

湿地景观生态分类研究进展*

曹宇** 莫利江 李艳 章文妹

(浙江大学土地管理系,杭州 310029)

摘要 湿地景观生态分类是湿地景观生态学研究的前提与基础,直接影响湿地研究结果的精度和有效性。基于国内外湿地景观生态分类在分类理论、分类指标、分类方法等方面的研究历史、现状与最新进展,本文系统介绍并评价了NWI、Ramsar、HGM等湿地分类体系,指出基于HGM分类思想以及综合考量湿地空间结构、生态功能、生态过程、地形、土壤、植被、水文、人类活动干扰强度等多种因素的混合分类方法是该研究领域未来发展的主要方向。集成运用3S技术、数学定量、景观模型、知识工程、人工智能、神经网络等多种方法以提高分类的自动化水平与精度,将是今后湿地景观生态分类研究的重点与难点。

关键词 景观生态学 湿地分类 美国国家湿地清查 Ramsar 公约 水文地貌法

文章编号 1001-9332(2009)12-3084-09 中图分类号 Q149 文献标识码 A

Wetland landscape ecological classification : Research progress. CAO Yu, MO Li-jiang, LI Yan, ZHANG Wen-mei (*Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2009 20(12) : 3084-3092.

Abstract : Wetland landscape ecological classification, as a basis for the studies of wetland landscape ecology, directly affects the precision and effectiveness of wetland-related research. Based on the history, current status, and latest progress in the studies on the theories, indicators, and methods of wetland landscape classification, some scientific wetland classification systems, *e. g.*, NWI, Ramsar, and HGM, were introduced and discussed in this paper. It was suggested that a comprehensive classification method based on HGM and on the integral consideration of wetlands spatial structure, ecological function, ecological process, topography, soil, vegetation, hydrology, and human disturbance intensity should be the major future direction in this research field. Furthermore, the integration of 3S technologies, quantitative mathematics, landscape modeling, knowledge engineering, and artificial intelligence to enhance the automatization and precision of wetland landscape ecological classification would be the key issues and difficult topics in the studies of wetland landscape ecological classification.

Key words : landscape ecology ; wetland classification ; NWI ; Ramsar Convention ; hydrogeomorphic method (HGM).

景观生态分类是景观生态学研究的重要组成部分,在一定程度上反映了整个学科的发展水平。景观生态分类既是景观结构与功能研究的基础,又是景观生态规划、管理的前提,是景观生态学理论与应用研究的纽带^[1-3]。景观生态学理论、方法和应用的研究一直与景观生态分类和制图密切相关^[4-5]。景观生态学作为一门新兴学科,目前针对景观生态分类

的基础理论、分类方法和应用实践都不太完善,且由于当前不同学者对景观的认识、定义不同,导致景观生态分类的指标和原则等尚未统一。

作为“地球之肾”的湿地生态系统,是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一,也是具有多种功能的景观类型^[6-8]。湿地不仅具有调蓄洪水、涵养水源、净化水质、调节气候、保护生物多样性等生态功能,而且在维持地区、区域乃至全球生态平衡、环境稳定等方面发挥着巨大作用。当前,湿地日益成为地理学、生态学以及其他资源环境科学研究的新热点。湿地景观生态分类是湿地景观

* 国家自然科学基金项目(30700098,40701007)、浙江省自然科学基金项目(Y507207)和国家大学生创新性实验计划项目(188190-71090[24])资助。

** 通讯作者。E-mail: caoyu@zju.edu.cn

2009-05-03 收稿 2009-09-17 接受。

生态学研究的前提与基础,直接关系湿地研究结果的精度和有效性,也影响国内外研究者之间的合作与交流以及湿地景观的管理与保护。但由于世界各地的湿地景观类型复杂多变,且研究者知识背景、研究目的等不尽相同,很难制定出一个科学完整而普遍适用的湿地景观生态分类体系。所以迄今为止,国内外学者对湿地景观分类的原则、指标和方法等仍未统一,且国内学界专门探讨湿地景观生态分类进展的研究也鲜有报道。为此,本文在系统分析国内外湿地景观生态分类研究历史与现状的基础上,综合评述其在理论、方法和应用方面的研究进展,探讨未来发展趋势,旨在为湿地和景观生态分类等相关研究提供理论参考。

1 湿地景观生态分类

一般意义上的湿地分类研究始于 20 世纪初欧洲和北美的泥炭地分类,早期主要是先开展实地调研,然后进行描述性分类。1956 年,美国鱼类和野生动物管理局(FWS)的 Shaw 等^[9]首次对湿地进行完整分类,将湿地分为内陆淡水湿地、内陆咸水湿地、海岸淡水湿地和海岸咸水湿地,再按水深和淹水频率将每类分为 20 种湿地类型。该分类的主要依据是湿地地理环境、植物生活方式、水深和含盐量。该分类体系较简单、湿地类型不够全面、部分定义不明确,且分类的准确度相对不高,属定性分类。

传统的湿地分类主要着眼于湿地的地理位置、空间结构和水生生物,多以湿地空间形态相似相异性、发生特征、植被覆盖等为依据,对湿地生态系统进行类型划分,对湿地生态功能、生态过程、人类活动干扰等因素的考虑较少,在分类方法上以定性为主,分类指标体系较简单。

