

综述

地理信息系统在水生植物生态学研究中的应用

詹存卫 于丹

(武汉大学生命科学院生态研究所, 武汉 430072)

APPLICATION OF THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR THE ECOLOGICAL STUDIES OF AQUATIC PLANT

ZHAN Cun-wei and YU Dan

(Institute of Ecology, College of Life Science, Wuhan University, wuhan 430072)

关键词: 地理信息系统; 水生植物生态学; 应用

Key words: Geographic Information System; Aquatic Plant Ecology; Application

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2000)05-0555-08

计算机技术和遥感技术(Remote Sensing; RS)的发展和应用,使大量空间数据的获得、分析和处理成为可能。遥感技术的应用能够采集大量空间位置信息和频谱信息,在计算机模型和地理信息系统(Geographic Information System; GIS)的辅助下,遥感成为观测许多生态系统,特别是宏观生态系观状态和过程的有效手段,计算机技术与遥感技术的结合使人们对于空间过程的认识,特别是对不同时空尺度上的生态学空间过程的认识在准确度和精确度上都有了极大地提高。而在计算机技术与遥感技术结合的过程中,地理信息系统起着十分重要的作用。自 Tomlinson 建立世界上第一个地理信息系统以来, GIS 技术的应用从早期的土地利用管理和自然资源的开发扩展到包括生态学在内的许多领域:如环境保护,国土规划,生物科学和农业科学等,成为研究区域性、全国性与全球性的资源开发、环境变化、经济建设和社会发展规划与决策的重要手段与技术支持条件。地理信息系统(GIS)是在计算机系统的支持下,用计算机数据库技术对空间信息进行存贮、分析、评价和辅助决策的计算机硬件与软件系统^[1]。GIS 在生态学调查和模拟研究领域中的应用正在迅速发展,它充当了联系相关空间数据处理和生境模型解释间的联接器^[2,3]。在确定植物生境划分和动物分布的研究中, GIS 技术的应用提供了一种新的研究方法^[4,5],它

收稿日期: 1999-11-08; **修订日期:** 2000-03-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(39830060)和国家自然科学基金项目(39770582)

作者简介: 詹存卫(1974—),男,江苏省扬州市人,在读博士生

的应用从地图说明一直到生态模型的解释和评价,跨越了整个空间尺度和几乎所有类型的生态系统。在水生态学的研究中,GIS技术的应用在较短的时间内迅速发展起来。本文对GIS技术在水生植物生态学研究中的应用作了一个简要的总结,并讨论了GIS技术在其中的作用和方法特征。

