

[文章编号]1000-1832(2017)02-0127-09

[DOI]10.16163/j.cnki.22-1123/n.2017.02.024

# 基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析 ——以小三江平原为例

刘吉平<sup>1,2</sup>, 马长迪<sup>1</sup>, 刘雁<sup>1</sup>, 盛连喜<sup>2</sup>

(1. 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 吉林 四平 136000;

2. 东北师范大学环境学院, 吉林 长春 130117)

**[摘要]** 以湿地变化较为剧烈的小三江平原为研究区域, 结合 GIS 和 RS 技术, 利用地理探测器方法定量分析了沼泽湿地变化的驱动力, 揭示了各驱动因子在沼泽湿地变化中的作用及相互关系. 结果表明: 1986—2010 年小三江平原沼泽湿地丧失严重, 湿地丧失较多的地区主要位于研究区中部及东北部的草甸土和沼泽土土壤类型、低河漫滩地貌类型、海拔 51~55 m 及 1°~3°坡度处; 1986—2010 年间, 小三江平原沼泽湿地丧失的主要驱动因子按贡献率大小排列依次为土壤类型、坡度、地貌、与河流距离、年降水量和海拔; 各驱动因子之间的交互作用大部分是非线性增强, 其中与保护区距离、与居民点距离和行政区的交互作用均呈非线性增强作用, 坡度、土壤类型、地貌、与河流距离等自然因子之间的交互作用是相互减弱的; 自然因子虽然对小三江平原湿地面积丧失的贡献率较大, 但它们必须在人为因子的作用下, 是与人为因子的相互作用, 共同造成小三江平原沼泽湿地的大面积丧失.

**[关键词]** 驱动因子; 定量分析; 湿地丧失; 地理探测器; 小三江平原

**[中图分类号]** P 901 **[学科代码]** 170·4510 **[文献标志码]** A

由于自然系统和人类社会的演进, 湿地处于持续变化中, 而且人类影响的程度和节奏在最近数十年来达到了前所未有的规模<sup>[1]</sup>, 导致天然湿地面积锐减, 湿地破碎化程度增加, 湿地生态系统退化和湿地功能丧失. 科学研究与社会实践中不但需要了解湿地类型间的转化及其空间分布特征, 更重要的是要清楚湿地变化的原因. 湿地变化是自然与社会经济因素等综合作用的结果<sup>[2]</sup>, 因此确定各种驱动因子在湿地变化中所起的作用, 有助于深入分析湿地变化的原因及其发展趋势<sup>[3]</sup>. 定量分析湿地变化驱动力的关键在于, 如何在一个模型中最大限度地量化各个驱动因子并体现它们之间的相对重要性. 目前国内学者主要采用经验模型和统计模型方法对湿地变化的驱动力进行定量分析<sup>[4-10]</sup>. 但目前所应用的驱动机制模型均存在简化现实并且仅仅关注少数几种驱动力的现象<sup>[11]</sup>, 并且关于湿地演变的驱动力研究多局限于定性表达, 而一些定量分析研究也存在着明显的如驱动因素遴选不全面、评估方法不准确、缺少对单因素影响的测度等问题. 湿地生态系统的独特性及驱动力系统的复杂性需要从多学科合作的角度分析湿地时空格局演变的驱动力问题<sup>[12]</sup>. 但是, 多因子交互作用识别是一个理论难题, 缺少有效方法. 由王劲峰等<sup>[13]</sup>提出的地理探测器模型, 能有效识别因子间的相互关系, 探测各因子对模型的贡献率, 能从庞大的空间数据库中提取有用的空间关联规则. 王劲峰等<sup>[13-14]</sup>利用地理探测器研究了 2008 年汶川地震死亡率小于 5% 的风险评估以及中国和顺地区神经中枢缺陷疾病的致病因子. 目前地理探测器方法已在灾害、疾病、人文地理、经济区位及生态栖息地等领域得到了一定应用.

**[收稿日期]** 2016-06-12

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(41071037); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0730); 中央财政林业科技推广示范项目(吉推(2014)16号).

**[作者简介]** 刘吉平(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事湿地变化及环境效应研究.

本文以湿地变化较为剧烈的小三江平原为研究区域,利用地理探测器方法定量分析了沼泽湿地变化的驱动力,揭示了各驱动因子在沼泽湿地变化中的作用及相互关系,对自然因子和社会因子进行了叠加分析,并寻找影响湿地丧失的主导因素,为小三江平原湿地的保护和管理提供了科学理论依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

小三江平原位于完达山脉以北的三江平原,地理位置为  $45^{\circ}26'0''N\sim 48^{\circ}22'50''N$ ,  $131^{\circ}43'20''E\sim 134^{\circ}46'40''E$ <sup>[15]</sup>,土地总面积  $4.5508\times 10^4\text{ km}^2$ ,其中78.4%为平原,21.6%为山地。该区是由黑龙江、乌苏里江和松花江三条河流冲积形成的冲积平原,淡水沼泽湿地特别发育。小三江平原属温带湿润、半湿润大陆性季风气候区,年均气温  $2.5^{\circ}\text{C}\sim 3.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $500\sim 600\text{ mm}$ ,气候湿润。境内主要河流有挠力河、别拉洪河和浓江河,地貌主要由河漫滩、古河道漫滩、凹地、河流阶地及山前台地组成。土壤主要有草甸土、白浆土、暗棕壤、沼泽土和黑土,土地的自然肥力较高。小三江平原包括佳木斯市、双鸭山市所属的9个县(市)<sup>[16]</sup>,境内有三江农场管理局管辖的14个农场和红兴隆管理局管辖的10个农场,人口105.2万人。

