严重受损主要表现为建设用地侵占功能湿地（值为171.7 km²）和旱地侵占功能湿地（值为119.21 km²）。轻微恢复区域主要分布仙桃市，湿地轻微恢复主要是水田转为水库坑塘（值为730.53 km²）和非湿地转为水田（值为1732.37 km²）引起的。明显恢复区域的面积较小，主要分布在河流、湖泊附近，主要是旱地转为功能湿地（值为294.75 km²）引起的。

表3统计了1995-2015年间武汉城市圈5种湿地受损类型的面积。结果表明：1995-2015年间，保持不变的湿地类型面积最大，占1995年湿地总面积的82.57%，依次为轻微受损、轻微恢复、明显恢复、严重受损，整体上，受损总面积大于恢复总面积。1995-

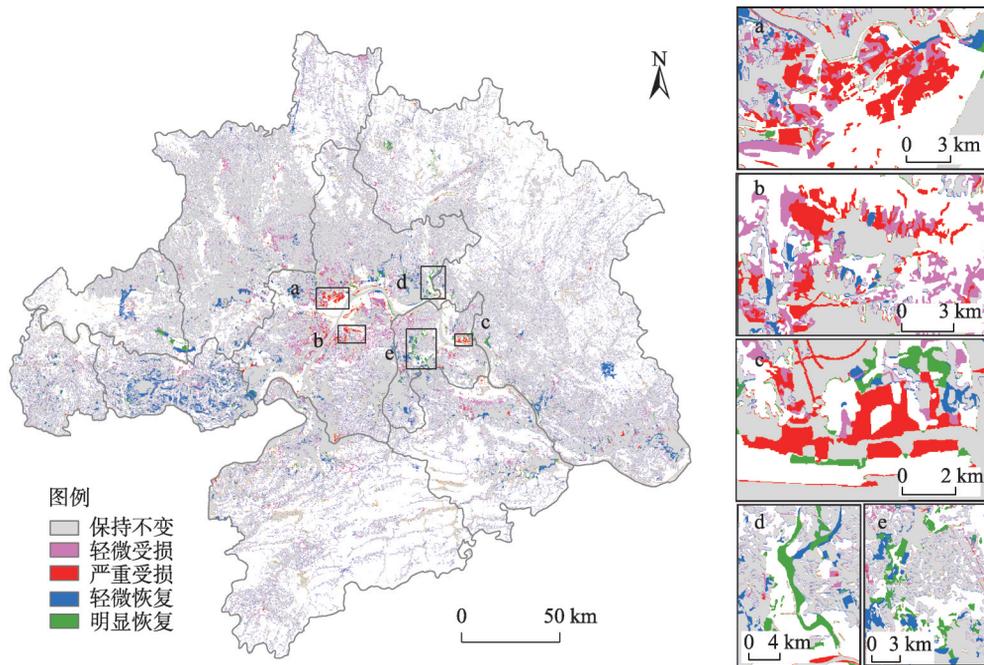


图5 1995-2015年间武汉城市圈湿地受损类型空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of wetland damage types in Wuhan Urban Agglomeration during 1995-2015

表3 武汉城市圈湿地受损类型面积统计

Table 3 The area statistics of wetland damage types in Wuhan Urban Agglomeration (km²)

时段/年	轻微受损	严重受损	轻微恢复	明显恢复	保持不变
1995-2000	103.61	25.55	193.77	41.20	24069.59
2000-2005	264.167	158.19	661.84	240.20	23538.37
2005-2010	2819.97	465.13	2609.01	500.36	20530.37
2010-2015	431.13	69.02	100.85	45.80	23550.72
1995-2015	2813.38	384.49	2781.84	482.72	20130.07

2005年间,湿地状况呈改善趋势,其中2000-2005年间湿地恢复状况明显,湿地面积收支增加了479.65 km²。2005-2015年间,湿地状况呈退化趋势,其中2005-2015年间湿地类型在空间上变化剧烈,湿地受损与恢复类型面积明显大于其他时间段,湿地面积收支减少了175.73 km²。总体看来,1995-2015年间,湿地状况呈退化趋势,湿地面积总收支减少了66.68 km²。

