

# 吉林省西部湿地变化的 气候水文效应研究

刘雁 著



科学出版社

# 吉林省西部湿地变化的 气候水文效应研究

刘雁著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以吉林省西部为研究区域,以湿地格局变化为研究对象,探讨湿地变化产生的区域气候、水文效应及湿地格局优化。本书共分为四部分:第一部分(第1~2章)介绍本书内容的研究背景、意义,以及吉林省西部自然经济社会概况;第二部分(第3章)揭示吉林省西部1985~2010年湿地变化过程,阐明湿地格局的变化特征;第三部分(第4章)探讨湿地变化对区域气温和降水量的影响,建立气候变化与湿地变化之间的数学模型,揭示湿地面积和格局变化能够调节区域气候;第四部分(第5章)研究洮儿河流域沼泽湿地变化和流域径流量减少的关系;第五部分(第6~8章)模拟2010~2020年吉林省西部湿地格局变化,评估不同情景下湿地格局在景观特征、抗干扰能力和生态系统服务功能价值方面的差异性,并总结结论。本书不仅为吉林省西部生态环境调控和建设提供科学依据,而且丰富和发展了半干旱区湿地生态服务功能理论与方法。

本书可供从事地理学、湿地生态学、环境生态学等学科领域的科研工作者、大专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

吉林省西部湿地变化的气候水文效应研究 / 刘雁著. —北京: 科学出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-03-060725-6

I. ①吉… II. ①刘… III. ①沼泽化地—气候变化—水文调查—吉林  
IV. ①P942.340.78

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第042923号

责任编辑: 刘浩旻 李嘉佳 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年3月第一版 开本: 720×1000 B5

2019年3月第一次印刷 印张: 8

字数: 160 000

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

湿地具有重要的调节气候、调蓄水文、降解污染、维持地球化学循环等环境功能和效益。湿地变化通过改变或弱化湿地功能，会带来显著的环境效应。吉林省西部属于生态脆弱区，湿地作为重要的生态功能单元，其发展变化对区域生态环境产生重要影响。因此，揭示吉林省西部湿地变化特征、探讨湿地变化的环境效应和湿地格局优化，能够为探索半干旱区人为干扰下受损生态系统变化特征和规律、揭示湿地生态服务功能和指导区域生态建设实践提供理论基础和科学依据。

本书以遥感影像为数据来源，分析了吉林省西部 1985~2010 年湿地动态变化过程，指出了湿地格局的变化特征；结合长时间序列的气象台站观测数据，基于区域气候变化特征分析，探讨了湿地变化对区域气温和降水量的影响，建立了气候变化与湿地变化之间的数学模型，揭示出湿地面积和格局变化能够调节区域气候；基于洮儿河流域水文变化特征分析，揭示出沼泽湿地变化和流域径流量减少的关系；基于情景分析法，模拟了 2010~2020 年吉林省西部湿地格局变化，评估了不同情景下湿地格局在景观特征、抗干扰能力和生态系统服务功能价值方面的差异性。本书主要研究结论如下。

(1) 1985~2010 年吉林省西部湿地格局变化明显。1985~2010 年，研究区湿地总面积呈增加趋势，共增加 24.41%，各类型湿地面积的变化趋势不同，其中自然湿地（沼泽、河流湖泊）的面积逐渐减少，主要向耕地、草地和盐碱地转移，而水田面积增加幅度较大，水田面积增加方式有旱田改水田和荒地改水田两种方式；从空间格局看，自然湿地丧失较大的区域主要集中分布在嫩江、西流松花江沿岸，以及查干湖、月亮泡等湖泊附近，水田面积增加的区域主要位于引嫩入白工程、哈达山水利枢纽工程、大安灌区工程三大水利工程惠及区；对变化热点区的分析表明，研究区的西南部、前郭尔罗斯蒙古族自治县和松原的西部一直是湿地变化的热点地区。

(2) 湿地面积增加和格局变化可调节区域气候。研究区气候变化与林地、草地和湿地变化的关系较密切，三者相比，湿地变化在调节区域气候中发挥着更主要的作用；湿地面积和格局变化对区域内气候产生的影响，主要体现在最高气温和降水量的变化上，最高气温倾向率与湿地变化率呈负相关关系，降水量倾向

率与湿地变化率呈正相关关系；研究区最高气温倾向率和降水量倾向率与湿地格局均呈现较好的空间对应关系，区域内湿地增长明显的中东部，最高气温上升幅度较小，降水量减少幅度也较小，而湿地面积丧失较多的西部和中南部，最高气温上升幅度较大，降水量减少幅度也较大。