### 1.2 湿地丧失驱动因子的选取

近些年,众多学者对湿地丧失的驱动因子进行了大量研究:王宗明等<sup>[17-18]</sup>根据1954—2005年三江平原湿地变化的数据,研究了海拔、坡度、地貌等要素对三江平原土地利用/覆被变化过程的影响,在此基础上,分析了不同土壤类型对土地利用变化的影响;崔瀚文等<sup>[19]</sup>在东北地区湿地变化影响因素分析中,对1975—2007年影响三江平原沼泽湿地变化的年平均气温、年平均降水量等自然因子和人口数量、居民地面积等社会因子进行了分析;张有智等<sup>[20]</sup>计算了沼泽变化单元距河流、公路、铁路及主要城镇的最短距离,进而分析了沼泽湿地面积减少与它们最短距离之间的关系。在此基础上,本文结合小三江平原的实际,选择了影响小三江平原湿地变化的7个自然因素(地貌、土壤、坡度、海拔、与河流距离、年平均气温、年降雨量)和4个社会因素(与保护区距离、与居民点的距离、与道路的距离及行政区划)作为研究因子。

### 1.3 数据来源与处理

1986年和2010年小三江平原湿地空间分布图主要通过解译空间分辨率为30 m的Landsat TM遥感影像得到。在影响湿地丧失的驱动因子中,年平均气温和年平均降雨量数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html>)的 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的格网数据,取1986—2010年年平均气温和年平均降雨量的平均值;地形因素中的海拔和坡度则直接由三江平原地区DEM数据提取而来,其中DEM数据来源于马里兰大学地球科学研究中心(<http://glcfapp.umiacs.umd.edu>),分辨率为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ ;土壤、地貌因素是直接对三江平原土壤图(中国1:100万土壤类型图<sup>[21]</sup>)和地貌图(1985年“六五”国家攻关计划的科研成果,1:200万)进行的数字化处理,并进行归类合并,得到小三江平原土壤、地貌矢量图。河流和居民点是通过提取小三江平原土地利用图而获得的,然后进行缓冲区分析,得到各单元距河流和居民点的距离;保护区区划通过直接数字化研究区中各自然保护区的规划图得到;道路和行政区划通过直接数字化研究区的行政区划图获得。

### 1.4 研究方法

地理探测器是王劲峰等提出的一种新的空间分析模型,其优点是能够分析多因子之间的交互作用,主要分为风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互作用探测器4个部分<sup>[13,22]</sup>。本文主要是在叠加分析的基础之上借助“因子探测器”和“交互作用探测器”对影响三江平原湿地丧失的各因子进行定量分析,得出三江平原湿地丧失的各个影响因子的相对重要性以及各因子之间的交互作用。因子探测器与交互作用探测器公式具体参见文献<sup>[13]</sup>和<sup>[22]</sup>。

首先,利用ArcGIS 9.3软件,生成小三江平原 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的正方形网格图,然后将网格图与1986—2010年湿地丧失分布图相叠加,统计出每个网格的沼泽湿地面积,计算得到每个网格的沼泽湿地变化率。利用地理探测器(Geographical Detector)软件,以湿地变化率作为GridSystem图层,其他驱动因子作为Geographical Zone图层,进行探测分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 小三江平原沼泽湿地空间格局变化

基于 ArcGIS 软件,在 2 个时期的土地利用图的基础上,提取 1986 和 2010 年小三江平原属性为沼泽湿地的图层,得到小三江平原 1986—2010 年湿地空间分布图和变化图(见图 1)。

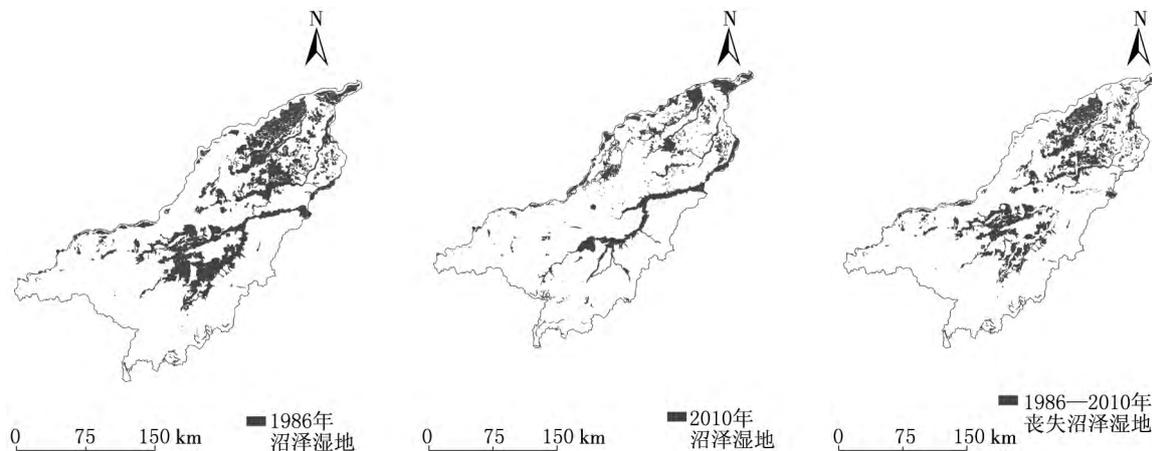


图 1 小三江平原 1986—2010 年沼泽湿地空间分布及其变化

由图 1 可知,1986 年,小三江平原沼泽湿地主要分布在研究区中的中部以及东北部,湿地较为完整,大致呈片状分布.到 2010 年小三江平原沼泽湿地面积明显减少,湿地丧失面积较大,大致呈斑块状和条带状分布.1986—2010 年小三江平原沼泽湿地丧失较多的地区主要位于研究区中部及东北部。