为了进一步揭示研究区湿地受损与恢复的地理分布状况,统计了1995-2015年间武汉城市圈县级行政单元湿地受损与恢复面积(图6)。在湿地受损方面,武汉市的湿地受损面积最大,面积为563.08 km²,占湿地受损总面积的17.77%;其次是黄陂县、仙桃市、孝感市,湿地受损面积在140~180 km²之间。在湿地恢复方面,仙桃市、武汉市的湿地恢复面积较大,恢复面积分别为408.2 km²和327.9 km²,分别占恢复总面积的12.65%和10.16%;其次是蕲春县、天门市、潜江市、鄂州市、黄陂县,湿地恢复面积在130~160 km²之间。在湿地受损与恢复收支平衡方面,武汉市、黄陂县、孝感市、大冶市的湿地受损面积大于湿地恢复面积,两者的面积差大于20 km²,其中武汉市的湿地退化最为严

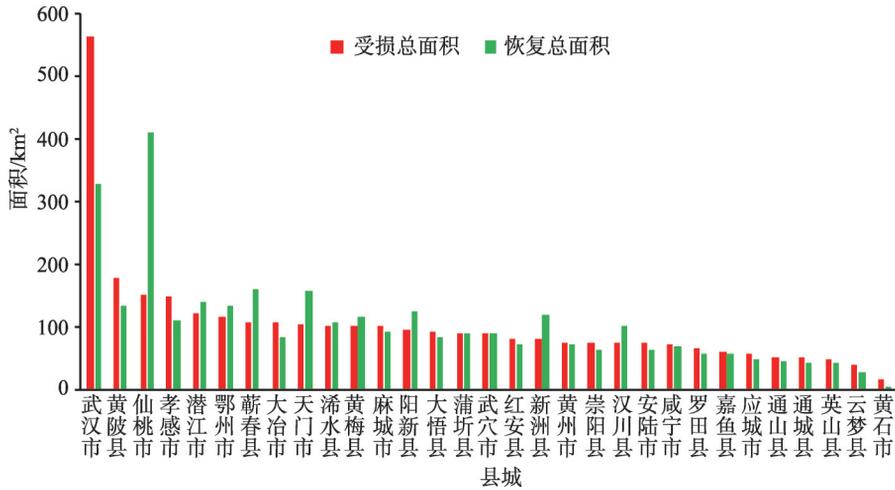


图6 1995-2015年间县域湿地受损与恢复面积统计

Fig. 6 Statistics of wetland damage and restoration in county-level administrative unit during 1995-2015

重, 受损与恢复的面积差为 235.1820 km²; 黄州市、咸宁市、嘉鱼县、通山县、英山县的湿地受损与恢复面积基本相等; 仙桃市、蕲春县、天门市、阳新县、新洲县、汉川县的湿地恢复面积大于湿地受损面积, 两者的面积差大于 20 km², 其中仙桃市的湿地恢复最显著, 恢复与受损的面积差为 257.53 km²。

2.3 武汉城市圈湿地受损区的水体年际变化特征

水体是湿地生态系统赖以生存的关键性元素之一, 在维护湿地生态环境健康与安全方面发挥着重要作用, 因此探究湿地水体的时间变化特性能够进一步揭示武汉城市圈湿地景观时空演变的实质。图7统计了1995-2015年不同湿地受损类型的水体面积变化, 结果表明, 湿地类型保持不变的水体面积最大, 至2015年, 为其水体面积为 2998.59 km², 占水体的 86.29%, 依次是湿地轻微恢复、轻微受损、明显恢复、严重受损的区域内水