(3) 沼泽湿地变化可影响流域径流量。1985~2010年洮儿河流域径流量动态变化的分析结果表明，除水利工程的影响外，在与各类土地利用方式的相关关系分析中，沼泽湿地变化与流域径流量变化关系最为密切；研究期间洮儿河流域年均径流量呈持续减少趋势，就其人为原因而言，土地利用格局变化引起的流域沿岸沼泽湿地面积的减少是不容忽视的；突变检测结果表明，洮儿河流域径流量的突变点发生在1995年，此后洮儿河流域下垫面因素对径流量的影响逐渐增大，到2000年以后，成为导致洮儿河流域径流量减少的主要原因。

(4) 不同情景下的湿地格局及生态功能具有明显差异，生态优先情景下研究区的生态系统服务功能价值最高，抗干扰能力最强。不同情景下的湿地格局的空间分布具有明显差异。2020年，生态优先情景下研究区的生态系统服务功能价值为481.04亿元，其中湿地生态系统服务功能价值可达到262.52亿元，贡献率为54.57%；从各项生态系统服务功能来看，湿地的废物处理、涵养水源、气候调节三种生态服务功能处于主要地位，贡献率为77.40%；湿地受到外界干扰程度较为平稳，并呈现逐年下降态势，具有较强的抗干扰能力和维持自我稳定能力，此种湿地格局能够产生最大的生态系统服务功能价值，实施科学规划下的生态建设是增加区域生态系统服务功能价值的有效途径。

本书内容是笔者在东北师范大学读博士期间，在吉林省科技发展计划重点项目“吉林省西部水田格局优化设计”（20100425）资助下所取得的研究成果。在此特别感谢笔者导师——国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室主任盛连喜教授、东北师范大学环境学院张继权教授、吉林师范大学旅游与地理科学学院刘吉平教授的指导与支持，感谢项小云、王小伦、张玉等研究生在图表清绘和文稿校对方面提供的帮助。

本书在成书过程中，坚持理论与实践相结合，力求将科学性与实用性做得更好。但是由于作者知识水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位专家、同行和广大读者批评指正。

刘雁

2018年12月

# 目 录

前言	1
第1章 导论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	4
第2章 吉林省西部概况	14
2.1 自然概况	14
2.2 社会经济概况	19
2.3 本章小结	23
第3章 吉林省西部湿地空间格局动态变化	24
3.1 数据来源与研究方法	24
3.2 土地利用变化过程分析	29
3.3 湿地空间格局变化	35
3.4 湿地变化热点地区的确定	39
3.5 本章小结	42
第4章 吉林省西部湿地变化的气候效应	43
4.1 数据来源与研究方法	43
4.2 湿地变化对气温的影响	44
4.3 湿地变化对降水量的影响	49
4.4 问题讨论	52
4.5 本章小结	54
第5章 湿地变化的水文效应	55
5.1 数据来源与研究方法	55
5.2 洮儿河流域概况	57
5.3 洮儿河流域土地利用变化	58
5.4 洮儿河流域径流量与土地利用的灰色关联度分析	64
5.5 洮儿河流域湿地变化对径流量统计特征值的影响	66
5.6 洮儿河流域湿地变化对径流量影响估算	69
5.7 本章小结	71

---

第 6 章 基于 CLUE-S 模型的吉林省西部湿地格局情景模拟 .....	72
6.1 数据来源与研究方法 .....	72
6.2 CLUE-S 模型模拟与验证 .....	74
6.3 不同情景模拟下吉林省西部湿地格局变化 .....	85
6.4 本章小结 .....	90
第 7 章 不同情景下吉林省西部湿地格局的优化分析 .....	91
7.1 研究方法 .....	91
7.2 不同情景下景观格局指数分析 .....	95
7.3 不同情景下湿地景观干扰指数分析 .....	101
7.4 不同情景下生态系统服务功能价值分析 .....	103
7.5 吉林省西部湿地格局优化的建议 .....	106
7.6 本章小结 .....	108
第 8 章 结论与展望 .....	109
8.1 结论 .....	109
8.2 展望 .....	111
参考文献 .....	112

# 第1章 导 论

## 1.1 研究背景与意义

### 1.1.1 研究背景

#### 1.1.1.1 湿地科学研究的热点领域

湿地具有重要的调节水文、降解污染、调节气候、防止侵蚀、维持地球化学循环、提供重要物种栖息地等环境功能和效益<sup>[1-2]</sup>。因此,湿地被誉为“地球之肾”和“生命的摇篮”。