### 2.2 驱动因子对沼泽湿地变化的影响

借助于 ArcGIS 软件,将 1986 年和 2010 年小三江平原湿地丧失图与各驱动因子相叠加,可得不同驱动因素中湿地面积丧失情况(见表 1)。

表 1 1986—2010 年小三江平原驱动因子与沼泽湿地丧失面积及比例

项目	土壤类型						
	暗棕壤	白浆土	黑土	草甸土	沼泽土	泥炭土	水稻土
面积/km <sup>2</sup>	10 211.38	9 904.05	3 798.13	14 059.46	6 104.88	227.00	268.93
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	478.88	1 657.13	53.99	2 093.67	2 002.80	54.84	13.33
比例/%	7.44	25.73	0.84	32.51	31.10	0.85	0.20
项目	行政区						
	同江	富锦	抚远	饶河	桦川及佳木斯	宝洁及七台河	友谊、集贤及双鸭山
面积/km <sup>2</sup>	6 328.61	8 558.71	6 477.13	4 456.69	3 617.60	10 910.07	5 485.42
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	1 564.51	2 006.90	1 277.56	331.11	195.21	863.49	199.78
比例/%	24.30	31.17	19.84	5.14	3.03	13.41	3.10
项目	与保护区距离/km						
	0~2	2~4.3	4.3~6.7	6.7~9.2	9.2~11.6	11.6~13.9	13.9~16
面积/km <sup>2</sup>	2 503.11	2 415.74	2 320.08	2 255.10	2 111.63	2 019.94	1 753.79
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	686.92	659.78	571.58	469.01	443.40	488.33	381.58
比例/%	18.56	17.83	15.45	12.67	11.98	13.20	10.31
项目	与道路距离/km						
	0~0.5	0.5~1	1~1.6	1.6~2.3	2.3~3	3~3.9	3.9~5
面积/km <sup>2</sup>	5 113.51	4 725.28	5 096.87	5 112.15	4 304.25	4 570.63	4 394.42
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	463.16	476.21	608.13	708.42	682.91	806.20	779.12
比例/%	10.24	10.53	13.44	15.66	15.09	17.82	17.22

续表 1

项目	与河流距离/km						
	0~0.5	0.5~1.2	1.2~1.8	1.8~2.4	2.4~3.2	3.2~4	4~5
面积/km <sup>2</sup>	5 342.26	5 912.87	3 601.53	4 156.72	4 191.38	3 593.48	3 783.70
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	829.85	911.15	506.77	608.35	591.81	494.29	506.96
比例/%	18.65	20.48	11.39	13.67	13.30	11.11	11.39
项目	与居民点距离/km						
	0~0.5	0.5~0.9	0.9~1.2	1.2~1.6	1.6~2	2~2.5	2.5~3.2
面积/km <sup>2</sup>	4 054.34	4 592.62	3 581.19	4 456.00	3 866.80	3 997.95	4 399.13
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	140.25	230.80	251.43	425.39	492.76	658.78	900.38
比例/%	4.52	7.45	8.11	13.72	15.90	21.25	29.05
项目	地貌						
	河曲带	低河漫滩	高河漫滩	冲积平原	河流阶地	台地	低山丘陵
地貌面积/km <sup>2</sup>	4 332.24	11 500.14	6 726.13	3 175.19	9 757.28	2 701.28	7 587.01
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	819.88	3 120.53	771.58	82.08	1522.76	27.85	93.88
比例/%	12.73	48.47	11.98	1.27	23.65	0.43	1.46
项目	海拔/m						
	0~50	51~55	56~60	61~70	71~140	141~200	201~450
面积/km <sup>2</sup>	6 916.91	8 557.02	7 674.08	5 634.45	7 724.72	3 436.21	5 386.87
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	1 372.38	2 584.09	1 767.24	453.17	148.33	54.20	48.88
比例/%	21.35	40.20	27.49	7.05	2.31	0.84	0.76
项目	坡度/(°)						
	0~1	1~3	3~5	5~9	9~15	15~20	
面积/km <sup>2</sup>	2 820.05	17 782.92	9 849.27	5 653.93	4 972.33	4 550.91	
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	949.96	4 116.22	1 085.58	144.07	74.05	64.08	
比例/%	14.76	63.98	16.87	2.24	1.15	1.00	
项目	年降水量/mm						
	0~497	497~524	524~530	530~538	538~569	569~601	
面积/km <sup>2</sup>	7 007.56	11 477.19	9 379.54	9 419.70	5 030.72	3 519.21	
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	1 278.17	1 422.02	542.72	1 233.22	1 498.64	463.79	
比例/%	19.85	22.09	8.43	19.15	23.28	7.20	
项目	平均气温/°C						
	0~2.91	2.91~3.04	3.04~3.21	3.21~3.49	3.49~4.01	4.01~4.48	
面积/km <sup>2</sup>	285.32	12 709.34	10 023.06	13 288.22	8 857.08	670.92	
湿地丧失面积/km <sup>2</sup>	18.28	200.03	1 968.50	2 934.90	1 269.38	47.48	
比例/%	0.28	3.11	30.57	45.58	19.72	0.74	

