

流域人地关系地域系统研究进展^①

张洁¹, 李同昇², 周杜辉²

(1 西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710032 2 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 随着人类对流域内各种资源开发强度的增大, 流域内人地矛盾日益突出, 对流域人地系统的研究成为焦点问题, 系统总结了当前国内外流域人地系统研究在理论、观点、方法与实践等方面取得的最新进展, 指出了当前该领域研究的薄弱环节, 并展望了未来主要的研究方向。研究认为, 国际学者普遍关注流域发展规划与管理的研究, 研究内容涉及流域发展规划和管理的起源、类型、管理的目的、面临的问题、流域环境系统规划等多个方面, 这也引起了我国学者对流域治理的关注; 同时, 国内外许多学者在流域人地系统相互作用的过程模拟和情景分析和流域人地关系地域系统作用机理方面也进行了一定的研究; 在研究方法上, 主成分分析法、灰色关联分析、协调度模型、综合评价指标模型、系统动力学模型、地理信息系统、决策支持系统等定量分析手段已经应用于国内外流域人地关系地域系统的研究。但是, 当前的研究普遍缺乏流域人地系统结构演变的综合性研究, 缺乏自然因子和人文因子耦合机制和模型研究, 缺乏规律总结性研究, 缺少定量分析和动态分析, 缺乏对不同情景下流域人与地相互作用过程的模拟和预测。因此, 未来流域人地系统的研究应加强多学科融合, 加强流域人地相互作用机理的研究, 注重新技术方法的应用与动态仿真模拟。

关键词: 流域; 人地关系地域系统; 研究进展; 展望

中图分类号: K901 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6060(2011)02-0364-13(364-376)

随着人口、资源和环境问题的进一步加剧, 人地关系问题愈来愈受到人们的普遍关注。目前, 人类对生态环境影响的范围和强度已经超过了历史上任何一个时期。地球表面上几乎没有哪一个生态系统不受到人类的影响, 人类正直接或间接地影响着地球上所有地方。江河流域是人类古代和现代文明发生的地方^[1], 至今流域仍然是国民经济和区域经济发展的空间载体, 是产业集中、城市发达和人居条件相对优越的地区, 同样, 也是人地关系最为敏感和突出的区域。随着人类对流域水资源、土地资源等自然资源的开发强度不断扩大, 流域上中下游的生态环境均遭到不同程度的破坏, 许多流域区逐步成为生态脆弱地区和敏感地区, 流域人地关系成为地理学的关注点之一。1992年都柏林(Dublin)“国际水与环境大会”及里约热内卢(Rio de Janeiro)“联合国环境与发展大会”均强调“加强流域的规划

与管理工作, 以便控制和遏止环境恶化”^[2]。宋长青在《21世纪中国地理学综合研究的主要领域》中将“湖泊和流域”作为地理学重要研究领域之一^[3]; “全球变化人类行为计划(HDP)第六届开放会议”的“热门议题和讨论专题”中也有很多专题和流域人地系统有关, 如全球水系统项目中人类行为的作用; 水管理中的人类行为——来自欧洲的研究经验; 大河流域的环境风险管理——利益相关者间的协调; 在跨界水资源管理中, 减少冲突, 提高恢复^[4]。张力仁认为“从系统或流域的观点来考察人类环境行为的相互影响关系, 是认识和把握人地关系实质与机理的重要途径”^[5]。因此, 本文对国内外与流域人地关系地域系统表达最为密切的相关研究进行了系统梳理和总结, 并探讨了该领域当前研究的不足以及未来的研究方向, 旨在为流域人地系统的协调发展提供有益借鉴。

① 收稿日期: 2010-09-14 修订日期: 2010-12-02

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20060697004), 西安工业大学校长基金项目(XAGDXJJ020)

作者简介: 张洁(1982-), 女, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事人地关系与区域规划研究。Email: zhangxiyuq982@163.com

通讯作者: 李同昇(1960-), 男, 陕西岐山人, 教授, 博导, 主要从事经济地理研究。Email: lctang@nwnu.edu.cn

1 流域发展规划与管理

流域发展规划与管理 (River Basin Development Plan and Management) 是在涵盖多种目的的公共政策的框架内部, 以科学技术的应用和福利经济学的基本原理为基础的^[6], 以流域水资源的有序调度为手段的, 以提高人类的福利为目的^[7], 将集水区域、地下水、土地使用、河流管理、福利提高、卫生保健以及发展的其他方面作为一个综合体的研究。详尽的流域管理对农业和森林的良性发展, 对控制土地退化都至关重要^[8], 还能够帮助稳定河流的流量和流速, 减少水流的污染物负荷, 提高地下水补给, 而国际间的流域开发和管理的合作和协调的失败可能会产生比资源浪费和环境退化更严重的后果, 有可能威胁人类和平^[9]。目前流域发展规划与管理的主要工作是多元开发、流域单元的一体化功能; 接受干预以促进发展 (通常被视为社会财富和区域情况的好转)。该类研究总体可归纳为以下 7 种:

1.1 流域发展规划与管理的起源和发展过程

一般认为第一次将流域作为规划和行政管理的单元可能是 1752 年^[10], 而将流域作为一个地理单元进行规划、开发、管理则产生于 19 世纪末 20 世纪初^[11]。在英国殖民印度时, 灌溉的发展产生了类似自上而下 (top-down) 的流域发展规划与管理形式^[12]。在 20 世纪初期, 建造水坝技术的改进加速了流域开发。这时水工程学和水电学家们的观点占主导地位, 认为应该为了经济发展而大力开发流域, 强调最大可能产出和机械工具研发以更有效大量的为使用者获取水资源。到 20 世纪后半期, 大量大型水坝的建造, 灌溉面积增加了一倍, 这些大规模的流域开发产生了难以预想的后果, 迫切的需要一个公共机构将流域水资源和水的使用者结合成一个整体进行规划、整治和管理; 也需要地表水、地下水、废水相互作用的复杂的水文学知识, 还需要相应的数据库进行管理^[13-18]。这样以流域为单元进行资源和环境综合研究和管理的的重要性开始得到越来越多的学者和管理者的重视, 纷纷开始将流域作为一个系统, 对流域防洪、水资源供应、水环境治理和保护、河湖整治, 以及航运、旅游和发电等进行统一规划和管理。英国人 Gardiner 于 1993 年最先提出以流域可持续发展为目标的流域综合管理, 英国国家河流管理局 (NRA) 于 1995 年发表了 Thames 河

流域 21 世纪日程与持续发展战略, 对水资源、水质、洪水、自然保护、休闲地、航运等进行了以可持续发展为目标的流域规划^[19]。

1.2 流域发展规划与管理的类型

具体来看, 流域发展规划与管理经历了 6 种形式: (1) 单一目标。防洪、水电开发、灌溉中的一种。(2) 双重目标。如建水坝可以提供发电还可以控制洪水。(3) 多目标。同时寻求多重目标, 开始考虑到水资源分配的冲突和寻求水资源的最优开发。(4) 综合目标 (comprehensive)。将土地、水资源、发展和他们之间的相互关系都考虑在内, 其目标是各种资源的最优开发。但是相对于集成的流域发展规划与管理, 综合的流域发展规划与管理很少考虑到人类福利。(5) 集成 (integrating)。流域发展规划与管理建立了一个整合环境、社会和经济发展的流域管理和规划的框架。在规划、构建和实施管理之间, 在政策、程序和方案之间, 在国家、区域和地方之间, 在行业 and 部门之间都需要集成^[20-21]。联合国等大量的国际组织赞成并推进集成的流域发展规划与管理^[22]。(6) 整体 (holistic)。整合的流域发展规划与管理考虑整个项目发展活动的时间跨度, 仔细考察流域各部分、人口、规划者和管理者的相互作用^[23]。人类学、全球变化响应、资源管理、社会科学和一些其他学科提倡整体性方法。城市和区域规划也是根植于整体性和生态系统方法^[24]。可持续发展本质上也是一种整体性理念^[17]。由于现存的行政结构是按部门进行组织的, 所以该方法存在很大争议^[25]。

1.3 流域发展规划与管理的目的

鉴于流域发展规划与管理可能由捐助者、当地居民等多个利益群体的参与, 需要协调各方的利益, 因此, 流域发展规划与管理的目的主要有: 协调使用共享流域, 避免环境退化, 促进可持续发展, 对水资源和土地资源进行综合管理, 促进自然资源、农业、基础设施和社会服务等集成和最优开发, 提供综合的和分散化的管理和规划, 确保流域内的发展没有相应的负面影响, 关注自然资源的区域发展效应, 并且掌握区域规划和管理战略; 反对大城市和优惠区域的“拉”力, 促进乡村地区的发展, 提供可行的管理和规划方法, 确立政治上可接受的方式获得沿河国家或沿河地区的合作, 以避免官方屈从于其他类型的组织, 集成环境和其他方面的规划管理^[26-27]