在自然和人类的干扰下,湿地是地球上受到破坏和威胁最为严重的生态系统之一,近半个多世纪以来,许多重要湿地或是面积锐减,或是结构功能受损,全球湿地生态系统发生了显著的变化。湿地变化的原因既包括自然条件下湿地的形成演化,同时也包括人类活动干扰下湿地结构功能的改变及其消亡。湿地变化会引起区域内不同土地景观单元间能量、物质及营养成分的变化,从而改变或弱化湿地功能,所以必然会带来显著的环境效应<sup>[3-5]</sup>。湿地环境效应一方面作用于全球变化,如对碳“源”、碳“汇”过程的影响等;另一方面表现为对区域环境的影响,如造成区域气候变干、河流径流量减少等<sup>[6]</sup>。重视人类活动对湿地变化的贡献,以及这种变化带来的环境效应研究成为湿地科学的热点领域和重要方向<sup>[7]</sup>。

#### 1.1.1.2 区域生态建设和经济发展的现实要求

吉林省西部处于中湿润森林草原向半干旱草原及沙漠过渡的地带,行政区划属吉林省西部的白城市和松原市所辖,是候鸟迁徙的重要通道和农牧业发展潜力极大的区域,历史上这里曾是水草丰美、牛羊成群的草原牧业生态区<sup>[8]</sup>。近年来,气候变化和对生态环境的人为破坏,使该地区生态环境质量不断恶化,自然

湿地萎缩、土壤“三化”、气候干旱、洪涝灾害、水资源动态失衡等问题日益突出，导致了区域生态功能日益减退。

湿地在吉林省西部生态环境中居于显要地位<sup>[9]</sup>，湿地的生态功能比其他区域更为突出<sup>[10]</sup>。湿地类型以沼泽、湖泊为主。向海湿地和莫莫格湿地是国家级自然湿地保护区，湿地面积辽阔，分布集中连片，区域内拥有大量的芦苇沼泽、草原、天然林和其他草本植物及野生动物等资源。湿地是吉林省生物多样性最为丰富的生态系统之一，向海湿地还被世界自然基金会评审为“具有国际意义的 A 级自然保护区”。但是，近年来，由于气候环境变化和人为破坏，自然湿地面积大幅度减少。为此，吉林省将西部地区确定为生态经济区，把加强湿地保护作为建设重点和方向，开展了大规模的生态工程建设，通过“河湖连通”“引霍入向”“引嫩入莫”“引洮入向”等重点湿地补水工程，对向海湿地、莫莫格湿地、查干湖湿地、大安湿地等重要湿地实施生态补水，加大退耕还湿力度，以此充分发挥湿地调节区域生态环境的功能，促进区域生态环境改善，实现经济、社会与生态环境协调发展。

吉林省西部现有人口 510 万人，耕地 26873km<sup>2</sup><sup>[11]</sup>，主要农作物有水稻、玉米、大豆、烤烟、芦苇、棉花等，是我国重要的商品粮基地。为了进一步提高粮食生产能力，2008 年，吉林省开始实施《吉林省增产百亿斤商品粮能力建设总体规划》，计划用 5 年或稍长一点时间，实现粮食生产能力由 2008 年的 500 亿斤<sup>①</sup>提高到 600 亿斤的目标<sup>[12]</sup>。作为粮食增产的主要区域，吉林省西部启动了土地整理工程、重大引水工程及大型灌区建设和改造工程。经过大规模的土地开发和旱田改造，土地利用类型和格局发生了重大变化，这种变化必将对湿地生态系统产生更多的人为干扰，进而引起区域生态环境的变化。

### 1.1.1.3 区域湿地变化及其环境效应研究亟待深入

自 20 世纪 90 年代起，吉林省西部的土地利用格局变化及生态环境问题引起广泛关注，学者分别从土地利用变化及结构<sup>[13-16]</sup>、资源承载力<sup>[17-21]</sup>、生态安全<sup>[22-28]</sup>、生态系统服务功能价值<sup>[29-35]</sup>、区域气候演变<sup>[36]</sup>等不同角度对此开展了研究工作。在此背景下，针对吉林省西部湿地开展的专题研究也逐渐丰富起来，已有的研究主要侧重于湿地现状调查及保护<sup>[37]</sup>，湿地系统的水质和生态需水量<sup>[38]</sup>，有益、有毒元素的来源、迁移<sup>[39]</sup>等，此外，还有部分学者对灌区水田开

① 1 斤=0.5kg。

发所引起的土壤盐碱化<sup>[40-42]</sup>、地表水质<sup>[43]</sup>、土壤肥力<sup>[44]</sup>、土壤性状<sup>[45]</sup>进行了研究。