由表 1 可知,土壤类型为草甸土和沼泽土的地区湿地丧失面积较多,分别为 32.51%和 31.10%,主要分布于研究区的北部.湿地面积丧失最多的行政区为富锦市,湿地丧失了 31.17%,其次是同江市和抚远县.湿地丧失面积随着与保护区距离的增加而减少,其中与保护区距离 0~2 km 范围内丧失的湿地面积最多,为 686.92 km<sup>2</sup>,依次减少.湿地丧失面积随着与道路距离的增加而增加,在与道路距离为 0~0.5 km 范围内,湿地面积丧失 10.24%;与道路距离为 3.9~5 km 范围内,湿地丧失 17.22%.湿地丧失随着与河流距离的增加大体上呈减少的趋势,在与河流距离为 0~0.5 km 范围内湿地丧失了 829.85 km<sup>2</sup>.湿地面积丧失随着与居民点距离的增加而增加,在与居民点距离为 0~0.5 km 范围内湿地丧失 4.52%,在与居民点距离为 2.5~3.2 km 范围内湿地丧失 29.05%.

地貌类型为低河漫滩时,湿地面积丧失最多为 48.47%,主要位于小三江平原的腹地,其次在河流阶地

也有较多湿地丧失,丧失 23.65%。在海拔为 51~55 m 的地区,湿地面积丧失最多,为 2 584.09 km<sup>2</sup>,主要位于小三江平原的北部。坡度为 1°~3°的地区,湿地面积丧失较多,占总丧失面积的三分之二左右。在年降水量为 538~569 mm 和 497~524 mm 的地区,有较多湿地丧失,分别丧失 23.28%和 22.09%;在平均气温为 3.21℃~3.49℃的地区,湿地丧失 45.58%,主要位于小三江平原的南部地区。

### 2.3 沼泽湿地变化驱动因子的定量分析

#### 2.3.1 小三江平原沼泽湿地变化驱动因子的贡献率

借助地理探测器的因子探测器模块获得 1986—2010 年湿地变化各驱动因子的贡献率,对比分析自然因子与社会因子对湿地变化的相对重要性。

1986—2010 年间随着社会因子的参与使原来各驱动因子的贡献率有所改变,该时期湿地丧失的贡献率从大到小排列依次为:土壤类型(26.9%)、坡度(18.6%)、地貌(18.2%)、与河流距离(10.8%)、年降水量(8.1%)、海拔(7.1%)、平均气温(3.8%)、行政区划(3.6%)、与保护区距离(1.5%)、与居民点距离(1.4%)、与道路距离(0.5%)。

1986—2010 年小三江平原湿地面积的丧失是自然因子和社会因子共同作用的结果,其中土壤类型、坡度、地貌等自然因子对湿地面积的丧失具有较强的贡献率,而行政区划、与保护区距离、与居民点距离、与道路距离对湿地面积丧失的贡献率较小。

#### 2.3.2 小三江平原湿地时空格局变化驱动因子的交互作用

借助地理探测器的交互作用探测器模块获得 1986—2010 年湿地变化各驱动因子的相对重要性,得到各驱动因子对湿地变化的交互作用,结果见表 2。

由表 2 可知,1986—2010 年间各驱动因子对湿地变化的交互作用大部分都是非线性增强的,其中解释力较大的驱动因子从大到小依次为:与保护区距离/土壤类型(61.5%)>与保护区距离/年降水量(59.2%)>与河流距离/与居民点距离(57.0%)>与保护区距离/与居民点距离(56.3%)>行政区/与居民点距离(55.0%)>海拔/与居民点距离(54.5%)=与保护区距离/行政区(54.5%),各因子之间的交互作用均在 54%以上,其中与保护区距离、与居民点距离和行政区的相互作用均呈非线性增强作用,使彼此对湿地丧失的解释力增大,相互作用增强的主要是人为因子。与河流距离/坡度、土壤类型/坡度、土壤类型/地貌之间呈现相互减弱的交互作用,这些交互作用较小的驱动因子就其交互作用的具体表现形式来看,在湿地变化的过程中每一组驱动因子之间都具有相互减弱的作用,使其对湿地丧失的解释力下降。相互作用减弱的坡度、土壤类型、地貌、与河流距离都是自然因子,说明自然因子之间的相互作用对湿地面积的丧失作用是相互减弱的。

相互作用增强的主要是人为因子,而相互作用减弱的主要是自然因子,说明自然因子虽然在小三江平原湿地丧失中起主要作用(贡献率较大),但它们必须在人为因子的作用下,与人为因子相互作用,才能造成湿地面积的丧失,没有人为因子的作用,仅自然因子对湿地面积的丧失作用不大(这可以从单个自然因子对湿地面积丧失的贡献率不超过 30%看出)。自然因子与人为因子非线性增强的贡献率远大于两者之和,如与保护区距离/土壤类型=0.615>与保护区距离(0.015)+土壤类型(0.269),相互作用之后的贡献率是它们单个因子贡献率之和的 2 倍之多,说明小三江平原湿地丧失是自然因子和人为因子综合作用的结果,人为因子叠加在自然因子之上,共同造成小三江平原沼泽湿地的大面积丧失。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