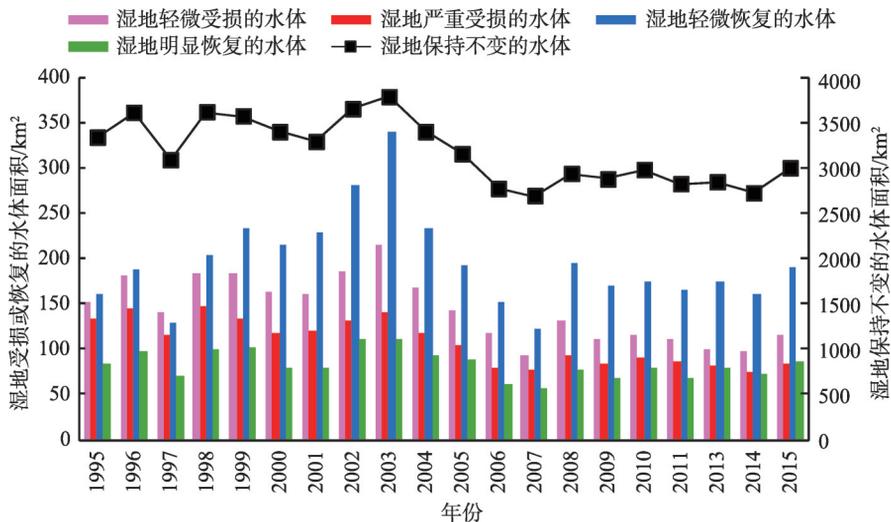


图7 1995-2015年湿地受损类型的水体面积变化

Fig. 7 Change in water area of different wetland damage types from 1995 to 2015

体。1995-2015年间,5种受损类型区域内的水体均呈先增加后减少的趋势,至2003年的水体面积最大,其中1995-2005年间,水体呈增加趋势;2005-2010年间,水体呈退化趋势;2010-2015年间,水体基本保持不变。

1995-2015年间,保持不变、轻微受损、严重受损的区域内水体均有所退化,其中保持不变湿地类型的水体面积减少量为336.77 km²,占1995年该区域水体的10.1%,其水体退化的主要原因是湿地生态系统退化,使得稳定的湿地区域面积减少;轻微受损湿地区域的水体面积减少量为36.62 km²,占1995年该区域水体的24.06%,主要是由于是建设用地、旱地侵占水田导致的;严重受损湿地区域的水体退化最为严重,水体面积其减少量为49.38 km²,占1995年该区域湿地水体的37.1%,主要原因是建设用地、旱地侵占功能湿地。轻微恢复、明显恢复的区域内水体有所增长,其中轻微恢复区域的水体面积增加了30.91 km²,占该区域水体的19.28%,水体增长的主要原因是水田转为水库坑塘以及旱地转为水田;明显恢复的区域内水体面积增加了3.27 km²,占1995年该区域水体的3.95%,该类型水体增长主要是由于非湿地转为水库坑塘引起的。对比分析武汉城市圈湿地变化特征,发现水体的退化与增长特征与湿地退化与恢复的变化特征相似。

近年来,武汉城市圈的湿地受人类活动与气候条件的影响,不同区域的水体出现了退化或增长的现象。为此,本文选择了4个典型区域,使用1995年、2000年、2005年、2015年的年最大水体淹没范围,分析水体的时空变化模式,如图8所示。沙湖和南湖位于武汉市,属于城中湖,20年来,水体的变化以退化为主,其中1995-2005年间,水体