1.4 完善的流域管理与规划应具备的条件

HooPer指出完善的流域规划和管理应具备以下条件:由一个稳定的机构进行管理,这个机构被牢固的、综合的、可变通的法律、命令、规则等支持;以强大知识库为基础,这个知识库是一个有规则的、全面的数据网络体系和数据模型,可进行数据分析,为流域内的自然资源和水资源管理的政策和战略的实施提供帮助;集成行动贯穿所有的自然资源问题,完善和发展流域内各种自然资源的管理政策;应用强大的公众参与过程;在立法上有强大的基础和权利,清楚的知道流域管理的功能、结构和资金基础;在特权阶级、公众态度和资金等现实情况存在的情况下进行构想,战略规划和实施过程应以流域内部组织的交流、协调、合作为基础才能更加成熟并有所发展^[28]。

1.5 流域发展规划与管理面临的问题

有学者认为由于缺乏数据,流域发展规划与管理难于建立很好的模拟模型^[29-31],很多规划和管理工作的基本假定也是错误的。学者 Christoph^[7]认为流域发展规划和管理存在三个主要问题:流域发展规划与管理只有建议的权力而没有其他权力;不能对整个流域进行控制管理;进行跨国流域管理困难更多。流域发展规划与管理的各部门可能是对立的,难于进行信息的分享,因此,又有很多人提出对流域进行部门管理而不是集成管理。如果流域进行集成开发,就需要通过多学科融合和多学科交叉的方法来有效地协调大量部门^[30-32-33]。HooPer提出了未来流域发展规划和管理继续发展可能存在的障碍^[28]:(1)可用于测量流域尺度分布管理的绩效指标是什么?这些指标能不能被用于过去、现在和未来的不同议事日程下的流域管理?(2)环境报告怎样能被更有效的用于流域管理?环境报告能不能作为表明在世界经济变化产生的新的景观和特定的流域管理程序下社会和自然环境状况提高的工具?环境报告和流域管理程序之间存在因果关系吗?(3)在流域尺度下最有效的协调当地政府职能的机制是什么?一个重要的问题是,在西方的民主制下,由于人们赞同以国家/省的权利和行政管辖,对于区域管制是被忽略的,而流域属于区域的范畴,往往与省乃至国家的行政边界是不一致的。

1.6 流域环境系统规划

自20世纪70年代以来,流域环境系统规划得到了广泛的开展。例如,1970年,加拿大进行了圣

约翰河流域水资源最优化管理规划。Haines对美国Momee河流域作了多目标土地利用规划^[34]。Huang等人进行了加拿大Mackenzie河和Niagara河流域综合环境管理与规划研究^[35]。为应对干旱年所出现的供水紧张的严峻问题,S TISDALE等人在1938-1940年对俄亥俄流域进行了污染调查,调查发现行政部门的合作对控制州与州之间的河流污染非常关键^[36]。

1.7 流域治理

流域治理是我国为了缓解流域范围内的人地冲突、促进人地系统优化而主动采取的措施,流域治理是促进流域经济可持续发展的保障^[37]。有学者从理论的角度提出流域治理的宏观政策,文伏波等人认为流域治理应加强防洪减灾体系建设,做好全流域水资源保护的总体规划,并加强流域立法^[38-40]。还有学者从技术的角度提出了具体的流域治理的方法,昌华,杨肖娥,濮培民根据莫干湖流域的实际情况,认为可采取工程措施、生态措施和农业管理等相结合的方法使流域退化土-水生态系统得到恢复,运用固定化氮循环细菌技术(NCB)这些治理流域河道废水及生活污水的物理生态工程、截污治理工程和退耕还林工程等^[41]。为保证流域治理和生态环境建设的高效、快捷发挥应有的作用,学者们提出了3S技术、系统分析理论在流域治理中的应用以及建设数字流域。刘南,刘仁义完成了浙江省近50个重要流域的社会经济与发展、三维地形和卫星影像、土地利用现状、流域治理规划等多种海量多时空综合信息数据库。将流域治理规划管理业务与数据库、互联网、地理信息系统、虚拟现实等技术相结合,实现了一个分布式的大型网络流域治理规划专业信息系统^[42]。此外,还有学者提出流域规划中应用景观格局特征,根据气候、地貌、水资源和土壤因素以及经济社会因素,合理地配置景观要素,以达到景观结构与功能的最优化^[43-44]。