(1) 1986—2010 年间小三江平原沼泽湿地丧失严重(丧失 47.5%),湿地丧失面积较多的区域为:草甸土和沼泽土的地区、低河漫滩地貌地区、海拔 51~55 m 地区、坡度 1°~3°地区以及富锦市;湿地丧失面积呈现与保护区距离的增加而减少、与河流距离的增加而减少、与道路距离的增加而增加、与居民点距离的增加而增加的趋势。

(2) 1986—2010 年间,小三江平原沼泽湿地丧失的主要驱动因子为土壤类型、坡度、地貌、与河流距离、年降水量和海拔等因子,各驱动因子对湿地丧失贡献率的大小分别为 26.9%,18.6%,18.2%,10.8%,8.1%和 7.1%。

表2 1986—2010年小三江平原湿地丧失各驱动因子的交互作用

驱动因子 $D_1/D_2$	$C=P_{D,H}(D_1 \cap D_2)$	$P_{D,H}(D_1)$	$P_{D,H}(D_2)$	$A=P_{D,H}(D_1)+P_{D,H}(D_2)$	C与A大小的比较
与保护区距离/土壤类型	0.615	0.015	0.269	0.284	C>A
与保护区距离/年降水量	0.592	0.015	0.081	0.096	C>A
与河流距离/与居民点距离	0.570	0.108	0.014	0.122	C>A
与保护区距离/与居民点距离	0.563	0.015	0.014	0.029	C>A
行政区/与居民点距离	0.550	0.036	0.014	0.050	C>A
海拔/与居民点距离	0.545	0.071	0.014	0.085	C>A
与保护区距离/行政区	0.545	0.015	0.036	0.051	C>A
与河流距离/行政区	0.519	0.108	0.036	0.144	C>A
与保护区距离/坡度	0.519	0.015	0.186	0.201	C>A
年降水量/海拔	0.519	0.081	0.071	0.152	C>A
土壤类型/年降水量	0.518	0.269	0.081	0.350	C>A
与道路距离/年降水量	0.508	0.005	0.081	0.086	C>A
土壤类型/与居民点距离	0.508	0.269	0.014	0.283	C>A
行政区/土壤类型	0.508	0.036	0.269	0.305	C>A
与道路距离/与保护区距离	0.501	0.005	0.015	0.020	C>A
坡度/年降水量	0.499	0.186	0.081	0.267	C>A
行政区/地貌	0.499	0.036	0.182	0.218	C>A
土壤类型/海拔高度	0.498	0.269	0.071	0.340	C>A
行政区/年降水量	0.497	0.036	0.081	0.117	C>A
行政区/坡度	0.496	0.036	0.186	0.222	C>A
年降水量/与居民点距离	0.496	0.081	0.014	0.095	C>A
平均气温/海拔	0.494	0.038	0.071	0.109	C>A
与保护区距离/地貌	0.491	0.015	0.182	0.197	C>A
平均气温/年降水量	0.488	0.038	0.081	0.119	C>A
与道路距离/海拔	0.485	0.005	0.071	0.076	C>A
与保护区距离/平均气温	0.479	0.015	0.038	0.053	C>A
与河流距离/与保护区距离	0.478	0.108	0.015	0.123	C>A
坡度/平均气温	0.477	0.186	0.038	0.224	C>A
年降水量/地貌	0.477	0.081	0.182	0.263	C>A
与河流距离/海拔	0.476	0.108	0.071	0.179	C>A
坡度/海拔	0.475	0.186	0.071	0.257	C>A
海拔/地貌	0.475	0.071	0.182	0.253	C>A
坡度/与居民点距离	0.474	0.186	0.014	0.200	C>A
土壤类型/平均气温	0.474	0.269	0.038	0.307	C>A
行政区/平均气温	0.473	0.036	0.038	0.074	C>A
地貌/与居民点距离	0.471	0.182	0.014	0.196	C>A
与河流距离/土壤类型	0.470	0.108	0.269	0.377	C>A
平均气温/与居民点距离	0.469	0.038	0.014	0.052	C>A
与道路距离/与河流距离	0.463	0.005	0.108	0.113	C>A
与河流距离/年降水量	0.453	0.108	0.081	0.189	C>A
与道路距离/平均气温	0.447	0.005	0.038	0.043	C>A
坡度/地貌	0.445	0.186	0.182	0.368	C>A
与河流距离/平均气温	0.442	0.108	0.038	0.146	C>A
平均气温/地貌	0.433	0.038	0.182	0.220	C>A
与河流距离/地貌	0.417	0.108	0.182	0.290	C>A
土壤类型/坡度	0.417	0.269	0.186	0.455	C<A
土壤类型/地貌	0.408	0.269	0.182	0.451	C<A
与道路距离/行政区	0.405	0.005	0.036	0.041	C>A
与道路距离/土壤类型	0.387	0.005	0.269	0.274	C>A
与道路距离/地貌	0.359	0.005	0.182	0.187	C>A
与道路距离/坡度	0.274	0.005	0.186	0.191	C>A
与保护区距离/海拔	0.255	0.015	0.071	0.086	C>A
与河流距离/坡度	0.254	0.108	0.186	0.294	C<A
行政区/海拔	0.187	0.036	0.071	0.107	C>A
与道路距离/与居民点距离	0.105	0.005	0.014	0.019	C>A

注:  $D$  为影响因子;  $H$  为沼泽湿地变化率;  $P_{D,H}$  为  $D$  为  $H$  的解释力, 即贡献率.  $C>A$  为非线性协同作用,  $C<A$  为拮抗作用.