1 GIS在水生植物生态学研究中的应用

由于GIS技术在生态学研究中具有许多传统研究方法所不具备的作用和功能,因此它在水生态学中有着广泛的应用前景。自Raitala等在绘制Finish湖的水生植被图的过程中尝试着应用GIS技术支持陆地卫星图片的分类以来^[6],GIS在水生态学研究中的应用越来越广泛。在Raitala之后基于GIS技术的卫星图片分类技术得到了迅速发展,Marshall与Lee等人对Canadian湖航空照片的数字化分类进一步扩大了GIS的应用范围,同时也提出了许多研究湖泊生态系统的集成方法^[7]。如基于PC机的Marion湖的GIS数据库,它包含近红外彩色空中图片、水深、基质及水化学数据,而这个数据库可用于水质和植被变化趋势的评估分析^[8]。Welch和Remillard分别利用该数据库评价了除草剂的使用效应,并对水生植物的最佳生长情况进行了模拟。Jensen等在Par Pond和L lake的研究中提出了另一种辅助研究方法,他们应用布尔逻辑发展了一个预测物种分布的模型。Narumalani等利用逻辑斯蒂模型进行了相似的研究工作^[9]。Jenson利用GIS技术在同一湖泊采用SPOT全色图像数据在全湖和群落的尺度上测量了物种分布的年间和季节间变化^[10]。Lehmann在群落的尺度水平模拟了水生植被生物量的时空变化以及沿水深梯度的群落结构,并于1997年进行了补充研究,利用三维模型来描述单一的物种带,并讨论了沿岩带水生植物的异质性分布,解释了环境梯度与植物带之间的关系^[11-13]。这些研究工作从不同方面,不同尺度上利用GIS技术进行了水生态学的研究工作,使GIS技术在水生态学研究中的应用不断地深入和完善。在我国,一些研究人员也尝试着将GIS技术应用到研究工作中,如张晓阳对洪湖沉水植物光谱特征与生物量之间的关系进行了探索性的工作并应用Landsat影像分析与GPS定位采样相结合估算了洪湖沉水植物^[14,15],李蓉蓉等利用GIS技术对洪湖水生植被在不同利用强度下的变化进行了模拟研究^[16]。作者所在的课题组利用GPS和GIS技术在湖北梁子湖进行了洪水对水生植被影响的有关研究,利用GPS的定位功能对全湖的植被以及水陆交错区各亚区的水生植物进行了长期跟踪定位观测,在工作中GPS的使用避免了因水位的剧烈变化引起的样地定位误差,GIS技术的应用可以对洪水前、洪水中、洪水后的植被情况进行定性和定量的描述,可以在不同尺度上研究洪水对水生植物的影响。作者在进行汉江流域水生植被调查时,应用GPS作为数据源之一,结合野外调查结果,应用GIS技术在全流域各固定样点开展定位跟踪观测,研究不同环境因子对水生植物的影响。应用GIS技术在全球的尺度水平上可以对某个环境因子的变化引起的效应进行研究,大气圈中浓度不断升高的CO₂对天然湖泊中的化学组成的扰动,对整个湖泊生态系统的生态效应及其对水生植物的影响等问题都可以借助GIS技术所具有的各项功能,结合其它有效技术手段开展相应的研究工作,国内一些研究单位已进行了尝试性的工作。

上述的GIS技术应用于水生植物生态学研究的发展过程表明,GIS技术在水生植物

生态学研究中的应用主要有三个方面,a. 发展绘制水生植被图的新方法;b. 研究水生植被的演替和空间异质性;c. 建立水生植物生态学研究的数据库并进行一些相关的模拟和预测研究。下面就 GIS 技术在水生植物生态学研究中的应用的几个主要方面进行一个简要的论述:

1.1 水生植被图的绘制

传统的植被图绘制系根据分类学原则和植被外貌进行,这不可避免地降低了绘图的精度,同时也忽略了许多重要的环境特征^[17]。随着遥感技术和卫星技术的发展,它们逐渐地被应用于植被图的绘制以及水生植被资源的调查工作,但由于数据判读和处理过程比较复杂,两者的应用总存在着这样或那样的不足。而 GIS 技术具有强大的信息处理和分析功能,可以将多种信息集成并统一于一个参考系中,因此 GIS 技术与遥感技术的联合应用可以绘制高精度的植被图以及各种合成图。Lehmann 等应用 GIS 技术绘制了 Geneva 湖沿岸带生态系统的植被分布图,他们首先对研究区域的彩色航空照片进行扫描,获取三色模式图,然后根据一定的标准提取植被分布区域,得到以“1”和“0”来表示有无植物分布的二进制位图,结合实地调查数据,利用 GIS 中的相关软件进行处理(包括坐标转换和空间叠加分析等),获取所需的结果。与传统的制图法相比,应用 GIS 技术绘制的植被图更加快捷,具有更高的精度,避免了繁重的手工操作和由此带来的人为误差同时也更多地考虑了环境特征的重要性,获得的植被图更为精确、美观。对于那些难以接近的区域,利用遥感技术和 GIS 技术更是具有传统方法所不可比拟的优越性。