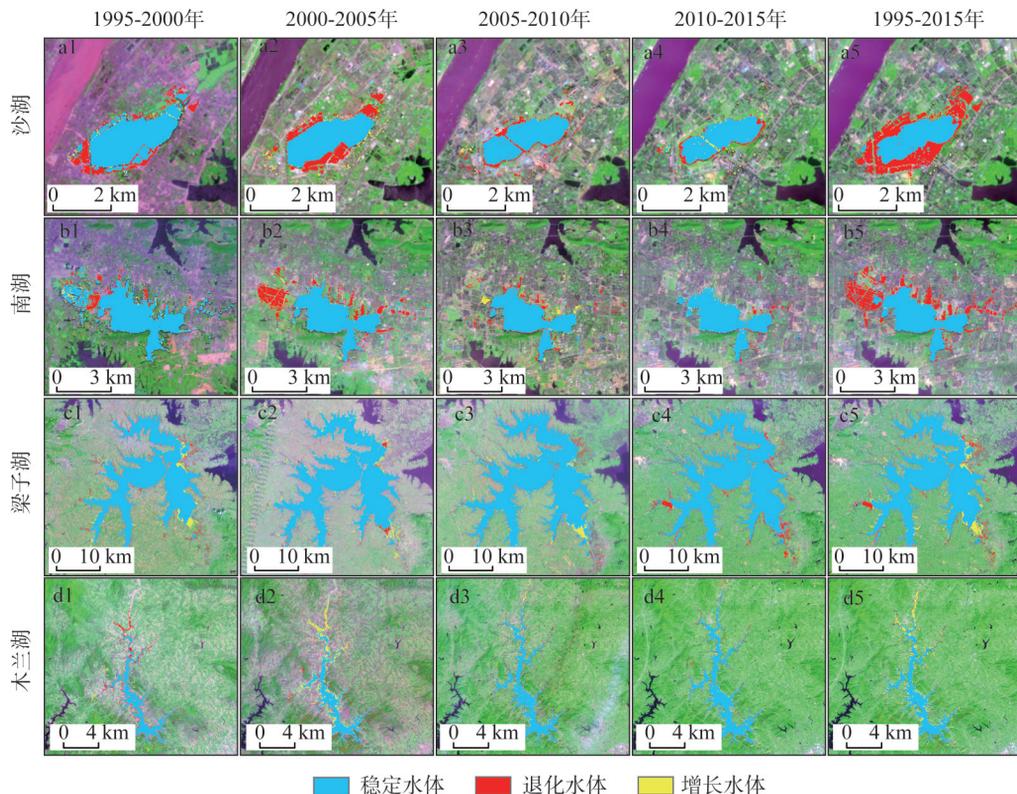


图8 1995-2015年典型区域的湿地水体变化空间分布

Fig. 8 Water change map of wetland in typical area during 1995-2015

面积退化最为严重,水体退化的主要原因是建设用地侵占湖泊。梁子湖地跨鄂州市和武汉市江夏区,水体的变化类型包括了退化水体和增长水体,1995-2010年间,水体的变化以增长为主,其原因是降雨的增加引发了洪水,使得湖水面积增加^[18];2010-2015年间,水体的变化以退化为主,其原因是附近人类活动增加,农田侵占了湖泊湿地。木兰湖位于黄冈市的山区地带,属于自然湖泊,水体的变化以增长为主,其中1995-2000年,水体以退化为主;2000-2005年间,水体以增长为主;2005-2015年间,水体基本保持不变,木兰湖的水体变化主要原因是降雨量、温度等自然因素导致的。

2.4 武汉城市圈湿地受损驱动因素分析

在Logistic回归建模前,使用容忍度(Tolerance)和方差膨胀因子(VIF)诊断自变量之间的多重共线性,统计结果发现:10个驱动因素中,GDP(VIF=7.34)和人口(VIF=7.47)的方差膨胀因子大于3,而其他驱动因子的VIF都小于3,表明GDP与人口之间存在多重共线性。为此,选择了GDP与其他8个因子再次进行共线性诊断,发现9个自变量都满足Tolerance>0.1 & VIF<3的条件,即9个变量之间不存在显著的多重共线性。然后将9个驱动因子全部导入logistic模型,模型的Homer-Lemeshow检验结果表明,其P值不小于检验水平,即P=0.083>0.05,说明模型的拟合精度较好。此外,模型的分类精度达到了87.3%,表明构建的回归模型能够可靠地模拟湿地退化风险。在Logistic回归模型中,常使用显著性水平(P值)分析每个驱动因子是否具有统计意义,即P<0.05的自变量具有统计意义,反之则不具有统计意义。使用P值筛选具有统计意义的驱动因子如表4所示。

表4 1995-2015年间湿地受损的Logistic回归模型拟合结果

Table 4 Fitting results of Logistics regression model for wetland damage in 1995-2015

变量	估计量(β)	标准误	Wald χ^2	P值	Exp(β)
HL=13.941, P=0.083					
年平均降雨量	-0.004	0.000	75.668	0.000	0.996
年平均温度	0.798	0.289	7.607	0.006	2.221
坡度	0.045	0.016	7.705	0.006	1.046
距主要公路的距离	-0.011	0.004	9.209	0.002	0.989
建设用地	6.125	0.241	645.063	0.000	457.029
GDP	0.028	0.004	43.971	0.000	1.028