(3) 各因子之间的交互作用大部分是非线性增强, 其中与保护区距离、与居民点距离和行政区的相互作用均呈非线性增强作用, 彼此相互作用对湿地丧失的解释力增大. 坡度、土壤类型、地貌、与河流距离等自然因子之间的相互作用对湿地面积的丧失作用是相互减弱的.

(4) 小三江平原湿地丧失是自然因子和人为因子综合作用的结果,人为因子叠加在自然因子之上,共同造成小三江平原沼泽湿地的大面积丧失.自然因子虽然对小三江平原湿地丧失的贡献率较大,但它们必须与人为因子相互作用,才能造成湿地面积的丧失.

### 3.2 讨论

湿地变化是自然因素及社会因素综合作用的结果,研究其驱动因子有很多方法,如简单因果分析<sup>[23-25]</sup>、灰色关联度分析<sup>[26-27]</sup>、偏相关分析<sup>[28]</sup>、湿地水文方程<sup>[29]</sup>、偏最小二乘回归方法<sup>[30]</sup>、Tobit 模型<sup>[31]</sup>和地理加权回归模型<sup>[32]</sup>等,由于方法及数据的局限性,都存在一定的优点及缺陷(见表 3).

地理探测器模型是一种新的评价地理事物与其驱动因子之间关系的空间分析模型,主要通过地理事物空间分异与驱动因子空间分异的两空间分布的一致性检验,探讨驱动因子在地理事物空间分异方面的作用.将地理探测器模型引进行湿地变化驱动力的定量研究中,具有以下优点:(1)可以定量分析引起湿地变化各驱动因子之间的相对重要性;(2)定量分析各驱动因子在湿地变化中的相互作用(协同作用、拮抗作用或相互独立);(3)地理探测器模型的驱动因子既可以是可量化因子,也可以是定性因子.同时在使用地理探测器做湿地变化驱动力分析过程中也存在一定的缺陷:(1)较难解释驱动因子之间交互作用的机理;(2)连续型驱动因子离散化处理没有明确的标准,处理的结果直接影响着地理探测器结果的精度,因此在驱动因子分类或分级中定性成分较大.

表 3 湿地变化驱动因子研究方法的对比

方法	优点	缺点	代表论文
简单因果分析	利用文字语言直观描述,简单说明湿地减少是人为开垦耕地的原因,借助于经验及过去发生和现在的延续状况说明人口增长和气候因素影响其湿地面积的减少.	主要是定性分析,方法粗糙,缺少统计数据,未能做到定量分析,结果不能够进行检验.	参考文献[20, 22-23].
灰色关联度分析	基于灰色系统的灰色过程,进行因素间时间序列的比较,能够确定哪些是影响大的主导因素,是一种动态过程的研究,同时研究系统中各子系统(或因素)之间的数值关系,该方法在样本数较少的情况下适用.	需要对各项指标的最优值进行现行确定,主观性过强,同时部分指标最优值难以确定.定性定量相结合,没有完全实现量化,驱动因子必须是可量化的要素,结果不能够进行检验.	参考文献[26]和[27].
偏相关分析	研究变量之间相关关系时,控制其他变量的影响,可以单独研究两个要素间的相互关系和影响程度,可以看出不同类型湿地变化的驱动因子不同,可以进行检验.	该方法所需要的数据量较大,不能得出几个要素综合作用的相关关系及影响,同时驱动因子必须是可量化的要素.	参考文献[28].
湿地水文方程方法	能够定量分析湿地退化驱动力因子的贡献率,并且能用贡献率的正负区分水文驱动因子是输入或输出.	仅考虑水文因素,忽略其他因素的影响,具有一定的主观性,并且对其结果的准确性不能够检验.	参考文献[29].
偏最小二乘回归	对样本容量没有特殊要求,在样本数较少的情况下可以进行回归建模;可以消除各变量集合内部的相关性,排除系统中的噪声干扰.	模型精度评价方法主观性太强,通过观测值与预测值的比较图直观考察偏最小二乘回归的质量.	参考文献[30].
Tobit 模型	可以对湿地变化的潜在驱动因素进行定量分析.	Tobit 模型需要两个基本假设:(1)解释变量不完全相同;(2)随机变量服从联合正态分布.	参考文献[31].
地理加权回归	可以排除地理加权回归模型中弱相关因子的干扰.	诊断性不高,在进行地理加权回归之前需要先筛选关键因子.	参考文献[32].