就目前而言,已有的吉林省西部湿地研究呈现以下特点与不足:①关注湿地变化所引起的或水或土等单一环境要素的变化,缺少对湿地变化所引起的区域气温、降水、流域水文等重要环境要素变化情况的研究。②关注湿地系统的环境要素变化的现状研究,缺少对长时间序列环境要素变化特征、趋势的研究。③尚缺少关于湿地变化-环境变化关系、环境效应的定量分析等研究。因此,系统地开展湿地空间格局变化对区域环境效应研究,将有助于进一步深入认识区域环境发展趋势,为区域政策的制定提供科学依据。

### 1.1.2 研究意义

本书确定的研究区域是吉林省规划的西部生态经济区,在地理位置上处于科尔沁草原和松嫩平原交汇地带,以湿地和草原生态系统为主,是草原和湿地生态系统的过渡带。作为半干旱区重要的生态系统类型,湿地对区域的气候、水文等生态过程影响尤为显著。湿地在吉林省西部生态环境中居于显要地位,湿地的生态功能比其他区域更为突出。同时,研究区也是我国重要的商品粮基地,在国家粮食安全战略中具有重要地位,近年来,吉林省还开展了生态功能区和生态建设等重大工程。生态环境脆弱和生态改造、生态建设活跃并存成为研究区的显要特征<sup>[46]</sup>。

本书的研究正是立足于吉林省西部生态环境现状和生态建设的区域背景,分析该区域湿地时空动态变化特征,在此基础上结合长时间序列的气象数据和流域水文数据,探讨湿地变化对区域气温、降水、流域水文的影响,并对未来时期内湿地时空变化进行情景预测及优化评估。本书的研究具有以下三点重要意义:

- (1) 进一步揭示半干旱区生态环境脆弱地带的湿地变化特征和规律,对探索自然因素和人类活动对受损生态系统变化及动态过程的影响、评价区域生态环境状况及发展趋势具有一定的科学意义。
- (2) 进一步认识湿地对区域气候水文的调节功能,对揭示半干旱区湿地的生态服务功能、生态环境调控和建设的关键问题识别具有一定的科学意义。
- (3) 明晰了在生态建设和改造活跃区,湿地格局优化对稳定和改善区域生态环境的积极意义,对生态建设的方案设计、实施和评价等实践活动具有一定的指导意义。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 湿地变化研究

#### 1.2.1.1 研究进展

湿地是水陆相互作用形成的自然综合体,是自然界最富生物多样性的生态景观和生态系统,是人类生存环境的重要组成部分,占地球陆地面积的4%~6%<sup>[47]</sup>。世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)将湿地生态系统与森林生态系统、农田生态系统并称为陆地三大生态系统。根据《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》,湿地的定义为天然或人工、长久或暂时性的沼泽地、泥炭地或水域地带,静止或流动的淡水、半咸水、咸水体,包括低潮时水深不超过6m的水域。具体类型包括沼泽、泥炭、盐沼、红树林、湖泊、河流、滨海水域等自然湿地及水田、养殖场、盐田、水库和运河等人工湿地<sup>[48]</sup>。

一般来讲,自然景观本身的发展变化是相对缓慢的,需要一个较长的时间尺度,然而,全球人口的膨胀、人类活动的加强,使自然界这种缓慢的变化规律发生了根本性改变,自然景观的变化进程加速<sup>[49]</sup>。湿地历来是人类分布密集区域和土地开发的重要对象。近几十年来,湿地面积、空间格局和功能水平都发生了明显改变。例如,我国三江平原自20世纪50年代以来,历经了三次大规模的开荒浪潮。1949年,耕地面积仅为0.79万km<sup>2</sup>,而到2000年,超过4万km<sup>2</sup>。与此同时,湿地面积由5.34万km<sup>2</sup>(占平原面积的80.1%)下降到0.91万km<sup>2</sup>,减少了80%以上<sup>[50]</sup>;近年来,长江下游地区生态系统变化剧烈,湿地面积明显减少。2015年,沼泽、湖泊、水库/坑塘等湿地面积为10834.4km<sup>2</sup>,较2000年相比,减少比例分别为23.8%、3.8%和3.4%,主要驱动力为城镇扩张和城市化建设<sup>[51]</sup>。

20世纪中叶,苏联率先开展了沼泽湿地的研究工作,研究重点在于沼泽湿地分类,之后,美国和加拿大等国逐渐重视湿地研究,研究的重点逐步扩展到湿地定义、资源调查、景观分类、面积变化以及空间分布等方面<sup>[52-54]</sup>。90年代,随着国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)、国