Logistic模型中,Wald χ^2 常常用于评估每个自变量(x)对于因变量的(y)的影响程度^[24-25],即Wald χ^2 值越大,对应的自变量对因变量的影响程度越大。根据Wald χ^2 值,建设用地、降雨、GDP是影响湿地受损风险的主要因子,其中建设用地对湿地受损风险影响最大。对于建设用地因子,建设用地区域的湿地受损风险是非建设用地区域的6.125倍,其原因是随着都市圈的经济与工业发展,人们对于建设用地的需求量增加,武汉城市圈出现了围湖造田、水田湿地被侵占的现象,湿地面积大量减少^[19]。降雨与湿地受损风险呈负相关的关系,即降雨每增加1 mm,湿地受损风险降低0.4%,其原因是降雨量的增加使得湿地生态系统的水量增加,改善了湿地生态环境的质量。GDP与湿地受损风险呈正相关的关系,即GDP每增加一个单位(10³元/km²),湿地受损风险增加2.8%,其原因是某一区域的GDP越大,人类活动对该区域湿地生态系统的干扰强度也就

越大。

距主要公路的距离、坡度、温度的Wald χ^2 值较小,对湿地受损风险的影响相对较小。距主要公路的距离与湿地受损风险呈负相关的关系,即距离每增加1 km,湿地受损风险减少1.1%,也就是说距离主要公路越远,湿地受损风险越低,其原因是距离主要公路越远的区域,人类活动就越少,湿地生态系统的稳定性就越高。坡度与湿地退化风险呈正相关的关系,即坡度每增加1°,湿地退化风险增加4.5%,主要原因是坡度越大,其水土保持能力和植被生长状况越差。温度与湿地受损风险呈正相关的关系,即温度每增加1℃,湿地受损风险增加79.8%,其原因是温度的增加使得湿地区域的蒸腾作用加剧,一定程度上扰动了湿地生态系统的稳定性。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于1995-2015年间5期土地利用数据和连续时间序列的水体数据,探究了武汉城市圈湿地时空格局演变与湿地受损程度,分析不同湿地受损区的水体时间变化特征,并利用回归模型分析气象因子、地理环境因子、社会因子对湿地受损的影响。结果表明:

(1) 武汉城市圈湿地类型以水田为主,其他依次为水库坑塘、湖泊、河流、沼泽地。近20年来湿地面积呈先增加后减少的趋势,至2015年,湿地面积减少了655.15 km²。

(2) 湿地受损程度识别的结果表明,保持不变的湿地面积最大,依次为轻微受损、轻微恢复、明显恢复、严重受损。湿地受损区域主要分布在武汉市、黄陂县、仙桃市、孝感市,主要是由于建设用地、旱地等侵占湿地导致的;湿地恢复区域主要分布在仙桃市和武汉市,主要表现为水田向功能湿地转变。

(3) 湿地受损区的水体分析结果表明,湿地保持不变、轻微受损、严重受损的水体有所退化,其中严重受损湿地区域水体退化最严重;湿地轻微恢复、明显恢复的水体有所增长。对比发现,水体的变化特征与其对应的湿地受损类型面积变化特征相似,因此,武汉城市圈湿地生态环境变化很大程度上取决于湿地水体变化。

(4) 湿地退化驱动因素分析表明,武汉城市圈湿地受损风险主要受建设用地、降雨、GDP的影响,其中建设用地的影响最大;同时,距主要公路的距离、坡度、温度对湿地受损风险也有一定的影响。该结论与孔春芳等^[26]对于武汉城市湿地变化的驱动因素研究结果一致。

3.2 讨论

湿地位于陆地和水体交错的特殊过渡带,在动植物栖息地、水源涵养、气候调节等方面发挥重要作用。水体和植被是构成湿地系统的两大要素,分析水体和植被的时空变化特征能够有效认知湿地景观格局变化的规律,因此在今后的研究中,可以在湿地受损程度识别的基础上,耦合植被和水体变化规律进一步深层次地分析湿地的受损与恢复;同时,基于水体和湿地植被的提取结果确定湿地的最大范围也是湿地研究的一个重要方向。