一些学者对湿地变化驱动力进行了定量分析,得出与我们相类似的结论.如王宗明等<sup>[18]</sup>的研究表明,不同土壤类型会影响沼泽湿地的丧失和退化,1954—2005 年间三江平原湿地在草甸土、白浆土、沼泽土、暗棕壤和黑土等主要土壤类型区域丧失面积最大( $256.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ),减少率为 73%;Brock 等<sup>[33]</sup>的研究表明,气温升高  $3^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$ ,欧洲南部半干旱地区的湿地面积在 5 年之内将减少 70%~80%;郭洁等<sup>[34]</sup>的研究表明,1971—2000 年间,随着气温的升高、降水量的减少,诺尔盖地区沼泽逐渐旱化,湿地面积大幅度减少.1975—2006 年间,三江平原洪河地区气温以  $0.02^\circ\text{C}/\text{a}$  的速度增加,降水量以  $4.22 \text{ mm}/\text{a}$  的速度下降,在此期间,洪河地区湿地面积不断减少<sup>[35]</sup>,因此气温和降水量也是三江平原沼泽湿地减少

的自然驱动力之一。从地貌类型上看,1954—2010年,三江平原沼泽湿地的丧失主要集中在地势较低的低河漫滩、河流阶地、高河漫滩3种地貌类型上,沼泽湿地丧失的规律为由河流阶地到河漫滩,再到河曲带的过程<sup>[36]</sup>;姚允龙等<sup>[37]</sup>对挠力河流域沼泽湿地开垦过程的研究结果也表明沼泽湿地的开垦遵循由高河漫滩到河流阶地,再到低河漫滩的过程,后期(2000—2010年)沼泽湿地开垦又转向海拔相对较高处的原因是前期海拔较高处和较低处的沼泽湿地大部分已被开垦,后期是对未开垦而保留的破碎化湿地和孤立湿地的开垦。陈志科等<sup>[38]</sup>对诺尔盖高原湿地变化的研究结果表明,坡度 $<5^\circ$ 的沼泽湿地分布面积占总面积的比例较大;而王宗明等<sup>[39]</sup>的研究认为,三江平原在坡度 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内湿地开垦的比例较高,因此,坡度、地貌和海拔也会引起小三江平原沼泽湿地的退化。Cui等<sup>[35]</sup>的研究结果表明,三江平原洪河地区沼泽湿地在1975—2006年间,距离河流 $0\sim 4$  km范围内,湿地面积急剧减少,而在距离河流6 km以外的沼泽湿地减少的速率逐渐减慢并趋于稳定,距离公路 $0\sim 4$  km范围内湿地面积减少速率比距离公路4 km以外的湿地减少速率要快。

研究区域湿地退化的主要原因是农业开发,如何选择合适的驱动因子反映农业开垦活动是关键。受数据获取途径较少、量化难度较大的影响,我们未能全面地将人口、GDP、政策等人为干扰因子考虑到研究中,在今后应当加大对数据的搜集,将更全面的人为干扰因子考虑到研究中去。本文基于GIS技术和地理探测器分析了湿地变化的驱动力,是对定量分析湿地变化驱动力模型与方法的探讨。受文献资料限制及地理探测器方法本身局限性的影响,还不能很好解决各驱动因子交互作用机理及对地理探测器模型结果的合理验证,在以后的研究中将通过野外调查与实验,改进地理探测器模型等方法,进行更加深入的研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 美国国家科学院国家研究理事会. 理解正在变化的星球[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] BAI J H, LU Q Q, WANG J J. Landscape pattern evolution processes of alpine wetlands and their driving factors in the Zoige Plateau of China[J]. *J Mt Sci*, 2013, 10: 54-67.
- [3] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题[J]. *地理科学*, 2003, 23(3): 264-270.
- [4] ZHOU D, GONG H L, WANG Y Y, et al. Study of driving forces of wetland degradation in the Honghe National Nature Reserve in the Sanjiang Flood plain, North-east China[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2009, 14: 101-111.
- [5] LARSEN L G, HARVEY J W. Modeling of hydro ecological feedbacks predicts distinct classes of landscape pattern, process, and restoration potential in shallow aquatic ecosystems[J]. *Geomorphology*, 2011, 126(3/4): 279-296.
- [6] MANTYKA-PRINGLE C S, MARTIN T G, RHODES J R. Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: a systematic review and meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1239-1252.
- [7] ALFREDO B D, DIEGO A B, FRANCISCO L T, et al. Spatial distribution of tropical wetlands in Central Brazil as influenced by geological and geomorphological settings[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, 46: 161-169.
- [8] 白军红, 房静思, 黄来斌, 等. 白洋淀湖沼湿地系统景观格局演变及驱动力分析[J]. *地理研究*, 2013, 32(9): 1634-1644.
- [9] 周德民, 宫辉力, 胡金明, 等. 三江平原淡水湿地生态系统景观格局特征研究——以洪河湿地自然保护区为例[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 86-96.
- [10] 邓伟, 白军红. 典型湿地系统格局演变与水生态过程——以黄淮海地区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] LAMBIN E F, TURNER B L, GEIST H J, et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths[J]. *Glob Environ*, 2001, 11: 261-269.
- [12] GONG Z N, LI H, ZHAO W J, et al. Driving forces analysis of reservoir wetland evolution in Beijing during 1984-2010[J]. *J Geogr Sci*, 2013, 23(4): 753-768.
- [13] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [14] HU Y, WANG J F, REN D, et al. Geographical-detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(6): e21427.
- [15] 刘红玉, 李兆富. 小三江平原湿地水质空间分异与影响分析[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(10): 933-937.
- [16] LIU H Y, ZHANG S K, LI Z F, et al. Impacts on wetlands of large-scale land-use changes by agricultural development: the Small Sanjiang Plain, China[J]. *Ambio*, 2004, 33(6): 284-288.
- [17] 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 地形因子对三江平原土地利用/覆被变化的影响研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 10-16.
- [18] 王宗明, 刘殿伟, 宋开山, 等. 土壤类型对三江平原土地利用/覆被变化的影响[J]. *资源科学*, 2008, 30(5): 694-701.