际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP) 和土地利用/土地覆被变化 (Land-Use and Land-Cover Change, LUCC) 等国际研究计划的开展及许多全球变化方面的课题研究, 湿地变化成为国内外研究者积极探求的热点问题之一。湿地变化研究对认识全球气候变化、生物多样性变化、土地利用/土地覆被变化及区域响应产生重大意义<sup>[55]</sup>。同时, 由于景观生态学被引用到湿地科学领域, 湿地研究更加关注由于人类活动对湿地开发利用所导致的湿地景观变化, 加之遥感 (remote sensing, RS) 和地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术的发展和应用, 湿地变化的深入和精准量化研究得到了切实推动。

在我国, 湿地变化研究起源于湿地资源调查。20世纪70~80年代, 中国科学院完成了我国湿地资源基础调查 (包括沼泽、滩涂和湖泊), 自此我国湿地状况才得以被初步揭示。此后, 国家林业局分别于2003年和2013年两次组织完成了我国湿地资源调查工作 (包括河流、湖泊、沼泽和库塘), 第二次资源调查结果显示, 我国湿地总面积为5360.26万 $\text{hm}^2$ , 湿地率为5.58%, 从分布情况看, 青海、西藏、内蒙古、黑龙江4省 (自治区) 的湿地面积约占全国湿地总面积的50%。2004~2013年, 同口径下湿地面积减少了339.63万 $\text{hm}^2$ , 围垦和基建等人类活动是导致湿地面积减少的重要因素<sup>[56]</sup>。

目前, 我国湿地变化的研究重点侧重于以下两个方面, 一是湿地动态变化和景观格局, 包括湿地面积变化、空间特征、景观格局和驱动力分析等, 二是湿地变化模拟和湿地规划, 包括湿地变化模拟预测、湿地格局优化等。在湿地动态变化和景观格局方面, 我国研究者通过大量的研究与实证分析, 积累了丰富的研究成果。总体看来, 研究对象涵盖了沼泽、湖泊、河流、滩涂、红树林、城市湿地、人工湿地等多种湿地类型, 研究区域集中在三江平原、长江中下游地区、黄河三角洲、东部沿海地区、青藏高原、辽河平原等湿地集中分布区, 研究时段多为20世纪80年代至现在<sup>[57-65]</sup>。例如, 王宪礼等<sup>[66]</sup>对80年代末辽河三角洲湿地景观的格局与异质性进行了研究, 结果表明, 研究区的湿地景观包含稻田、苇田和滩涂, 其中稻田景观斑块最大, 聚集度指数最高; 汪爱华等<sup>[67]</sup>、姜琦刚等<sup>[68]</sup>、Zhang等<sup>[69]</sup>、Song等<sup>[70]</sup>研究了三江平原湿地动态变化过程, 结果显示三江平原沼泽湿地大面积减少, 湿地退化严重, 其中转化为农田的比例最大, 人工湿地大幅度增加, 这一过程受人类活动影响较大; 赵锐锋等<sup>[71]</sup>分析了1980~2000年塔里木河中下游地区湿地景观空间格局变化, 结果表明, 研究区湿地面积显著下降, 随着人类干扰强度的增加, 景观多样性和破碎化程度增加, 优势度

降低,尤以沼泽湿地面积减少幅度最大;蒋锦刚等<sup>[72]</sup>分析了若尔盖湿地 1974 ~ 2007 年的湿地变化过程,结果表明,河流、湖泊、沼泽等湿地面积正在减少,而草地、居民点及建筑用地面积在增加,人为因素是主要驱动力;赵海迪等<sup>[73]</sup>对 1992 ~ 2008 年三江源区人类干扰与湿地空间变化关系进行了分析,结果表明,随着人类干扰强度等级的增大,湿地率和湿地年际变化明显减小;Liu 等<sup>[74]</sup>分析了 2000 ~ 2010 年黄河平原湿地景观格局时空动态变化,结果表明,研究区湿地减少 2.27%,其中自然湿地下降,而人工湿地增加,尤其是虾池,增加了 268.33%,湿地景观格局逐渐变得更为复杂和分散。