湿地景观生态分类研究始于景观生态学迅猛发展的 20 世纪 70、80 年代,其实质是根据湿地景观系统内部物质、能量、信息交换形式和水热分布状况的差异,综合考虑湿地景观的空间结构、生态功能、自然属性和人类活动干扰等因素,按一定原则、用一系列指标描述这些差异,并对各类湿地景观生态类型进行划分,从而建立湿地景观生态分类体系。

2 湿地景观生态分类的国外研究进展

2.1 主要湿地分类体系的概述

1974 年,FWS 开展“美国国家湿地清查”(NWI)工作,对全美各类湿地进行清查、分类编目与制图^[10]。并由 Cowardin 等^[11]提出“NWI 湿地分

类体系”。该体系首先依据湿地成因和湿地所处地理环境将湿地划分成海洋、河口、河流、湖泊和沼泽 5 个系统,再根据湿地水文特征、外貌特征、植被差异 3 个因素将湿地系统分别逐级分成亚系统、湿地类和湿地亚类,并用附加的优势种特征描述较特殊的湿地特征。NWI 分类体系较全面、易于操作、使用范围很广,其主要缺点在于缺少定量指标,且在反映湿地景观动态变化状况等方面略显不足。

1990 年《湿地公约》(Ramsar Convention)第四届缔约国大会制定了一套旨在实现全球范围内通用的“Ramsar 湿地分类体系”^[12]。Ramsar 体系将湿地景观分为海洋与海岸湿地、内陆湿地、人工湿地 3 个系统,再基于湿地水文特征、基底物质、土壤、植被等要素将湿地系统分为 35 个湿地类型。该分类体系基本沿用 NWI 体系“成因+描述”的分类思想,且在分类上更简明,一定程度上促进了国际间湿地景观研究的交流与合作。但是,该分类系统包括的湿地类型相对不够完全,据此对世界范围内复杂多变的湿地景观进行统一分类仍存在困难;其界定的湿地景观范围太广(同时包括自然和人工湿地),需要研究者从多学科角度对湿地景观开展综合研究;其对许多单独的湿地类型采用混合的分类标准,使部分湿地类型定义和区分不够明确;该系统仍缺少定量指标,分类工作的可操作性和精度有待提高。

20 世纪 90 年代,Brinson^[13]提出的“水文地貌法”(Hydrogeomorphic Method,HGM)分类具有深远影响。HGM 分类主要依据湿地地貌、水文特征和水动力特征 3 个属性。根据湿地所处地理大环境将湿地地貌分成河流地貌、凹地貌、海岸地貌和泥炭湿地,根据湿地水源补给将水文特征分成降水补给类、地表漫流补给类和地下水补给类;根据湿地水流强度和流向将水动力特征分成垂直起伏流、无定向的水平流和双向水平流。HGM 分类的本质是基于湿地生态功能和生态过程对湿地进行分类,是一个定性定量、层次化与模块化相结合的分类系统,能较好地反映湿地水文与水动力特征,也能有效鉴别湿地景观的动态变化状况,但总体上对湿地景观属性特征的描述不够全面,定量化程度也有待进一步提高,以满足湿地水文模型构建的需要。

2.2 HGM 分类的应用

20 世纪 90 年代中期以后,许多学者基于 HGM 分类思想,开展了一系列湿地景观生态分类的探索研究。如 Zoltai 等^[14]基于湿地生态过程,依据湿地地貌与水文、地表形态、植被特征,并结合湿地化学

环境因素,构建了加拿大湿地分类分层结构体系; Semeniuk 等^[15]依据湿地地形和水文周期的不同组合,将自然湿地分为永久性淹没盆地、季节性淹没盆地、间歇性淹没盆地、季节性渍水盆地、永久性淹没河道、季节性淹没河道、间歇性淹没河道、季节性渍水河道、季节性淹没沼泽、间歇性淹没沼泽、季节性渍水沼泽、季节性渍水坡地和季节性渍水高地,并建议将这 13 种湿地类型作为第一层级整合到 Ramsar 分类系统,同时认为如有需要可根据地形和湿度的组合状况再增加分类; Shaffer 等^[16]利用 HGM 方法对美国波特兰市周边 45 处湿地进行分类,探讨了水文水资源在不同 HGM 湿地类型中的差异,结果表明 HGM 分类可有效地反映湿地水文特征,而湿地地貌与湿地结构两种因素在描述湿地水文状况及利用 HGM 方法进行湿地分类中居于同等重要的地位。