- [19] 崔瀚文,姜琦刚,程彬,等.东北地区湿地变化影响因素分析[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(2):214-223.
- [20] 张有智,吴黎.三江平原湿地动态变化及驱动力分析[J].黑龙江农业科学,2010(12):151-154.
- [21] 全国土壤普查办公室.1:100万中华人民共和国土壤图[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [22] WANG J F,HU Y.Environmental health risk detection with GeogDetector[J].Environmental Modeling & Software,2012,33:114-115.
- [23] 黄妮,刘殿伟,王宗明,等.三江平原萝北县湿地农田化过程与驱动机制分析[J].地球信息科学学报,2009,11(3):385-387.
- [24] 赵丹丹,刘吉平,刘家福.近30年吉林省西部生态系统服务价值动态变化研究[J].广东农业科学,2013,40(23):157-158.
- [25] 陈雪梅,刘吉平,田学智.近50年别拉洪河流域湿地时空格局变化研究[J].广东农业科学,2013,40(15):170-171.
- [26] JIANG W G,WANG W J,CHEN Y H,et al.Quantifying driving forces of urban wetlands change in Beijing City[J].City Journal Geographical Sciences,2012,22(2):301-314.
- [27] 赵峰,刘华,张怀清,等.近30年来三江源典型区湿地变化驱动力分析[J].湿地科学与管理,2012,3(8):58-59.
- [28] 陈永富,刘华,邹文涛,等.三江源湿地变化驱动因子定量研究[J].林业科学研究,2012,25(5):545-550.
- [29] 侯鹏,申文明,王桥,等.基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究[J].生态学报,2014,34(3):660-666.
- [30] 崔瀚文,姜琦刚,程彬,等.东北地区湿地变化影响因素分析[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(2):214-223.
- [31] 魏强,杨丽花,刘永,等.三江平原湿地面积减少的驱动因素分析[J].湿地科学,2014,12(6):766-771.
- [32] 宫宁,牛振国,齐伟,等.中国湿地变化的驱动力分析[J].遥感学报,2016,20(2):172-183.
- [33] BROCK T,VIERSSEN W.Climatic change and hydro-phyte-dominated communities in inland wetland ecosystems [J].Wetlands Ecology and Management,1992,2(1):37-49.
- [34] 郭洁,李国平.若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J].高原气象,2007,26(2):422-428.
- [35] CUI L J,GAO C J,ZHOU D M,et al.Quantitative analysis of the driving forces causing declines in marsh wetland landscapes in the Honghe region,northeast China,from 1975 to 2006[J].Environ Earth Sci,2014,71(3):1357-1367.
- [36] LIU J P,SHENG L X,LU X G,et al.A dynamic change map of marshes in the Small Sanjiang Plain,Heilongjiang,China,from 1955 to 2005[J].Wetlands Ecology and Management,2015,25(3):309-320.
- [37] 姚允龙,吕宪国,于洪贤,等.三江平原挠力河流域湿地垦殖的影响因素[J].东北林业大学学报,2011,39(1):72-74.
- [38] 陈志科,吕宪国.两个时期若尔盖高原沼泽湿地景观格局的对比研究[J].湿地科学,2010,8(1):8-14.
- [39] 王宗明,宋开山,刘殿伟,等.1954~2005年三江平原沼泽湿地农田化过程研究[J].湿地科学,2009,7(3):208-217.

## Quantitative study on the driving factors of marsh change based in Geographical Detector —Case study on Small Sanjiang Plain

LIU Ji-ping<sup>1,2</sup>, MA Chang-di<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, SHENG Lian-xi<sup>2</sup>

(1. College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping 136000, China;

2. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

**Abstract:** The paper takes the Small Sanjiang Plain as the study area, for the wetland change there is severe, using the technology of GIS and RS, combined with the geographical detector method, to make the quantitative analysis of driving factors for wetland changes and reveal the role and relationship in the wetland change between every factor. The results show that: the wetland loss is severe from 1986 to 2010. The more severe areas of wetland loss are mainly located in central and northeast of meadow soil and bog soil types, low river floodplain geomorphology types, 51~55 m altitude and the slope of 1~3 degrees. From 1986 to 2010, the power of determinant to wetland loss of each driving factors is soil type, slope, geomorphology, and distance from the river, the annual precipitation and altitude; The interaction between each factor is nonlinear enhancement, and the interaction of distance, with the residential district protection distance and administrative region show a nonlinear enhancement effect. The interaction between slope, soil type, topography, and the distance from the river and other natural factors are weakened. Although the power of determinant of natural factors have the bigger effect to the wetland loss of Small Sanjiang Plain, it have to interact with human factors, which commonly cause a big area of wetland loss in Small Sanjiang plain.

**Keywords:** driving factor; quantitative study; marsh loss; Geographical Detector; Small Sanjiang Plain

(责任编辑:方林)