在湿地规划与模拟预测方面,我国研究者将湿地归并为土地利用/土地覆被(land use and land cover, LULC)的一种类型,基于土地利用系统内部各组成要素间的相互作用机制,重点从湿地数量需求、空间分配方面对湿地格局进行优化设计和模拟预测研究。现有研究主要着眼于在不同发展战略和政策背景下,模拟区域土地利用系统未来可能出现的格局变化及其区域响应。例如,何春阳等<sup>[75-76]</sup>对我国北方的土地利用变化进行了情景模拟;于欢等<sup>[77]</sup>、赵亮等<sup>[78]</sup>对三江平原湿地时空演化、面积变化进行了模拟;李兴钢<sup>[79]</sup>等对辽河三角洲湿地景观格局进行了预测;欧维新等<sup>[80]</sup>对盐城大丰滨海湿地空间格局进行了优化。此类研究成果也较为丰富。

综合以上研究成果可以看出,不论是全国还是区域范围内,湿地变化的总体趋势是一致的,即自然湿地大面积减少,湿地退化现象严重,大量湿地转化为耕地,湿地景观趋于破碎化,生物多样性降低,而水稻田、库塘等人工湿地增加幅度较大,人类的开发和利用对湿地变化产生极为深刻的影响。

### 1.2.1.2 研究方法

相对于较为一致的湿地变化研究结论,湿地变化的研究方法表现出多样化的明显特点。

首先,景观生态学关于格局、过程、驱动机制分析等原理与方法被广泛应用于湿地变化研究中,有力地推动了湿地景观格局演变特征的研究,使湿地变化的定量分析成为重要研究课题,最为常用的研究方法当属景观格局分析方法。景观格局分析方法是通过使用景观格局指数来实现的,景观格局指数包括形状指数、多样性指数、聚集度指数、分散度指数等几大类别及众多亚类指标。由于景观格局指数对景观结构组成具有较好的表征意义,有利于从景观尺度和斑块尺度了解景观的空间异质性特征,所以在包括湿地变化在内的土地利用变化研

究中的应用最广。

其次,由于景观模型能够帮助研究者建立景观格局和功能之间的相互关系、了解景观未来的变化趋势和结果,所以其成为预测湿地未来变化、描述景观空间特征的有效工具,湿地变化研究也因此经历了由以数量配置为主到预测空间变化的过程。迄今,国际上已经发展了以数学回归为基础的经验-统计模型、基于经济理论和主体行为的概念机理模型和综合模型<sup>[81]</sup>,在中国以 CLUE-S (conversion of land-use and its effects at small regional extent) 模型<sup>[82-88]</sup>、元胞自动机 (cellular automaton)<sup>[77,88-89]</sup>模型、系统动力学 (system dynamics) 模型<sup>[75]</sup>、土地利用情景变化动力学模型 (land use scenarios dynamics model)<sup>[76]</sup>、类型变化跟踪器模型 (type change tracker model)<sup>[90]</sup>应用最为普遍。另外,因为每种方法各有侧重,所以近年来集成嵌套使用两种方法的研究实例逐渐增多。例如,因为马尔科夫模型表现的是一种间接的随机过程,事物的未来可能性仅依赖于先前的状态,所以对自然景观的模拟性较好<sup>[91]</sup>,但却不适于人类干扰强烈的景观变化,需要与一种能够进行空间表达的方法联合,而元胞自动机模型能够解释空间过程和复杂系统的非线性行为,所以马尔科夫模型和元胞自动机模型的集成使用能够更好地预测湿地动态变化<sup>[79,92-93]</sup>,此外还有人工神经网络-元胞自动机模型<sup>[94]</sup>、系统动力学-元胞自动机模型的集成<sup>[95]</sup>。

总体来讲,不论是景观格局分析方法还是景观模型方法,它们的基本步骤可以归纳为:数据收集—景观分类系统建立—空间数据建立—数据分析或模型模拟。具体过程是以 TM 和 ETM 影像、土地利用现状、地形、地方统计年鉴以及实地调查获得的一手资料为主要数据源,通过数字化处理得到数字地图,并从中提取各种湿地数据和信息,然后将这些数据和信息引入景观格局分析或景观模型中,通过量化分析对研究结果加以解释和探讨。值得一提的是,由于 RS 和 GIS 技术具有强大的空间信息采集和处理功能,现已成为湿地变化研究中不可或缺的技术手段,进而深化了湿地变化研究的定量分析与认识<sup>[96-99]</sup>。

## 1.2.2 湿地变化的区域气候效应研究

湿地变化既是全球变化的结果,同时也对全球变化及区域气候环境、水文环境等产生显著而深刻的影响<sup>[100]</sup>。由于人类对湿地进行了过度的开发和破坏,湿地资源的数量和质量急剧下降,从而引起一系列生态环境问题。为此,许多国际研究计划,例如 IGBP、IHDP 和 Lucc 等开展了许多全球环境变化方面的研究课