湿地生态系统受到自然环境和人类活动等因素的共同作用,其生态环境变化是一个复杂的过程。本文的研究结果表明,武汉城市圈的湿地呈退化趋势。但近年来,湿地生态系统的变化较小,其原因是受到政策保护的影响,武汉城市圈致力于城市的资源节约

型、环境友好型的发展道路,在经济发展的同时也开始注重了环境保护工作^[27]。尽管如此,未来几年内,武汉城市圈的湿地是退化还是恢复仍是一个不确定的问题。在下一步的研究中,可以基于土地利用情景,综合考虑湿地保护需求及建设用地扩张的情景,对未来城市湿地的空间格局进行预测模拟。

参考文献(References):

- [1] HAN X X, CHEN X L, FENG L. Four decades of winter wetland changes in Poyang Lake based on Landsat observations between 1973 and 2013. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 426-437.
- [2] 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. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 1897-1911. [XU X L, WANG X J, ZHU X P, et al. Landscape pattern changes in Alpine wetland of Bayanbulak Swan Lake during 1996-2015. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 1897-1911.]
- [3] NA X D, ZANG S Y, ZHANG N N, et al. Impact of land use and land cover dynamics on Zhalong wetland reserve ecosystem, Heilongjiang province, China. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2015, 12(2): 445-454.
- [4] 杜际增,王根绪,杨燕,等. 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): 6173-6182. [DU J Z, WANG G X, YANG Y, et al. 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): 6173-6182.]
- [5] ZHAO Z L, ZHANG Y L, LIU L S, et al. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7): 879-896.
- [6] BRINSON M M, MALVÁREZ A I. Temperate freshwater wetlands: Types, status, and threats. *Environmental Conservation*, 2002, 29(2): 115-133.
- [7] 刘润红,梁士楚,赵红艳,等. 中国滨海湿地遥感研究进展. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 998-1011. [LIU R H, LIANG S C, ZHAO H Y, et al. Progress of Chinese coastal wetland based on remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 998-1011.]
- [8] 张猛,曾永年. 长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 241-249. [ZHANG M, ZENG Y N. Temporal and spatial dynamic changes and driving forces analysis of wetland landscape of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration. *Transactions of the CASE*, 2018, 34(1): 241-249.]
- [9] SICA Y V, QUINTANA R D, RADELOFF V C, et al. Wetland loss due to land use change in the Lower Paraná River Delta, Argentina. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 967-978.
- [10] BALLANTI L, BYRD K B, WOO I W, et al. Remote sensing for wetland mapping and historical change detection at the Nisqually River Delta. *Sustainability*, 2017, 9(11): 1918-1950.
- [11] 毛德华,王宗明,罗玲,等. 1990-2013年中国东北地区湿地生态系统格局演变遥感监测分析. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1253-1263. [MAO D H, WANG Z M, LUO L, et al. Monitoring the evolution of wetland ecosystem pattern in Northeast China from 1990 to 2013 based on remote sensing. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1253-1263.]
- [12] 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. *生态学报*, 2018, 38(12): 4492-4503. [LYU J X, JIANG W G, WANG W J, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 30 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4492-4503.]
- [13] 宫宁,牛振国,齐伟,等. 中国湿地变化的驱动力分析. *遥感学报*, 2016, 20(2): 172-183. [GONG N, NIU Z G, QI W, et al. Driving forces of wetland change in China. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 172-183.]
- [14] 马学垚,杜嘉,梁雨华,等. 20世纪60年代以来6个时期长江三角洲滨海湿地变化及其驱动因素研究. *湿地科学*, 2018, 16(3): 303-312. [MA X Y, DU J, LIANG Y H, et al. Changes of coastal wetlands in the Yangtze River Delta for 6 periods since 1960s and their driving factors. *Wetland Science*, 2018, 16(3): 303-312.]
- [15] 卢会娟,刘浩,董莹,等. 武汉城市圈湿地资源现状与保护对策. *湿地科学与管理*, 2010, 6(2): 40-42. [LU H J, LIU H, DONG Y, et al. Current status and conservation strategy of wetland resources in suburb regions around Wuhan city. *Wetland Science & Management*, 2010, 6(2): 40-42.]
- [16] 牛振国,宫鹏,程晓,等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. *中国科学D辑:地球科学*, 2009, 39(2): 188-