21 世纪以来,随着湿地功能和价值被更深的认识,湿地评价研究随之兴起,HGM 分类也得到学者们的广泛认可,因为 HGM 分类更适于湿地功能评价和湿地生态过程监测,而 NWI 和 Ramsar 体系则不适用,此外,HGM 分类对于水文、水动力等湿地基本特征也更具有鉴别力。这一时期的研究侧重于进一步论证和完善 HGM 分类,如 Hefner 等^[17]以澳大利亚维多利亚州湿地为例,对分别侧重水文特征和植被类型的 2 种湿地分类体系进行比较,揭示了不同湿地分类法在保护淡水生态系统过程中的影响; Kim 等^[18]在 HGM 分类基础上,提出一种“混合分类法”,以水文状况、水生植物和水成土 3 种因素鉴别湿地,结合生态调查等工作,以湿地地质与盐度、生态区域、HGM、地貌与水文水动力、植被类型、优势植被群落 6 个层次构建了韩国湿地分类体系; Cole 等^[19]对纽约、宾夕法尼亚和弗吉尼亚 3 个州湿地的基本水文状况进行比较,认为水文特征在 HGM 分类中起到了基础性作用。

2.3 3S 技术在湿地分类中的应用

近年来,各国学者基于 3S 技术的集成利用,对多个尺度的湿地进行景观生态分类。如 Shanmugam 等^[20]利用印度遥感卫星和 Landsat TM 数据对印度南部沿海湿地生态系统进行分类制图与监测,比较了“基于自重复组织数据分析与最大似然分类的传统硬性分类法”和近几年发展起来的“基于线性光谱混合模型的软性分类法”,结果表明,最大似然分类法的分类制图精度高于自重复组织数据分析算法,而用软性分类法可得到更高精度的原始湿地覆

盖和不同湿地生境间持续变化的信息;Becker 等^[21]在对美国五大湖沿岸湿地分类时纳入了 3 个独立波段选择方法(衍生规模、固定时间间隔和衍生直方图),以探讨光谱重采样的分类弹性,并结合衍生工具确定了湿地分类的最佳频谱分辨率和空间分辨率;Wright 等^[22]基于 Landsat TM 影像、NWI 地图和辅助环境数据,利用分类树算法对美国黄石国家公园沼泽湿地进行分类,并比较了不同误差水平下湿地类型的识别精度。

2.4 国外湿地景观生态分类的研究评述

在许多国家,植被、水文和地形是对湿地景观进行生态分类的 3 个主要依据,但侧重点有所不同:美国的 NWI 体系更侧重植被要素,德国学者在分类中比较关注湿地地理位置和生境因素,荷兰学者则认为水文特征是湿地景观生态分类的重要因素^[18]。

国外湿地分类和湿地景观生态分类研究经过一个多世纪的发展,理论体系和方法运用等方面已相对成熟。在数据获取方面,由传统的野外实地调研发展到主要通过遥感手段获取湿地研究区影像资料,并辅以湿地地形、气候、水文、土壤、植被以及社会发展背景等各种专题数据资料,在分类依据方面,从主要根据湿地地理位置、空间结构、植被群落,到综合考虑湿地空间形态和生态功能,直至较多关注湿地生态过程和人类干扰程度等因素,使湿地分类指标不断丰富,并逐步具体化、定量化;在分类方法方面,经历了从 NWI、Ramsar 等体系以“成因+描述”为主的分类,到 HGM 分类定性定量、模块化与层次化相结合的方法,以及逐渐兴起的 3S 技术、数学定量、景观模型、神经网络等手段,如遥感和地理信息系统的集成利用、多元数据的融合、湿地水文水动力模型的构建、分类算法的改进、数学模型和实验模拟的运用等;在分类的精度和有效性方面,多种技术手段的综合运用使湿地分类的准确性和自动化水平不断提高,而多通道、多时相的遥感影像数据及航拍数据、野外实况数据和其他相关资料也被用来进一步检验湿地分类精度与有效性。

景观模型、人工神经网络等方法在湿地景观生态分类中的运用已引起了研究者的广泛关注,如一些学者用一系列状态变量构建湿地生态模型、化学模型和形态变化模型,实现了对湿地系统的定量描述,并将模型用于检验和改进 HGM 等湿地分类方法;另有一些专家正努力探索提高神经网络自学习能力的方法,以增强神经网络分类法辨别湿地类型的水平。这些方法和技术手段的运用,有效地减少了

人为因素对湿地分类的主观影响,使分类的过程更规范、更科学,分类的结果更准确。对 3S 技术在湿地分类运用中的有效性论证与方法改进和分类算法的创新等问题也一直是国外学界相关研究的热点。

3 湿地景观生态分类的国内研究进展

中国是世界上湿地资源最丰富的国家之一,湿地总面积居世界第四^[23]。我国早期湿地研究侧重于沼泽和沿海滩涂,长期没有将湿地作为一个整体景观加以综合研究,加之湿地研究目的和方法以及湿地地域性的差异等原因,目前国内尚未建立统一、完善的湿地分类系统^[24]。20 世纪 90 年代以来,随着国内外景观生态学研究的快速发展,湿地由于其巨大的环境效益和生态功能而日益成为该领域研究的热点^[25-28],而作为湿地景观生态学研究前提与基础的湿地景观生态分类研究也逐步得到重视。近年来,我国学者在湿地景观生态分类的理论、方法和应用方面都取得一定研究成果。