2 流域人地关系地域系统相互作用过程模拟和情景分析

2.1 流域人地系统的历史分析和动态监测

对流域人地关系进行历史分析和动态监测,研究可归纳以下两种。部分学者从流域自然环境系统的某一种或几种关键要素及其变化进行观测、描述

和分析, 这些要素主要包括流域的水文情势、绿洲分布格局、沉积物频率磁化率和粒度变化细节等湖泊环境指标, 研究普遍认为尽管人类活动在一定程度上受到生态环境的制约, 但人类活动是导致生态环境破坏的主要因素。这部分研究大多由特定专业领域的生态学、环境学和地理信息系统学者完成, 内容较微观, 研究侧重于自然科学领域, 研究方法以定量分析为主, 研究的时空尺度和研究手段随着观测数据的积累、观测仪器的改进以及 RS GIS等新技术的进步而不断拓展^[45-48]。20世纪70年代以来, 美、英、日等主要工业国先后开展包括主要生源要素(如 C N P等)在流域地表的迁移转化规律, 污染物质输移过程及环境灾害研究等, 如利用美国水土流失方程搭载的物质迁移模式、利用放射性同位素进行的流域水土侵蚀模式和水土界面物质迁移过程研究^[19]; Kesse等研究了人类聚落对密西西比河泥沙量的影响^[49]; Woman M G及其学生几十年来所做的关于城市化对水沙径流入河的影响; Mossa分析采矿对河流系统的影响^[50]; Abraham等人研究发展中国家土地利用变化对坡地和河流过程的影响^[51]; 以及 Trimble等所作的关于植被恢复对河流动力学的影响^[52]。在我国, 程维明、周成虎等以不同时期的卫星影像、土地利用图和地形图为数据源, 借助遥感和地理信息系统等先进技术, 恢复了玛纳斯河流域过去 50 年来 6 个时期的绿洲分布格局和动态演化过程^[53]。

还有部分学者以历史资料的整理分析为手段, 通过归纳演绎, 对历史时期流域行政格局、农业、畜牧业、人口、交通、城镇经济等人文因素和气候、植被、动物等自然因素的变化进行研究, 普遍认为人地关系地域系统演变是人与自然交织作用的过程^[54], 人地相互作用过程基本呈现环境制约人类、人类改造环境的格局^[55-57]。如肖生春和肖洪浪以近几十年来诸多学者对西北干旱区典型内陆河流域——黑河流域水环境演变诸方面研究成果为基础资料, 综述了上游山区成水环境、中游绿洲用水环境和下游荒漠天然绿洲水成环境在不同时间尺度上的演变过程^[58]。

2.2 流域人地系统相互作用的情境分析

流域人地系统相互作用的情境分析是近年来流域人地系统研究的一个热点和难点。这类研究多以某一流域为对象, 运用灰色多目标规划模型、系统动力学模型等方法, 对不同水土资源开发利用模式或

社会经济增长方式下的生态环境系统变化趋势进行情景分析, 以期对流域资源可持续开发利用与生态环境保护提供优化方案和科学决策依据。

在美国环保署支持下, 地理学家从大气环流模型中提取区域气候变化的情景 (scenarios), 把结果输入到流域水文学与水资源管理的区域模拟中, 将可能的全球变暖和每个流域的水文和社会条件联系起来, 对欠发达国家的湄公河、赞比西河、乌拉圭河、印度河和尼罗河等 5 大流域对气候变化可能采取适应性反应的潜在影响进行评估^[59]。王少平等以江西赣江流域为例, 以 ARCGIS 为平台, 建立了流域环境功能区划、污染源、监测断面和排污口等空间数据库, 利用情景分析法优选出 2 套经济上能承受、水质上可接受的流域水污染控制方案^[60]。李同升和徐冬平以渭河流域关中段为例, 以 SD 方法分别建立 IRD 系统线性增长模型、反馈增长模型和调水耦合模型, 并采用 VenPle 软件进行系统仿真, 以阐明水资源与社会经济时空耦合关系^[61]。郭怀成等以灰色多目标规划 (GMOP) 方法为核心, 对密云土地利用规划进行研究, 通过应用交互式调整和情景分析方法, 得到该模型在两种情景下的优化方案, 并结合实际情进行了方案筛选^[62]。方创琳等以系统动力学模型为依据, 根据黑河流域生态系统、生产系统和生活系统相互作用形成的水—生态—经济协调发展耦合关系式, 建立了黑河流域水—生态—经济协调发展耦合模型^[63]。传统多目标规划方法与情景分析方法结合应用在水资源配置问题研究中, 即利用水环境承载力多目标规划模型, 运用情景分析法, 分析不同情境下的水环境承载力情况^[64-66]。对流域人地系统相互作用的情境分析的研究表明流域人地系统研究日趋模型化, 并从静态分析转向动态分析, 从部门模型转向水—社会经济—生态环境复合系统条件下的整合模型的研究。但流域人地相互作用的机理非常复杂, 动态模拟预测人类活动对生态环境的影响以及生态环境对人类的约束机制仍较困难, 需要从理论、方法和实践层面继续探索。