203. [NIU Z G, GONG P, CHENG X, et al. Geographical characteristics of China's wetlands derived from remotely sensed data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 39(2): 188-203.]
- [17] 易凤佳, 李仁东, 常变蓉, 等. 2000-2010年汉江流域湿地动态变化及其空间趋向性. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1412-1420. [YI F J, LI R D, CHANG B R, et al. Dynamic change analysis of wetland and its spatial-temporal trend in Hanjiang basin from 2000 to 2010. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1412-1420.]
- [18] DENG Y, JIANG W G, TANG Z H, et al. Spatio-temporal change of lake water extent in Wuhan Urban Agglomeration based on landsat images from 1987 to 2015. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 270-288.
- [19] 邓媛. 武汉城市圈湿地变化及对策研究. 武汉: 华中师范大学, 2012. [DENG Y. A study on the changes and countermeasure of wetland in Wuhan Urban Agglomeration. Wuhan: Central China Normal University, 2012.]
- [20] 关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1447-1459. [GUAN X L, FANG C L, ZHOU M, et al. Spatial and temporal characteristics of spatial expansion of urban land in Wuhan Urban Agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1447-1459.]
- [21] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14. [LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [22] MAO D H, LUO L, WANG Z M, et al. Conversions between natural wetlands and farmland in China: A multiscale geospatial analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 550-560.
- [23] 熊昌盛, 谭荣, 岳文泽. 快速城市化背景下不同建设用地扩张的驱动差异探讨: 以浙江省义乌市为例. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2124-2135. [XIONG C S, TAN R, YUE W Z. Discussion on different driving factors of diversified construction land expansion in rapid urbanization area: A case study of Yiwu city. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2124-2135.]
- [24] XIE H L, HE Y F, XIE X. Exploring the factors influencing ecological land change for China's Beijing-Tianjin-Hebei region using big data. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 677-687.
- [25] PENG J, ZHAO M Y, GUO X N, et al. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land: A case study in Shenzhen city, China. *Habitat International*, 2017, 60: 81-90.
- [26] 孔春芳, 王静, 张毅, 等. 武汉城市湿地景观格局时空结构演化及驱动机制研究. *中山大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(4): 119-128. [KONG C F, WANG J, ZHANG Y, et al. Evolution of Wuhan urban wetlands landscape pattern and its driving mechanism. *Acta Scientiarum naturalium University Sunyatseni*, 2012, 51(4): 119-128.]
- [27] 冯占民. 城市群低碳发展的区域合作研究. 武汉: 华中科技大学, 2012. [FENG Z M. Study on the regional cooperation on the low carbon development in the urban agglomeration. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.]

Identification of wetland damage degree and analysis of its driving forces in Wuhan Urban Agglomeration

PENG Kai-feng^{1,2}, JIANG Wei-guo^{1,2}, DENG Yue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the land use data of five periods during 1995-2015 and water body data of continuous time series, this paper examines the degree of wetland damage in Wuhan Urban Agglomeration and its corresponding characteristics of water body change, and then further analyzes the driving mechanism of wetland damage by logistic model. The results are as follows: (1) From 1995 to 2015, the wetland area in Wuhan Urban Agglomeration increased slightly and then decreased, and the wetland area decreased by 665.15 km² during this period. Wetland damage areas were mainly distributed in Wuhan, Huangpi, and Xiantao, which was caused by construction land and dryland encroach wetland. Wetland restoration areas were mainly located in cities of Xiantao and Wuhan, which was caused by the transformation of paddy fields to functional wetland. (2) In the past 20 years, the characteristics of wetland change are similar to those of corresponding water decrease or increase. The area of water body in damaged wetland area decreased while that in restored wetland area increased. (3) Logistic regression result shows that construction land, precipitation and GDP are the main factors affecting the risk of wetland degradation, and human activities are the main forces influencing wetland damage.

Keywords: Wuhan Urban Agglomeration; wetland damage; water body; driving forces