1.2 海洋生态系统

海洋作为占地球表面积 70% 的地理实体,在整个地球环境中发挥着极其重要的作用。但由于其特殊的地理环境和区域的广阔性,传统的研究方法存在着明显的缺陷。GIS 技术对遥感信息分析的支持使遥感和卫星技术可以应用于其研究中,并获得良好的效果。Word 等利用陆地卫星多光谱遥感图片、黑白航空照、地面样地调查与 GIS 技术结合评价了阿拉斯加 Itzermk 环礁湖海草床的时空变化,并绘制了海草床的时空变化图^[18]。Robins 利用低分辨率航空照片监测了位于佛罗里达亚营养化海域 Tampa 湾海草床的空间变化^[19]。Norris 等利用水下摄影,样地调查以及全球定位系统(GPS)作为信息源,应用 GIS 技术估测了沉水植被的覆盖区域^[20]。Ferguson 和 Kofmacher 在 Word 等人工作的基础比较了航空照片与卫星遥感图片在研究中应用的优缺点^[21]。在他们的研究中 GIS 技术的应用扩大了信息源的范围并且能够使不同的信息源集成化,提高了研究的精确性和准确性。

1.3 湖泊生态系统

在湖泊生态系统的研究中利用 GIS 技术中的数据存贮和分析功能可以绘制出单一物种分布区域的地理参考图;GIS 的进一步应用还可用于归纳专题图片的信息,用于专题分析;应用 GIS 还可进行群落与个体生态特征的分析,如 Melzer 等对于 Constance 湖物种指数的计算^[22]。Remillard 等的工作表明 GIS 在水生生态学研究中的主要功能是在科学研究与景观管理之间充当连接媒介^[23]。Schmieder 根据航空照片绘制了 Constance 湖整个沿岸带的沉水植被图。在全湖沿岸带数据库的基础上,分析了沉水植被分布区域的变化,并计算了物种的营养负荷系数,研究了 30 年间物种分布格局的变化,预测了水生植物对

于湖泊富营养化及其后续贫营养化过程的响应^[24]。他们的研究工作表明,将 GIS 数据库中全湖空间分布数据与样地数据相结合与传统的研究方法相比,具有更高的精度,同时也可用于分析湖泊环境中理化因子的变化对植物生长及其分布的影响。

Lehmann 等利用 GIS 技术研究了瑞士 Geneva 湖水生植物与基质及深度梯度相关的空间异质性^[11]。建立了 Geneva 湖沿岸地理数据库,这个数据库包括植被、基质,水深三个信息层,并用一元三次方程表述了最大根长度、生物量与基质及水深之间的关系,分析了沿岸带植物生长的主要干扰因素是波浪作用,压力产生于基质中的营养盐含量以及水深变化的透光率^[13],这表明生长于特定区域和时间的植被是压力干扰以及竞争平衡的结果。李蓉蓉与李伟等在洪湖利用 GIS 技术进行的工作表明:利用 GIS 技术较强的数据处理功能在研究渔业开发与湖泊环境特别是与水生植被的关系,有利于从总体上把握水生植被得变化规律,为制定合理的渔业开发策略提供科学依据,克服了传统研究方法周期长、效率低、难以实现模拟过程的不足^[16]。

1.4 河流生态系统

GIS 技术在河流生态系统研究中的应用主要是利用 GIS 技术的数据管理、分析功能支持遥感分析,实现研究地点和环境敏感地区的空间定位分析,进行资源管理和对生态敏感区的评价工作。

Narumalani 等应用 GIS 与遥感技术进行了河岸森林带缓冲区的界定和分析工作^[25]。利用遥感和 GIS 技术评价了缓冲区内非点源污染物对水资源质量的影响,界定了缓冲区内生态敏感区,模拟了建立缓冲区后的效果。他们的研究工作着眼于对 Iowa 河流域缓冲区的发展与分析,利用陆地卫星专题图确立了研究区域的土地利用特征,利用美国地理测绘局的数据库获取了水文数据,应用空间距离分析工具确定缓冲区内水体表面的水文特征,在土壤分析的基础上,确定了缓冲区的大小,最后界定缓冲区。

GIS 技术也可应用于河岸生态交错区的研究^[26-29]。Jananer 研究了奥地利 Dauube 河交错区内水生植物密度与渔业活动之间的关系^[30],利用 GIS 绘制了交错区内水生植物物种分布图,并预测了水生植物生物量的最大值,比较了不同水文条件区域的水生植被特征。他的工作表明,GIS 技术的应用可以消除不同研究人员之间存在的主观性误差;可以同时考虑生物或非生物因素的影响;可以进行生态演替的模拟预测;可以在景观单元之间提取生态交错区的特征信息。