3 流域人地关系地域系统作用机理研究

3.1 流域人地相互作用的基本理论

流域人地系统相互作用的机理是一个复杂的动态系统, Falkenmark 基于水和生态系统之间的联系,

描述了“人—水”一体化水资源管理的理论框架^[67]；Vélez-smarv从大尺度上分析人类活动对水系统的作用机理和过程^[68]；Lautze分析了人口增加、人类活动以及气候变化对水系统的影响^[69]；左其亭以塔里木河流域为实例，建立了流域人水和谐的量化方法体系^[70]。胡文俊对石羊河流域和威海流域水资源利用、地下水位下降、土壤盐渍化、植被衰退和土地沙漠化之间的相互作用关系进行分析^[71-72]。宋豫秦等从系统论的角度出发，利用自组织理论、耗散结构理论、协同学原理、系统演化的动力机制等方面分析了淮河流域人地系统的优化、平衡及有效调控机理^[73]。王慧敏和徐立中认为流域系统可持续发展运行机制是流域系统中各具体要素（社会、经济、资源、环境）和抽象元素（信息、权力、目标）之间作用联系的综合效应^[74]。

3.2 不同流域人地相互作用差异研究

流域人地系统相互作用机理随着生产力的发展水平而不断变化，不同时段、不同地域的人地系统具有不同的相互作用机理。目前，大部分学者认为自然气候条件和人类活动共同导致流域人地系统的冲突、人地相互作用的动态平衡关系的失调^[75-77]。具体来看，在空间上，上、中、下游由于人类活动的强弱不同，而表现出不同的水环境驱动机制：上游水环境以气候变化为主要驱动力，人类活动效应也已初步显现；中游水环境以与人类活动相关的土地利用为主要驱动力，人类活动已经完全掩盖了气候变化的影响；下游则受到气候变化和中下游人类活动共同影响，人类活动影响逐步上升为主导驱动力；在时间上，表现为不同尺度上气候变化与流域人类活动耦合的驱动机制，现代的流域中下游水环境几乎完全受到人为控制，水资源和水循环模式已经完全不同与以前^[58 76 78-80]。

4 流域人地关系地域系统研究方法

目前，主成分分析法、灰色关联分析、可持续发展度模型、协调度模型、综合评价指标模型、系统动力学模型、流域水资源优化配置模型、决策支持系统等定量分析手段已经逐步应用于流域人地关系地域系统的研究中，学者们将这些方法应用于某流域的实证研究中，为流域人地系统发展的主要因素及其作用强度，流域的人口增长、资源开发、生态胁迫、环

境问题同发展之间的相互制约与合理匹配的关系，较长时间尺度的流域人地系统之间的相互适应和相互促进的规律及其协调发展的趋势预测，协调流域水土等资源在时空上的调配，解决流域水土资源与社会经济系统的时空协同问题等提供了重要的研究手段。已有的定量评价方法大致可分为下述几种。

4.1 综合评价指标模型

综合评价指标模型是目前普遍采用的一种研究方法。它的指标体系可以依据不同的研究对象而改进，对于流域人地系统研究，可选用水资源总量、水资源利用率、水质指数等表征指标，数据收集容易。该方法属于静态研究方法，存在指标权重的赋值较为主观，没有将区域协调发展与人口、资源、环境和发展之间的正负相互关系直观的表现模型中，将指标体系与模型割裂开来的弊端^[74 81-83]。

4.2 协调度模型

流域人地关系地域系统的协调度是指在流域人地系统各要素发展过程中彼此和谐一致的程度。一些学者根据研究区的情况，建立了不同的协调度发展模型，即根据流域人地系统的特征及其协调发展的含义^[70]，引入人均GDP、农民人均纯收入、资源效率、资源供需，主要用水资源、土地资源、大气环境、水环境等与经济、资源、环境效益相关的指标，同时建立协调度模型，将各指标用模型进行测算，以定量分析某个流域人地系统发展的协调程度。如冯平，李健和李绍飞为评价地下水资源对海河流域的社会经济发展的影响，提出了一个协调发展模型^[84]；赵雪雁，周健，王录仓以黑河流域为实证，采用可利用线性加权平均法计算综合反映生态环境与产业结构功效指标环境产业协调度^[85]。协调度模型能较准确的描述流域人地系统发展的协调程度，可以找出不协调的因素，可以为决策提供依据，但存在应用比较复杂，资料收集较为困难，不能反映巨系统的复杂性等缺点，因此更适合于研究各子系统特点较为鲜明的小流域。