题,尤其集中在热带森林变化、草地变化及湿地变化对全球环境变化的影响方面。

湿地是一种特殊的下垫面。一方面,气候的变化会引起景观变化,许多研究表明,湿地是对气候变化最敏感的生态系统,其组成、结构、分布和功能与气候因子休戚相关,气候变化对湿地生态系统产生深刻影响<sup>[101-102]</sup>;另一方面,改变了的湿地景观又会对气候造成一定的影响,影响的尺度包含全球和区域。

湿地自由水面的水汽蒸发和湿地植被剧烈的水汽蒸腾为湿地调节区域气候提供了重要的物质基础。湿地的物理特性不同于其他土地覆被类型,在反照率、热容量、粗糙度、能量交换等方面与其他土地覆被类型存在显著差异,导致湿地水体上空气温低于周围陆地形成低温区,从而形成“冷岛”,气候较周边地区更为冷湿<sup>[103]</sup>。在冷辐射和蒸散作用下,湿地具有增加湿度降低温度的冷湿气候效应,从而对区域气候产生调节作用。

湿地对区域空气的降温增湿作用是其生态环境功能之一,在湿地景观结构变化显著区域,通常会对区域气候产生深刻影响,这一事实已经得到广泛的共识。Gordon<sup>[104]</sup>研究表明在加拿大西北部和北美大湖等地区,湖泊湿地能够使7月的局地气温下降2~3℃,潜热通量上升10~45W/m<sup>2</sup>,感热通量下降5~30W/m<sup>2</sup>;Hostetler等<sup>[105]</sup>研究表明,皮拉米德(Pyramid)湖泊能够降低日最高气温,升高日最低气温,增加大气湿度。我国这方面的研究开端始于三江平原气候特征研究,继而拓展到不同气候区的多种湿地类型分布区。研究者在分析湿地变化基础上,通过对气候要素的观测和分析,在湿地气候特征、变化趋势、湿地-气候变化关系、湿地气候的数值模拟等方面取得了较多的成果。湿地具有气温低和相对湿度大的特点,在维持区域“冷湿”效应中的作用在许多研究成果中得到不断的证实。例如,娄德君等<sup>[106]</sup>通过实地观测,对湿地气象站和城市气象站进行了气象要素的比较分析,得出下垫面差异能够加强或缓和气象要素日变化幅度;宝日娜等<sup>[107]</sup>对达里诺尔湿地和两个常规气象站资料对比证实,湿地在夏季具有明显的降低气温作用,可以调节当地气候;聂晓和王毅勇<sup>[108]</sup>通过湿地-旱田对比分析发现,湿地的冷湿效应在夏季和夏季午后时段最为明显;姚允龙<sup>[109]</sup>分析了挠力河流域湿地面积变化对最低和最高气温的影响,证实了湿地大面积垦殖对局地气温具有影响,尤其是对最低气温具有较大影响。湿地的降温增湿作用与气候条件、下垫面性质、湿地面积、植被类型等因素有关<sup>[110-114]</sup>。湿地减少后会造成湿地集中分布区出现气候的暖干化<sup>[115]</sup>。50年代以来,三江平原作为我国最大的淡水湿地分布区,由于湿地大面积被开垦为耕地,地表反射率降低,土壤热通量

增加, 地表热量平衡发生了显著的变化<sup>[50,116]</sup>, 年平均气温呈上升趋势, 年降水量呈下降趋势<sup>[117-119]</sup>, 1955~2005年, 三江平原年均气温每10年上升0.34℃, 年均降水量每10年下降12.9mm<sup>[70]</sup>, 湿地的变化与气温变化呈负相关, 与降水、湿度变化呈正相关<sup>[120]</sup>。

精准的湿地气候要素数据是湿地变化气候效应研究的基础和关键环节, 包括研究区域的蒸发量、降水量、温度、湿度、风速、地表辐射及日照时数等。面对所获取的气候数据, 研究重点不同, 所使用研究方法也不尽相同。①在湿地气候变化特征分析方面, 研究者较多采用方差分析法、气候倾向率法、Yamamoto法、Mann-Kendall法进行气候特征分析及突变检测<sup>[109,113]</sup>; ②在湿地变化和气候变化关系方面, 较多采用灰色关联分析方法判定二者的相关性<sup>[117,121]</sup>; ③气候模式常被用于对下垫面变化所引起的大气环流和气候变化进行数值模拟和预测, 研究重点集中于气候模式本身的数值模拟能力、模拟结果的检验评估和本地化问题<sup>[122-127]</sup>, 较为常用的气候模式主要包括美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的区域气候模式RegCM、美国国家大气研究中心与宾夕法尼亚大学(NCAR/PENN)联合的中期预报模式MM4、MM5, 美国科罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)的区域天气模式RAMS等。