Donald 利用 GIS 技术研究了五大湖区长期水位波动对于 St. Marys 河湿地的影响^[31]。利用 GIS 技术计算了五种类型湿地面积随水位变化而发生的变化,面积的变化可以有效地评价水位波动的效应,估测响应次数以及检验湿地类型在水位影响下的转化。他们的工作表明,在研究过程中,GIS 技术的应用减少了操作的工作量,提供了一种快速准确制作年间湿地变化图的方法,提供了一种快速集成湿地类型向相邻湿地类型转化的方法,提供了一种有效地根据历年数据计算湿地变化的方法,并可与水位数据相连接,分析水位变化对湿地变化的效应。

2 GIS 在水生态学研究中的作用

GIS 技术来自两个比较成熟的软件技术,数据库管理系统(DBMS)和计算机辅助设

计(CAD),并具备空间数据的管理和分析功能。此外 GIS 所基有的数字化功能,查找和更新数据等功能使其在水生态学的研究中得到了广泛的应用。GIS 技术在水生态学中的应用范围十分广泛,几乎在所有的领域和时空尺度上都有应用,从植被图的绘制,植被变化的预测,影响植被变化的因素分析,一直到生态敏感区的界定和湿地管理方面都起到了重要的作用。根据 GIS 技术在这些研究实例中所起的作用和基本的功能特征,可以将 GIS 技术在水生植物生态学研究中的作用主要归纳为以下几种^[32,33]。

2.1 提供数据库数据

GIS 是组织一个生态学数据库的较佳选择,通过地理关系和运用空间数据结构对生态学数据进行贮存、管理和分析是研究生态学的多尺度的 GIS 的基础功能,在定位研究和立地分析以及空间模型方面十分有效。GIS 数据结构中栅格式数据结构能较好地表达连续的或地面类型的数据(海拔、地面温度、生物量),而矢量式数据结构则在生态学资源管理的研究中十分有效。

2.2 支持生态学研究中的等级格式

由于生态系统具有时空尺度性,当在大的尺度上评价生态结构时要求把生态学理论的尺度观和数据库格式相结合,GIS 正是这样一种有效的结合工具,GIS 既是一种数据库工具,又能有效地处理多种尺度上的环境问题。在 GIS 中可在贮存和获取环境数据的数据结构上再附加上一种合并/分离的人为格局,这种格局可为尺度间的分析创造条件。在多方位取样的基础上,利用方型树结构(Quard-tree Structure)建立的多重尺度的 GIS 可为生态系统结构和功能的尺度变量的经验估计提供机制^[32]。

2.3 支持遥感分析

在生态学研究中,由于遥感技术具有获取空间信息迅速准确,信息量大、范围广等优点,它的应用越来越广泛,已成为空间信息的主要获取源之一。已广泛地应用于水体深度、底质类型和水生植被等信息的提取,为湖泊生态系统调查提供了新途径,弥补了湖泊野外调查难度大、定位精度差等方面的不足。GIS 中地形、土壤和植被类型等数据层能够促进遥感数据的信息解释力,当前 GIS 技术被广泛用来辅助制作,以卫星图像为基础的植被图、土地利用图等,还可用于辅助验证遥感图像处理的结果。遥感与 GIS 之间的信息流动是双向的,不仅 GIS 与促进遥感的解释力,而且地理编码和矫正图像可用于推导 GIS 所包含的一些环境变量,促进 GIS 的动态更新。近年来随着矢量和栅格结构的图形集成化方面的进步,矢量格式与栅格结构之间的转换能较易实现,使遥感技术与 GIS 能够更加有效地结合在一起。

2.4 支持空间定位分析

生态学研究中常常需要对某些区域进行空间定位分析,而一个 GIS 数据库的最大分辨率水平确定后,就可用于定位分析,尤其可为生态变量取样确立野外样地的位置,GIS 中的海拔、土壤、植被类型数据与 GPS 结合可对研究样地进行精确的空间定位。在大的尺度水平上,运用 GIS 技术与 GPS 进行空间定位具有传统方法所无法比拟的精度。