4.3 灰色关联分析模型

灰色关联分析是主要通过分析系统中母因素和子因素的关系密切程度，从而判断引起该系统发展的主要和次要因素。崔步礼等人通过选择烟台市大沽夹河流域内人口数量、国内生产总值、各产业总产值等6个因子，采用灰色关联分析，揭示山东半岛典型流域影响河流径流的人文因素分析^[86]。此外，这

一模型还被应用于淮河流域水环境质量综合评价^[87]、山东半岛典型流域影响河流径流的人文因素分析以及综合治理汀江流域^[88]中。灰色关联分析方法不需要大量样本,对数据要求较低,预测精准度高,且计算较简便,可操作性好,并能较好地对流域人地关系影响指标进行综合评价分级,更符合实际情况。但该方法未能对流域人地系统中各子系统特征及其相互关系进行分析研究,不能反映各子系统之间及其内部要素的关联性,缺乏整体性,子系统间没有信息反馈。

4.4 空间主成分分析

空间主成分分析法则是在空间数据的基础上,通过将原始空间坐标轴旋转,将相关的多变量空间数据转化为少数几个不相关的综合指标,实现用较少的综合指标最大限度地保留原来较多变量所反映的信息。王思远^[89]与刘瑞民^[90]分别以黄河流域和长江流域三峡库区大宁河流域为研究对象,在遥感(RS)和地理信息系统(GIS)基础上应用空间主成分分析方法,综合评价了黄河和大宁河流域生态环境质量,研究结果表明利用空间主成分分析进行流域人类活动及区后变化对生态环境影响分析,不仅能够反映流域生态环境的质量的高低,而目可以更好地反映生态环境的区域差异。

4.5 系统动力学模型

系统动力学(System Dynamics)模型被广泛的应用于水资源、土地资源、产业结构等的优化^[91-94],以及流域人地关系的耦合^[61-95]。如方创琳、鲍超对黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用的研究,采用 STELLA 5.0 版系统动力学软件将黑河流域水—生态—经济协调发展耦合系统的动力学方程输入计算机进行模拟,从众多实验方案中选择生成水—生态保护型发展方案(WEP)、水—经济高效型发展方案(WEH)、水—生态—经济协调型发展方案(WEE)3种有效方案^[63]。此外,还有学者将SD模型与投入产出表^[96]、SD模型与多目标规划模型(IFMOP)有机结合研究流域环境系统^[97]等。借助SD模型既可以进行时间上的动态分析,又可以进行部门间的协调,它能对系统内部、系统内外因素的互相关系予以明确的认识,对系统内所隐含的反馈回路予以清晰的体现^[98]。系统动力学模型用动态的、系统的、内部紧密关联的观点来研究流域,能很好的反映流域人地系统的独有特征,对研究和规划复杂

的未来行为和相应的长期战略决策有独到的优点,但需要有流域的多年指标数据建立模型,所需资料面广,数据收集较困难。

4.6 流域水资源优化配置模型

流域水资源优化配置模型的研究为流域人地系统的研究提供了很多定量分析方法。Haines等将层次分析法(AHP)和大系统分解原理应用于流域水资源优化配置,将流域大系统分解为若干相对独立的子系统,每个子系统应用优化技术分别求出优化解,然后通过全局变量把各子系统优化结果反馈给流域大系统优化模型,得到整个流域的优化解^[99]。Singh等在前人研究的基础上,就流域系统分解优化和控制理论进行了探讨^[100-101]。Rosegrant等为评价改善水资源配置和利用的效益,将经济模型与水文模型进行耦合,并把模型应用于智利的Maipo流域^[102]。McKinnis等^[103]利用面向对象技术把水资源管理模型与地理信息系统有机地结合,模拟流域水资源分配。