3.1 理论研究

湿地景观生态分类研究主要基于景观生态分类理论。王仰麟^[29]基于景观生态分类的基本原理进行分析,认为景观生态分类应以人与景观相互关系为着眼点,将人文因素纳入分类中,分类过程应综合考虑景观的结构性与功能性,功能性分类和结构性分类应分别依据景观生态系统的生态功能属性和固有结构特征,并提出了生物生产、环境服务和文化支持 3 种景观生态系统的基本功能类型;肖笃宁等^[30]提出了明确景观单元等级、体现景观空间分异与组合、反映控制景观形成过程主要因子、单元确定与类型归并、突出体现人类活动对景观演化决定作用五大景观分类的生态学原则和方法,揭示了自然、经营和人工等不同景观类型的特性;程维明^[31]总结了网格分类、基于植被类型或土地利用分类、区域生态分类、土地类型分类、总人类生态系统分类、其他土地分类 6 种景观生态分类系统以及能量、生态地形地貌、人类对自然干扰情况、综合分类、生态系统 5 种景观分类指标,认为需要结合研究区现状采取逐级分类法对景观进行分类。

此外,还有一些学者对我国湿地景观生态分类进行理论层面的研究。如陆健健^[32]将中国滨海湿地划分成潮上带淡水湿地、潮间带滩涂湿地、潮下带近海湿地和河口沙洲离岛湿地 4 个子系统及若干型,并对各子系统 and 型进行界定;彭建等^[33]根据沿海滩涂景观基质组成、物种分布特征及斑块组合差异,将

我国沿海滩涂湿地划分为泥滩、沙滩、岩滩和生物滩四类;唐小平等^[34]结合我国湿地资源清查数据管理的需要,采用成因、特征与用途分类相结合的方法,提出了中国湿地分级式分类系统;崔丽娟等^[35]从湿地地貌、气候、植被等要素出发,结合《湿地公约》对我国湿地进行了分类编码研究。

我国湿地景观生态分类的理论研究虽取得了一定成果,但由于较侧重于对国外相关理论的引入和总结,导致理论的原创性略显不足。相关研究范围主要集中在大、中尺度,对小尺度湿地景观生态分类的理论研究还不充分,目前还缺乏真正意义上跨尺度的、系统的理论研究,更多的是通过对典型地区研究结果与经验的理论总结和推广,尺度推绎的科学性有待进一步验证,且专门针对湿地景观生态分类原理、原则和指标等理论的系统探讨尚相对缺乏。

3.2 方法探讨

国内湿地景观生态分类方法的早期研究中,倪晋仁等^[36]、殷康前等^[37]的工作具有重要意义。倪晋仁等^[36]在总结成因分类法和特征分类法的基础上,提出动力与成因相结合的综合分类法,分别依据湿地水文地貌过程特征、外动力控制因子、基底物质结构、植被类型、淹没时间频率和水深将湿地景观划族、组、类、型 4 个分类层次,并进一步讨论各分类等级上分类因子的定量描述方法,为湿地模型研究提供了框架;殷康前等^[37]在湿地综合分类基础上,用状态变量描述了湿地状态特征和动力特征的途径,采用综合建模法建立了反映湿地状态变量间制约关系的湿地水文动力模型,为湿地系统的定量描述和准确分类提供了依据。

近年来,国内探讨 3S 技术在湿地景观生态分类方面应用的研究日益兴起。如张树清等^[38]对不同时期、不同通道的遥感影像进行复合,建立了考虑季节时相、空间结构和生境等差异的三江平原湿地景观分类模式;潘辉等^[39]分析了湿地遥感分类精度和 3S 集成技术问题,认为影像源空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率等因素是影响湿地分类精度的主要原因;黎夏等^[40]利用神经网络算法对珠江口红树林湿地的 SAR 与 Landsat TM 融合图像进行分类,进一步提高了分类精度。

目前,我国学者在湿地景观生态分类方法的探讨上仍缺少突破性研究成果,尚需加大在分类方法上的研究力度。以往方法研究中重点关注提高遥感分类与制图的精度等方面,采用的主要手段是多种遥感影像融合,并辅以研究区各种辅助数据资料,对

湿地水文动力模型等景观模型的构建虽已有理论层面的探讨,但在研究实践中鲜有应用,针对研究区的微观实验方法也应用较少。目前,分类方法主要通过 3S 技术进行运用,而对于 3S 技术、数学定量、实验模拟、景观模型等多种方法手段的综合运用尚为欠缺,3S 技术本身的集成创新也略显不足。

3.3 应用实践

根据研究目的与方法的不同,国内学者对湿地景观生态分类应用实践方面的研究大致可分为以下 3 种类型。

3.3.1 基于湿地成因、地貌和植被特征的分类 国内早期湿地分类主要基于湿地成因、地貌特征和植被群落。如柴岫等^[41]根据沼泽发育阶段、所处地貌部位及植物群落将若尔盖高原沼泽分成 1 个型 4 个亚型 9 个沼泽体;中国科学院长春地理研究所^[42]根据沼泽有无泥炭积累、沼泽所处地貌部位及优势沼泽植物种将三江平原沼泽划分成 2 个类 8 个亚类 14 个沼泽体;刘子刚等^[43]确定了全国湿地调查分类体系,分五大类 28 种,基本与《湿地公约》的分类一致;陈征海等^[44]根据湿地成因和地貌特征,提出了浙江省天然湿地分类系统。基于湿地成因、地貌和植被特征的分类体系侧重于湿地特征的定性描述,几乎没有定量指标,湿地类型界定不明确,且该分类主要强调湿地优势植被对湿地分类的影响,分类精度相对不高。