### 1.2.3 湿地变化的流域水文效应研究

在全球变化和人类活动共同作用下, 土地利用变化成为最重要的生态系统变化的表现形式。土地利用变化改变了地表蒸发、土壤水分状况及土地覆被的截留量等, 进而对流域的水量平衡产生影响。土地利用变化的重要环境反应是以水文行为变化出现的, 这种变化对流域水文过程的影响是显著的<sup>[128]</sup>。近年来, 围绕土地利用与土地覆被变化, 分析流域水文过程的响应过程成为研究热点, 其中最具代表性的研究是由美国国家环境保护局设立、在哥伦比亚盆地开展的ICBEMP研究计划<sup>[129]</sup>。该计划系统研究和定量地描述了1900年以来该区域土地利用与土地覆被变化对蒸散发以及径流的产汇流等水文过程的影响。BAHC(IGBP核心项目——水文循环的生物圈方面)与LUCC联合发起了LUCC同水文循环关系的核心研究计划, 该计划在全球选择了数个典型地区开展区域尺度的LUCC如何影响水文循环的观测研究。自20世纪90年代以来, 土地利用格局与水文过程关系成为我国学界的一项重要研究课题。我国研究者先后开展了土地利用方式的变化引起的流域水文响应研究, 在森林、湿地、绿洲、荒漠等不同植被景观带的水文

生态功能、效益及过程响应等方面取得了一些进展<sup>[130-134]</sup>。

湿地发挥着极其显著而重要的水文功能,包括防洪、控制径流和维持河流水位等<sup>[135]</sup>,所以湿地流域水文效应研究也成为湿地科学的重要科学问题,是生态学家和水文学家共同关注的热点研究领域,对流域水资源管理、生物多样性保护、全球气候变化等具有极其重要的意义<sup>[136]</sup>。目前,湿地流域水文效应尤其注重生态过程对流域水文循环过程的影响,其主要表现为湿地与其他组分的空间镶嵌及其时空变化对蒸散发、截留、地表径流、土壤水分入渗和地下水形成的影响,进而影响产汇流过程<sup>[137]</sup>。

流域是以分水岭为界的自然地理区域,是水文响应的基本单元,被视为生态水文过程研究最理想的空间尺度<sup>[137]</sup>。流域系统中的湿地和其他组分空间结构相连,所以共同发挥着水文功能和效应,但是不同组分的生态水文功能是不同的。植被是对水分传输有着重要作用的第一层,是调节降水分配和水分输入的重要过程,使降水量、降水强度、降水分布等发生显著变化,直接影响水分在生态系统中的整个循环过程;土壤层通过入渗、蓄纳等作用,对降水资源分配格局产生的影响最为明显,成为联系地表水与地下水的纽带,也是生态系统水分的主要储蓄库;植被和地面通过蒸发和蒸腾作用向大气输送大量水汽<sup>[138]</sup>。

在全球变化背景下,在以湿地为主的流域中,湿地变化通过加强或抑制以上作用对河流水文变化产生作用。陈刚起和张文芬<sup>[139]</sup>发现三江平原沼泽湿地被开垦后,下垫面水文条件和水平衡要素均发生显著变化,而且这种变化受气候条件制约,在连续少雨年和连续多雨年作用不同;李颖等<sup>[140]</sup>的研究结果表明,因草根层和泥炭层的持水能力很高,所以三江平原的草本沼泽发挥着蓄洪、削减洪峰、均化洪水过程的作用;闫敏华等<sup>[141]</sup>认为三江平原在沼泽湿地开垦面积超过50%时,沼泽性河流的年径流量呈减少趋势,且年际变化显著;刘红玉等<sup>[142-143]</sup>在分析导致流域水文情势变化的因素时发现,湿地植被影响湿地的水文过程功能,是导致流域年均径流和流量变化的主导因素,约占影响程度的76%和16%,随着湿地面积不断减少,沼泽性河流流域的滞洪调节作用也在逐渐减小;季友和张琳<sup>[144]</sup>认为,旱地改成水稻田会增大地表水的利用率和地下水的利用量,是流域地表径流深减少的原因。

水文特征参数法是一种简捷地分析土地利用变化水文效应的方法,可用来判断流域内的水文响应是否发生了变化。研究者通常选择某个流域较长时间序列的能够反映水文效应的特征参数,通过对水文参数进行数理统计分析,从其变化趋势上评估湿地水文效应。特征参数主要包括径流系数、年径流变差系数、径流年