4.7 决策支持系统

整合的流域管理涉及流域水体的使用、污染、保护、复原等多个目标,使单目标的流域人地系统研究向多目标转化。整合方法意味着在决策过程中要考虑流域各种水系统的非生物部分和生物部分、生态和经济要素、不同管理者的利益等方面。这些目标会相互冲突,最优解往往不存在或难以达到,因此,决策支持系统(A decision support system DSS)被大量应用在流域整合管理和规划中^[104]。Berlekamp J等人将该流域的水量、化学质量和地表水的生态状况全部考虑在内,利用决策支持系统对Elbe流域德国部分的流域管理进行了研究^[105]。Hamalainen等讨论了多用户协商决策支持系统的框架,并将其应用于芬兰的Kymijoki流域^[106]。Xu等将分布式水文模型与地理信息系统有机结合,解决了传统方法不能解决的大量水资源配置方案的检验问题^[107],同时,能形象展示决策者由于条件变化对流域水资源管理的改变,为开发流域水资源管理空间决策支持系统(SDSS)奠定了基础。Kyul Cheoul Shin等人提出了一个集成了地理信息系统与数据库管理子系统,实时气象和水文数据监测系统,模型库子系统的系统仿真与优化,以及图形对话框的实时流域洪水控制空间决策支持系统(spatial decision support system SDSS),并将该系统应用于韩国汉江流域 1995

年的洪水控制^[108]。段学军也进行了流域可持续发展决策支持系统(VSDSS)的开发研究^[109]。

此外,主成分分析^[110-111]、生态足迹分析与计算^[112]也被引入到流域人地关系的研究中。总的来说,各种方法都有着自己的优缺点,使用何种方法,决定于具体区域和具体的研究方向。

5 流域人地关系地域系统研究的不足与展望

5.1 存在的不足

综上所述,国内外学者对流域人地关系地域系统的研究已经进行了大量理论上的总结和方法上的探索,这为流域人地系统优化调控乃至可持续发展的目标的实现奠定了重要的理论基础与实践基础,也为我们进一步研究流域人地关系地域系统提供了重要启示,然而当前的研究尚未形成独立的理论体系,仍然存在以下几个薄弱环节:

(1)大多研究成果是从流域人地系统的某一方面进行探索,研究内容多是对流域的经济发展、产业结构、水资源利用、人口变动、流域水污染问题中的某一个与生态环境之间关系的实证分析,对流域人地系统结构演变的综合性研究不多,特别是对典型流域结构变化的规律性探讨较少。虽然认识到流域人类活动对生态环境带来了巨大影响,对流域人地相互作用机理研究也取得一定突破,但仍难以精确刻画流域人类生产、生活与生态环境之间的定量关系。

(2)关注气候、土壤、水分、地形等自然要素或市场条件、人口、农业技术进步、经济区位、城市化和工业化等人文要素对流域人地系统的影响,缺少对这些自然、人文因子的驱动机制、作用过程和作用效果的系统综合研究,更缺乏自然因子和人文因子耦合机制和模型研究。

(3)实证研究较多,规律总结很少,至今尚未形成独立的理论体系。当前的研究多是针对某一流域或特定流域的某个区段进行实证分析,很少有人对流域人地交互作用的规律和理论进行总结,因此至今尚未形成完整的理论体系和方法体系。

(4)对流域人地系统的分析主要利用传统的数理统计方法和静态特征的描述,缺少定量分析和动态分析,缺乏对不同情景下的流域人一地相互作用过程进行模拟和预测。由于缺乏系统的综合研究,

难以揭示流域人地系统的动态变化特征,以及各种影响因子的耦合机制,也就难以把握流域人地系统演变的一般规律,并进行有效的优化调控,难以促进流域水、土地资源合理开发利用、协调流域人口系统、经济系统、生态系统之间的关系。

(5)对流域人地系统优化对策研究较多,但研究比较分散,提出的部分对策过于理想,在实践中面临着障碍。无论是国内还是国外都很少从定量的角度来分析流域水土资源如何优化开发、流域地域结构如何优化配置、如何选择流域内各片区的支柱产业。这些问题需要在流域人地关系的研究中给予关注,并进行深入探讨。

5.2 发展趋势与展望

从国内外研究的发展趋势来看,以下四个方面将是今后的主要研究方向。

(1)多学科融合。人地系统具有动态性、开放性、复杂性,人地关系的研究是一个非常复杂的课题,既包括人与资源、环境之间的促进、抑制、适应、改造关系,也包括人对资源的开发利用与加工关系以及人类生产和生活中的竞争、共生、隶属关系^[113]。因此,以流域为单位进行人地关系的研究,既要研究流域资源及生态环境的变化特征,又要研究流域内人口变迁、产业变迁、城镇变迁等人类活动的发展规律;既要分析水土资源对人类活动的约束机理,又要回答水土资源约束下的流域人地系统优化调控模式;既需要定性分析流域人地系统相互作用的机制,更需要对其相互作用过程进行动态监测与定量模拟。因此,需要综合集成经济地理学、城市地理学、生态学、系统科学、环境伦理学、地理信息科学等多种学科的理论、知识和方法,来研究流域人地相互作用的规律及其优化模式。