3.3.2 基于遥感影像和 3S 技术的分类 3S 技术的发展为湿地景观生态分类提供了有力工具。近年来我国学者基于研究区不同尺度的各种遥感影像,综合运用 3S 技术,做了大量湿地分类的应用研究。如韩敏等^[45]利用四层神经网络结构对扎龙湿地 Landsat TM 影像进行分类研究,并提出一种基于鲁棒误差函数的自适应反向传播算法(Adaptive Back Propagation Algorithm),旨在有效地抑制大误差;衣伟宏等^[46]对扎龙湿地 Landsat ETM⁺ 影像进行计算机自动分类,结果表明,选择 3、5、7 波段组合和运用人机互译判读有助于提高分类精度;王红娟等^[47]利用 2 个季节的洞庭湖 Landsat ETM⁺ 数据,辅以物候特征和地面 GIS 信息,通过 Erdas Image 软件的专家分类知识库建立了决策树分类法,结合 DEM 对洞庭湖湿地进行了影像分类;徐映雪等^[48]、朱卫红等^[49]、陈定贵等^[50]也利用类似方法对各自研究区湿地进行遥感分类。牛振国等^[51]基于 597 幅 Landsat ETM⁺ 遥感影像,以人工目视解译为主,结合高程、土壤、土地利用和 Google Earth 数据,对全国 9 hm² 以上的水

面、沼泽等湿地进行了初步遥感制图。这是国内学者首次在全国尺度上对我国湿地进行遥感分类和制图。

遥感分类虽比传统野外实地调查的效率和精度都有所提升,但由于“同谱异物”、“同物异谱”等相关遥感解译问题的存在,使遥感分类精度还有待进一步提高。目前,国内学者主要通过多时相、多通道遥感影像的融合,采用人工解译、监督分类和非监督分类相结合的方法来提高分类精度和效率。此外,分类树、神经网络等其他分类方法也开始得到应用。当前国内对于 3S 技术的应用大多还停留于利用遥感技术进行数据采集、利用 GIS 技术进行数据分析和利用 GPS 技术进行野外验证数据阶段,真正意义上的数据集成利用能力还有待提高。

3.3.3 基于多种要素的综合分类 随着湿地生态功能、人类活动干扰强度等要素在湿地景观生态分类中的重要影响逐步得到重视,国内学者开始在分类实践中考虑更多因素,并研究了基于多种要素的综合分类法。如刘红玉等^[52]系统分析了引起三江平原景观分异的主导因素,以人类活动影响程度、地貌和湿地植被为依据,分别将湿地系统分为 3 个级别,建立了一套完整的景观生态制图分类系统。综合分类法是对影响湿地景观分类的多种因素进行全面分析,采用层次化、模块化的分类方法构建了分类体系,该方法可操作性较强、分类精度较高,因而近年来逐渐得到国内广大学者的认可,但在定量化水平和湿地特征描述的全面性与准确性方面仍有待提高。

4 湿地景观生态分类的国内外研究比较

国外的景观生态学和湿地研究起步均较早,且成果较多,针对湿地景观的生态分类理论体系已相对完整,分类体系的构建亦日益趋向定量化。国外的湿地景观生态分类不但强调分类指标的综合性和层次性和模块化,而且也较重视湿地类型界定和描述的准确性,湿地景观分类方法更侧重于 3S 技术与多种手段的集成运用,尤其是在湿地景观模型、实验模拟等技术上的探索较多,国外的分类体系很好地实现了定性化与定量化的结合,具有较强的可操作性。总之,国外的湿地景观分类不但为逐步完善 Ramsar 分类体系做了大量研究工作,而且在不断汲取 NWI 和 HGM 分类优点、综合考量湿地自然属性与空间结构、湿地生态功能与过程、人类活动干扰程度等多种因素的混合分类法方面的探索业已开始。

我国的景观生态学研究起步相对较晚,对湿地景观的综合、系统研究也仅始于 20 世纪 80 年代。湿地景观生态分类的许多理论与方法大多借鉴国外,自主理论体系尚不成熟和完善。HGM 分类体系虽已在国外得到普遍认可,但我国学者的许多研究依然是基于 NWI、Ramsar 体系“成因 + 描述”的分类思想,分类中对湿地生态功能、水文过程、人类活动干扰等因素的考虑仍不充分,对湿地景观模型、实验方法、数学计量等的研究也相对较少。

我国的湿地景观生态分类研究虽然在理论、方法及应用上均取得了一些成果,但与国际相关研究还存在一定差距。国内学者针对湿地类型的定义与界定还有待进一步明确,以增强分类的准确性和可操作性;所构建的分类体系也相对缺乏定量化指标,需加强对 3S 技术的集成运用力度,在利用监督分类与非监督分类、遥感影像和辅助资料相结合等手段提高遥感分类精度的基础上,有待进一步探寻分类方法的突破与创新。