2.5 支持空间统计分析

GIS 的空间编码结构和其固有的大量数据的特性,使其能支持统计分析、生态学在这方面的应用大部分是用于确定环境变量之间的空间关系,在研究呈空间分布的变量之间

的空间关系时可利用 GIS 来比较区域之间的生态结构,并且可以将生物因子与环境变量结合起来分析,从而为系统的模拟与预测创造条件。

3 讨论

GIS 作为一种新兴的技术手段,它的应用越来越广泛,在生态学研究引入 GIS 技术使许多新的研究方法和手段被引入到生态学的研究中,使生态学的研究的深度和广度都有了很大的扩展。与传统的研究方法相比,GIS 技术的应用使得生态学研究空间定位分析,不同等级生态系统的比较以及生态系统的预测模拟等传统研究方法难以解决的问题得到了解决,同时在定位研究的精确性和生态问题分析的准确性方面有了很大的提高。同时 GIS 技术正处于迅猛发展的阶段,世界各国都投入了巨大的人力物力来发展这一新兴技术。GIS 技术发展的趋势主要集中于空间数据结构和数据管理,GIS 的微机化,与遥感技术的进一步结合,GIS 的智能化,GIS 应用模型的开发等^[1,34]。而 GIS 技术以及相关技术的发展都为水生植物生态学的研究提供了新的技术支持条件。作为水生生态系统的重要组成部分,水生植物生态学的研究受到越来越多的重视。在我国,由于一直沿用传统的生态学研究方法,以及相关技术手段的缺乏,水生植物研究仍停留于传统的生态学研究水平上,仍然侧重于物种的调查、植被的演替等,而且在研究过程中,传统的取样调查方法带有很大的主观性和随机性,同时野外样地的定位,也存在着极大的偏差,这就给研究结果的统计和分析带来了困难,而且大量的调查数据的处理和分析也成为令人头疼的问题,同时在研究过程中许多重要的生境特征也被忽略了,特别是大的尺度水平上,样地调查的工作量很大且研究的准确性无法得到保证。GIS 及其相关技术的应用为我们提供了新的研究方法和手段。近年来生物多样性及其保护的研究越来越为世人所关注,水生植物作为其中的组成部分也受到了相当程度的重视,也进行了一些相关研究^[35-38]。我们可以利用 GIS 技术的数据存贮和管理功能以及对遥感技术的支持和空间定位分析,空间统计分析的功能,将多种信息源统一于一个参考系中,建立水生植物资源地理信息系统,可以将历史资料与现有的调查资料结合,在全国、省、市等不同等级水平上建立相应的信息管理系统,并且可以通过国际互联网技术,实现信息资源共享。由 GIS 可以得到濒危物种的分布图、资源现状图,并且在此基础上与环境地理特征结合可以进行植被资源变化趋势的分析,并开展相应的研究工作,以加强我国水生植物多样性保护的预测和决策工作。

生态学的研究越来越注重于环境的保护和资源利用的可持续发展,水生态学的研究与其它领域的合作越来越紧密。流域生态学这一概念的提出进一步扩展了水生态学的尺度和范围,促进了水生态学与其它研究领域的结合,从自然-社会-经济复合生态系统的角度去开展研究工作,赋予了水生态学以新的思想和研究角度。流域生态学注重于生态学过程的定量化,不同尺间的相互作用机制以及复合生态系统结构和功能的研究,研究内容主要有:环境变化对于流域景观格局的影响和响应;营养源与物质流的动力学研究;江湖阻隔的生态学效应;植物分布格局与流域结构功能动态间的关系;恢复生态学机制的研究;流域生态系统的可持续发展研究^[39,40],这些都需要水生态学的研究人员与其它领域的研究人员紧密合作,而在研究过程中,GIS 技术以及其支持的相关的技术手段,必然会起到举足轻重的作用,特别是 3S(GIS、RS、GPS)集成技术的应用能够对不同的数