5 研究展望

湿地分类研究始于 20 世纪初,而真正意义上的湿地景观生态分类研究始于 20 世纪 70、80 年代。迄今,该领域的研究逐步受到重视,并在理论、方法等各方面都取得了较大进展。综合国内外湿地景观生态分类研究的历史与现状,未来该研究的方向将具有以下特点。

5.1 理论体系的不断完善

景观生态学是一门新兴学科,而湿地的综合研究也是近 30 年的事情,因此,该方向今后的研究进程将会继续完善其理论构建和相应范式。景观生态学是一门交叉学科,而湿地景观生态分类理论中也将会融入更多其他学科的理论(如过去考虑较少的人文、社会科学的思想和方法),以使人工湿地、湿地文化景观等类型的划分时考虑的因素更全面、充分,分类体系设计也更科学合理。

5.2 HGM 分类将逐步取代 NWI 分类

虽然 Ramsar 体系与 NWI 分类一样采用“成因 + 描述”的分类思想,过去也被《湿地公约》各缔约国所接受,但随着对湿地生态功能、生态过程、水文水力特征等因素认识的不断深化,以及各国湿地类型复杂多样,且处于不断变化中等原因,对研究区湿地分类更具体、更量化的 HGM 分类将逐步取代以定性描述为主的 NWI 分类体系。而 Ramsar 分类体系也会基于 HGM 分类思想而得到进一步完

善,以满足各国对湿地研究、保护和管理的实际需要。

5.3 3S 技术的综合集成与分类精度的提高

3S 技术的发展为湿地景观生态分类研究提供了强劲动力,但遥感分类精度一直是困扰 3S 技术有效运用于湿地分类的难题。未来随着 3S 技术的不断发展,基于人工智能的湿地景观自动分类方法将会出现,精度也将大大提高,以人工目视解译为主的分类方法将逐步被各种空间分析技术的综合集成运用所取代。

多特征信息提取是湿地分类智能化的关键和难点,结合湿地分布地理环境要素和空间结构等辅助资料来开展该项工作将是今后研究的重点。而多时相、多通道、多分辨率的遥感影像以及多种方法、多种分类器的集成使用也将是未来的主要发展方向。

5.4 景观模型和实验方法的广泛应用

景观模型和实验是景观生态学研究的重要手段。湿地景观空间模型可有效表述湿地景观的各种生态学变量,如湿地植被、土壤、气候、水文、种群、养分和生物量等,从而为湿地景观生态分类提供重要依据。通过野外观测性实验、操作性实验、计算机模拟实验等可对湿地景观空间格局和生态过程的相互作用进行详细的、机制性的研究,而通过尺度推绎,又可将微观尺度上的信息扩展到大、中尺度,因而可为不同尺度的湿地分类提供途径。

景观模型和实验方法在湿地研究中的重要作用已逐步受到国内外学者的重视,相关研究业已兴起,计算机模拟和多尺度对比实验将是未来湿地分类方法研究中的重要发展方向。

5.5 基于 HGM 分类思想的混合分类法的构建

HGM 分类体系虽比传统的 NWI 和 Ramsar 体系更全面、更定量化,但仍有不足之处,如对湿地植被特征等要素考虑不多,导致对湿地特征的反映不够全面等。随着人类对湿地景观干扰活动的加剧,湿地生态功能的凸显,以及湿地水文过程和水利动力特征等要素日益受到重视,将使一个综合考量湿地空间结构、生态功能、生态过程、地形地貌、植被特征、水文水力、人类活动干扰程度等多种地理、生态、环境和社会文化要素的混合分类法得到兴起,该分类方法将定性、层次化与模块化相结合,既具有普遍适用性,又可根据各国、各地区实际研究的需要进行调整与完善。

6 结 语

随着湿地生态功能与价值的不断凸显,湿地景

观日益成为国内外研究的热点,而作为湿地研究前提与基础的湿地景观生态分类也逐步受到广大学者的重视.多年来,各国学者基于不同的研究目的和知识背景,对湿地景观生态分类理论、方法和应用方面的研究都做了许多有益的探索,也取得了大量成果.随着分类依据的不断扩展、分类指标的不断丰富,以及量化水平和可操作性的持续提升,分类方法已发展到对3S技术、景观模型、微观实验等多种技术手段的综合集成应用,使分类的自动化水平和精度也日益提高.

以HGM分类为基础,建立融合多种要素、既普遍适用又可根据实际需要做出调整的湿地景观生态分类体系,将是今后相关研究的关键所在.多时相、多通道、多分辨率的遥感影像与3S技术、数学定量、景观模型、知识工程、人工智能、神经网络等多种方法的高效集成运用,也将是本研究领域的主要发展方向.

我国景观生态学和湿地研究基础相对薄弱,国外湿地景观生态分类已有的研究成果与经验对国内学者具有很好的参考价值.但由于中国的自然环境、社会制度、文化背景等与其他国家存在很大差异,国际上的湿地景观生态分类体系并不一定完全适用于中国.因此,如何有效借鉴国外相关经验,构建适合我国自然、社会和文化条件、且具有较强操作性的湿地景观生态分类体系,将是国内学者日后研究的重点.