据源进行合成,能够对不同领域的研究信号进行叠加并可在此基础上进行处理,生成各种合成结果和专题结果,并且可以进行相应的数学分析工作,完成尺度间以及不同研究地点的比较分析等工作。虽然 GIS 在水生态学研究中的应用还不是很广泛,同时在应用过程中也存在着这样或那样的缺陷,如应用过程中,误差传递的问题以及一些客观环境条件(如天气、水文条件等)所带来的误差等,但随着 GIS 技术本身得不断发展,特别是 3S (GIS、RS、GPS)集成技术的发展,它在水生态学研究中的应用必然会越来越广泛,必然会发挥越来越重要的作用,推动水生生态学的研究在深度和广度上不断向前发展。

参考文献:

- [1] 张超等主编. 地理信息系统[M]. 北京:高等教育出版社. 1995
- [2] Davis F W, Stine P A, Stoms D M. Distribution and conservation status of coastal sage scrub in southwestern California[J]. *J. Veg. Sci*, 1994, **5**:743—756
- [3] Welch R, Remillard M M. Integration of GPS, RS, GIS techniques for coastal resource management[J]. *Photogram, Eng. Remote Sensing*, 1992, **58**:1571—1578
- [4] Jensen J R, Narumalani S, Weatherbee O, et al. Predictive modeling of cattail and waterlily distribution in a South Carolina reservoir using GIS. Photogramm [J]. *Eng. Remote Sensing*, 1992, **58**:1561—1568
- [5] Pereira J M C, Itami R M. GIS-based habitat modeling using logistic, multiple regression: a study of the Mt Graham red squirrel [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 1991, **57**:1475—1486
- [6] Raitala J, Jantunen H, Lampinen J. Application of Landsat satellite data for mapping aquatic areas in northeastern Finland[J]. *Aquatic Bot*, 1985, **21**:285—294
- [7] Marshall. T. P., Lee, P. E. Mapping aquatic macrophytes through digital image analysis of aerial photographs: an assessment [J]. *J. Aquatic. Plant Manage*, 1994, **32**:61—66
- [8] Welch R, Remillard M M. RS and GIS techniques for aquatic resources evaluation [J]. *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 1988, **54**:177—185
- [9] Narumalani S, Jensen J R, Althausen J D, et al. Aquatic macrophyte modeling using GIS and logistic multiple regression [J], *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 1997, **63**:41—49
- [10] Jensen J R, Narumalani S, Weatherbee O, et al. Measurement of seasonal and yearly cattail and waterlily changes using multitemporal SPOT panchromatic data [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 1993, **58**:1561—1568
- [11] Lehmann A, Jaquet A, Lachavanne J. - B, Contribution of GIS to Submerged macrophyte biomass estimation and community structure modeling, Lake Geneva, Switzerland [J]. *Aquatic Bot.*, 1994, **47**:99—117
- [12] Lehmann A, Lachavanne J B, Geographic information systems and remote sensing in aquatic botany [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:195—207
- [13] Lehmann A, Jaquet J. - M. A GIS approach of aquatic plant spatial heterogeneity in relation to sediment and depth gradients, Lake Geneva Switzerland [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:347—361
- [14] 李蓉蓉,李伟,等. GIS技术在模拟不同利用强度对洪湖植被影响中的应用[A]. 见:陈宜瑜,洪湖水生生物及其资源开发[M]. 北京:科学出版社. 1995,174—181
- [15] 张晓阳. 洪湖沉水植物光谱特征与生物之间的关系初探[A]. 见:陈宜瑜,洪湖水生生物及其资源开发[M]. 北京:科学出版社,1995,159—165
- [16] 张晓阳. 应用 Landsat TM 影像估算洪湖沉水植物生物量[A]. 见:陈宜瑜,洪湖水生生物及其资源开发[M]. 北京:科学出版社,1995,166—173
- [17] Muller E. Mapping riparian vegetation along rivers: old concepts and new methods [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:411—437
- [18] Ward D H, Morkon C. J, Douglas D., Distribution and stability of eelgrass beds at Izembek Lagoon Alaska [J].