参考文献

- [1] Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), Ma K-M (马克明), *et al.* Theory, Method and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [2] Zhou Z-X (周志翔). Basis for Landscape Ecology. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese)
- [3] Klijn F. Ecosystem Classification for Environmental Management. Berlin: Springer, 2007
- [4] Farina A. Principles and Methods in Landscape Ecology. London: Chapman and Hall, 1998
- [5] Forman RTT. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Region. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- [6] Mitsch WJ, Gosselink JG. Wetlands. New York: John Wiley & Sons, 1993
- [7] Lu J-J (陆健健). Wetlands in China. Shanghai: East China Normal University Press, 1990 (in Chinese)
- [8] Chen Y-Y (陈宜瑜). Research on Chinese Wetlands. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1995 (in Chinese)
- [9] Shaw SP, Fredine CG. Wetlands of the United States: Their Extent and Value for Waterfowl and Other Wildlife. Washington DC: United States Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1971
- [10] Mitsch WJ, Gosselink JG. Wetlands. 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons, 2000
- [11] Cowardin LM, Carter V, Golet FC, *et al.* Classification of Wetlands and Deep Water Habitats of the United States. Washington, DC: Fish and Wildlife Service Publication, 1979
- [12] Ramsar Convention Bureau. Proceedings of the 4th Meeting of the Conference of Contracting Parties. Gland: Ramsar Convention Bureau, 1991
- [13] Brinson MM. A hydrogeomorphic classification for wetlands. Wetlands Research Program Technical Report, Vicksburg MS, 1993: 1-24
- [14] Zoltai SC, Vitt DH. Canadian wetlands: Environmental gradients and classification. *Vegetatio*, 1995, **118**: 131-137
- [15] Semeniuk V, Semeniuk CA. A geomorphic approach to global classification for natural inland wetlands and rationalization of the system used by the Ramsar Convention: A discussion. *Wetlands Ecology and Management*, 1997, **5**: 145-158
- [16] Shaffer PW, Kentula ME, Gwin SE. Characterization of wetland hydrology using hydrogeomorphic classification. *Wetlands*, 1999, **19**: 490-503
- [17] Hefner JM, Storrs CG. Hydrology or floristics? Mapping and classification of wetlands in Victoria, Australia and implication for conservation planning. *Environmental Management*, 2004, **34**: 499-507
- [18] Kim KG, Park MY, Choi HS. Developing a wetland-type classification system in the Republic of Korea. *Landscape and Ecological Engineering*, 2006, **2**: 93-110
- [19] Cole CA, Cirimo CP, Wardrop DH, *et al.* Transferability of an HGM wetland classification scheme to a longitudinal gradient of the central Appalachian Mountains: Initial hydrological results. *Wetlands*, 2008, **28**: 439-449
- [20] Shanmugam P, Ahn YH, Sanjeevi S. A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modeling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India. *Ecological Modelling*, 2006, **194**: 379-394
- [21] Becker BL, Lusch DP, Qi JG. A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**: 111-120