- Aquatic Bot*, 1997, **58**:229—240
- [19] Robbins B D, Quantifying temporal change in seagrass areal coverage the use of GIS and low resolution aerial photography[J]. *Aquat Bot.*, 1997, **58**:259—267
- [20] James G. Norris, et al. Estimating basal area coverage of subtidal Seagrass bed using underwater videography [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:269—287
- [21] Ferguson R. L. Korfmacher K. RS and GIS analysis of Seagrass meadows in North Carolina, USA [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:241—258
- [22] Melzer, A. Harlacher, R., Held, K., et al. Die Makrophytenvegetation des chiemsees. Informationsberichte Bayer [M]. Landesamtf. Wasserversorgung, 1986, 4/86,204
- [23] Remillard M. M, Welch R A. GIS technologies for aquatic macrophyte Studies I Database development and changes in aquatic environment [J]. *Landsc. Ecol.*, 1992, **7**:151—162
- [24] Schmieder K. Littoral zone - GIS of Lake Constance a useful tool in lake monitoring and autecological studies with submersed macrophytes [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:333—346
- [25] Narumalani S., Yingchun Zhou, John R. Jensen. Application of RS and GIS to the delineation and analysis of riparian buffer ones [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:393—409
- [26] Naiman R J, Decamps H. Aquatic - terrestrial ecotones: summary and recommendations [A]. In: Naiman, R. J., Decamps, H. (Eds.), *The Ecology and Management of Aquatic - Terrestrial Ecotones*[M]. UNESCO and Parthenon Publishing Group. 1990, 316
- [27] Naiman R J, Decamps H. Summary: Landscape boundaries in the management and restoration of changing environments. In: Holland. M. M., Risser, P. G., Naiman, R. J. (Eds), *Ecotones. The role of landscape Boundaries, in the Management and Restoration of changing Enviroments.* Chapman and Hall[M]. New York:1991. 142
- [28] Turner M G. Landscape changes in nine rural countries in Georgia, USA [J]. *Photogramm. Eng. Remote sensing.* 1990, **56**:379—386
- [29] Turner M G., Gardner R H, Neill R V. Potential responses of Landscape boundaries to global change[A]. In: Holland, M. M., Risser, P. G., Naiman, R. J. (Eds) *Ecotones. The role of Landscape Boundaries in the Management and Restoration of Changing Environments*[M]. Chapman and Hall, New York:1991, 142
- [30] Janauer G A. Macrophytes, hydrology and aquatic ecotones: a GIS - supported ecological survey. [J] *Aquatic Bot.* 1997, **58**:379—391
- [31] Donald C John W, Lyon G. Historical aerial photographs and a geographic information system to determine effects of long - term water level fluctuations on wetlands along the St. Marys River, Michigan, USA [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:563—378
- [32] 邱杨,等. GIS在景观生态学研究中的作用[J]. *环境与开发*, 1998, **13**(1):1—4
- [33] Caloz R., Collet C. GIS and RS in aquatic botany: methodological aspects [J]. *Aquatic Bot.*, 1997, **58**:209—228
- [34] 梁启章. 地理信息系统的现状及其技术系统的研究方向[J]. *地理学报*, 1989, **44**(1):6—21
- [35] 谢平, 崔奕波. 长江中下游湖泊生物多样性与渔业发展[J]. *水生生物学报*, 1996, **20**(增刊):1—5
- [36] 谢平, 陈宜瑜. 我国内陆水域的“魔鬼四重奏” - 生物多样性的丧失与人类活动[J]. *水生生物学报*, 1996, **20**(增刊):6—21
- [37] 倪乐意. 武汉东湖水生植被结构和生物多样性的长期变化规律[J]. *水生生物学报*, 1996, **20**[增刊]:60—74
- [38] 于丹, 涂芒辉, 等. 武汉东湖水生植物区系四十年间的变化与分析[J]. *水生生物学报*, 1998, **22**(3):219—228
- [39] 蔡庆华, 吴刚, 刘健康. 流域生态学: 水生态系统多样性研究与保护的一个新途径[J]. *科技导报*, 1997(5):24—26
- [40] 邓红兵, 王庆礼, 蔡庆华. 流域生态学 - 新学科、新思想、新途径[J]. *应用生态学报*, 1998, **9**(4):443—449