- [22] Wright C , Gallant A. Improved wetland remote sensing in Yellowstone National Park using classification trees to combine TM imagery and ancillary environmental data. *Remote Sensing of Environment* , 2007 , **107** : 582-605
- [23] Zhao K-Y (赵魁义). Mires in China. Beijing : Science Press , 1999 (in Chinese)
- [24] Lü X-G (吕宪国) , Huang X-C (黄锡畴). Progress in wetland research in China. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学) , 1998 , **18** (4) : 293-300 (in Chinese)
- [25] Wang X-L (王宪礼) , Bu R-C (布仁仓) , Hu Y-M (胡远满) , et al. Analysis on landscape fragment of Li-aohé Delta wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 1996 , **7** (3) : 299-304 (in Chinese)
- [26] Liu Z-Q (刘振乾) , Liu H-Y (刘红玉) , Lü X-G (吕宪国). Ecological fragility of wetlands in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 2001 , **12** (2) : 241-244 (in Chinese)
- [27] Lei K (雷 昆) , Zhang M-X (张明祥). The wetland resources in China and the conservation advices. *Wetland Science* (湿地科学) , 2005 , **3** (2) : 81-86 (in Chinese)
- [28] Sun X-B (孙贤斌) , Liu H-Y (刘红玉) , Zhang X-H (张晓红) , et al. Maintenance capacity of plant community diversity of wetlands in patch scale. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 2009 , **20** (3) : 579-585 (in Chinese)
- [29] Wang Y-L (王仰麟). A theoretical methodology of landscape eco-classification. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 1996 , **7** (suppl.) : 121-126 (in Chinese)
- [30] Xiao D-N (肖笃宁) , Zhong L-S (钟林生). Ecological principles of landscape classification and assessment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 1998 , **9** (2) : 217-221 (in Chinese)
- [31] Cheng W-M (程维明). Discussion on classification and mapping of landscape ecology. *Geo-Information Science* (地球信息科学) , 2002 (2) : 61-65 (in Chinese)
- [32] Lu J-J (陆健健). Classification of coastal wetlands of China. *Environment Herald* (环境导报) , 1996 (1) : 1-2 (in Chinese)
- [33] Peng J (彭 建) , Wang Y-L (王仰麟). An ecological perspective on shoaly land in China. *Geographical Research* (地理研究) , 2000 , **19** (3) : 249-256 (in Chinese)
- [34] Tang X-P (唐小平) , Huang G-L (黄桂林). Study on classification system for wetland types in China. *Forest Research* (林业科学研究) , 2003 , **16** (5) : 531-539 (in Chinese)
- [35] Cui L-J (崔丽娟) , Zhang M-Y (张曼胤) , He C-G (何春光). Wetland classification and its encoding system in China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报) , 2007 , **29** (3) : 87-92 (in Chinese)
- [36] Ni J-R (倪晋仁) , Yin K-Q (殷康前) , Zhao Z-J (赵智杰). Comprehensive classification for wetlands. I. Classification. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报) , 1998 , **13** (3) : 214-221 (in Chinese)
- [37] Yin K-Q (殷康前) , Ni J-R (倪晋仁). Comprehensive classification for wetlands. II. Modeling description. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报) , 1998 , **13** (4) : 312-319 (in Chinese)
- [38] Zhang S-Q (张树清) , Chen C (陈 春) , Wan E-P (万恩璞). A study on wetland classifying of remote sensing in Sanjiang Plain. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用) , 1999 , **14** (1) : 54-58 (in Chinese)
- [39] Pan H (潘 辉) , Luo C-L (罗彩莲) , Tan F-L (谭芳林). Application of 3S technology to wetland researches. *Wetland Science* (湿地科学) , 2006 , **4** (1) : 75-80 (in Chinese)
- [40] Li X (黎 夏) , Liu K (刘 凯) , Wang S-G (王树功). Mangrove wetland changes in the Pearl River estuary using remote sensing. *Acta Geographica Sinica* (地理学报) , 2006 , **61** (1) : 26-34 (in Chinese)
- [41] Chai X (柴 岫) , Lang H-Q (郎惠卿) , Jin S-R (金树仁) , et al. Mires in Ruergai Plateau. Beijing : Science Press , 1965 (in Chinese)
- [42] Institute of Changchun Geography , Chinese Academy of Sciences (中国科学院长春地理研究所). Mires in Sanjiang Plain. Beijing : Science Press , 1983 (in Chinese)
- [43] Liu Z-G (刘子刚) , Ma X-H (马学慧). Wetlands classification. *Wetland Science and Management* (湿地科学与管理) , 2006 , **2** (1) : 60-63 (in Chinese)
- [44] Chen Z-H (陈征海) , Liu A-X (刘安兴) , Li G-Y (李根有) , et al. Investigation on classification of natural wetlands in Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang University* (Agriculture and Life Science) (浙江大学学报 · 农业与生命科学版) , 2002 , **28** (2) : 156-160 (in Chinese)
- [45] Han M (韩 敏) , Cheng L (程 磊) , Xing J (邢 军). Research on classification of land cover in Zhalong wetland area based on neural network. *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报) , 2004 , **44** (4) : 582-588 (in Chinese)
- [46] Yi W-H (衣伟宏) , Yang L (杨 柳) , Zhang Z-X (张正祥). Method of wetland classification based on Landsat 7 ETM⁺ image. *Wetland Science* (湿地科学) , 2004 , **2** (3) : 208-212 (in Chinese)

- [47] Wang H-J (王红娟), Jiang J-H (姜加虎), Huang Q (黄群). On the remote sensing classification method of Dongting Lake wetland based on knowledge. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2008, **17**(3): 370–373 (in Chinese)
- [48] Xu Y-X (徐映雪), Shao J-L (邵景力), Yang W-F (杨文丰), *et al.* Research on classification and change of seaside wetland around Yalujiang River estuary based on RS and GIS. *GeoScience* (现代地质), 2006, **20**(3): 500–504 (in Chinese)
- [49] Zhu W-H (朱卫红), Nan Y (南颖), Liu Z-F (刘志峰), *et al.* Study on wetland classification and distribution in the Tumen River lower stream area based on 3S technologies. *Journal of Northeast Normal University* (Natural Science) (东北师范大学学报·自然科学版), 2007, **39**(3): 106–113 (in Chinese)
- [50] Chen D-G (陈定贵), Zhou D-M (周德民), Lü X-G (吕宪国), *et al.* A study on classification of wetland communities in Honghe National Nature Reserve by remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 2007, **22**(4): 485–491 (in Chinese)
- [51] Niu Z-G (牛振国), Gong P (宫鹏), Cheng X (程晓), *et al.* Preliminary remote sensing mapping and relevant geographical feature analysis of wetlands in China. *China Science Series D: Earth Science* (中国科学 D 辑·地球科学), 2009, **39**(2): 188–203 (in Chinese)
- [52] Liu H-Y (刘红玉), Lü X-G (吕宪国). Study on classification system of middle scale landscape ecology mapping in the Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 1999, **19**(5): 432–436 (in Chinese)

作者简介 曹宇,男,1976年生,博士,副研究员.主要从事景观生态学、土地利用与规划、3S技术应用研究,发表论文20余篇. E-mail: caoyu@zju.edu.cn

责任编辑 杨弘