(2)注重流域人地相互作用机理的研究。方创琳指出“机理问题搞清楚了,延伸到过程问题,进而延伸到格局问题,再延伸到节律问题,最后上升为理论问题,形成代表中国权威水平的人地关系新理论^[54]。”可见,机理的研究是人地系统研究的基础中的基础,对流域人地关系地域系统的机理问题我们还应进行不同流域(大流域、小流域、内陆河流域)人地关系理论的内涵与外延,不同流域人地系统耦合机理的差异,经济全球化与流域人地关系地域系统的响应,典型流域人地系统动态优化调控示范区的建立等方面的研究。

(3) 紧密结合实践。流域水质的严重污染和日益贫乏的水资源与十分脆弱的生态环境问题, 对流域人地系统的可持续发展, 乃至人们的生产、生活都产生了严重的威胁。因此, 研究必须要注重与实际问题的紧密结合, 用理论来指导实践, 以实践来丰富和验证所得到的理论, 从而引导流域人地系统优化发展。

(4) 注重新技术方法的应用与动态仿真模拟。采用主成分分析、灰色系统模型等数学模型提取影响流域人地相互作用机制的关键因子, 并对不同情景模式下的流域人地系统的关联耦合效应进行综合评价; 采用系统动力学技术等对流域人地系统的演化过程进行动态模拟; 结合 GIS 方法对流域地域系统结构进行空间分析与类型划分, 分析各类型区地域结构特征、限制性因素和产业发展方向。

参考文献 (References)

- [1] 张雷, 沈叙建, 杨荫凯, 等. 中国区域发展的资源环境协调问题 [J]. 地理科学进展, 2004 (23): 10—19. [ZHANG Lei, SHEN Xu Jian, YANG Y Yin kai et al. Regional development and its resource and environmental harmony in China [J]. Progress in Geography, 2004 (23): 10—19.]
- [2] 柳长顺, 陈献, 乔建华. 流域水资源管理研究进展 [J]. 水利发展研究, 2004 (11): 19—22. [LU Changshun, CHEN Xian, QIAO Jianhua. Research progress of water resources management in river basin [J]. Water Resources Development Research, 2004 (11): 19—22.]
- [3] 宋长青, 冷疏影. 21 世纪中国地理学综合研究的主要领域 [J]. 地理学报, 2005 60 (4): 546—552. [SONG Changqing, LENG Shuying. Some important scientific problems of integrative study of Chinese Geography in 5 to 10 Years [J]. Acta Geographica Sinica, 2005 60 (4): 546—552.]
- [4] 史培军, 王静爱, 陈婧, 等. 当代地理学之人地相互作用研究的趋向—全球变化人类行为计划 (HDP) 第六届开放会议透视 [J]. 地理学报, 2006 (61): 115—126. [SHI Peijun, WANG Jingqi, CHEN Jing et al. The future of human—environment interaction research in geography: lessons from the 6th Open Meeting of HDP [J]. Acta Geographica Sinica, 2006 (61): 115—126.]
- [5] 张力仁. 清代陕南秦巴山地的人类行为及其与环境的关系 [J]. 地理研究, 2008 27 (1): 181—192. [ZHANG Liren. A preliminary study on the relationship between the human behavior and environment in Qinling—Daba Mountain region of southern Shaanxi in Qing Dynasty [J]. Geographical Research, 2008 27 (1): 181—192.]
- [6] DOWNS P W, GREGORY K J, BROOKES A. How integrated is river basin development [J]. Environmental Management, 1991, 15 (3): 299—309.
- [7] CHRISTOPHER J B. River basin development planning and management: a critical review [J]. World Development, 1998 26 (1): 171—186.
- [8] COOPER D L, SOEKRASNO J, SAWATSKY L F. Optimizing agricultural development through river basin planning: a case study in Sukawesi, Indonesia [M]. H. Henday. American Water Resources Association, 1995.
- [9] HILLEL D. Rivers of Eden: The struggle for water and the quest for peace in the middle east [M]. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [10] CHORLEY R H. Introduction to geographical hydrology: spatial aspects of the interactions between water occurrence and human activity [M]. London: Methuen, 1969. 20—21.
- [11] TECLAFF L A. Evolution of the river basin concept in national and international water law [J]. Natural Resources Journal, 1996 36 (2): 359—391.
- [12] MOIGNE G L, SUBRAMANIAN A, MEIX et al. A guide to the formulation of water resources strategy [M]. Washington DC: World Bank Publications, 1994. 23—25.
- [13] HOOPER B P, McDONALD G, MITCHELL B. Facilitating integrated resource and environmental management [J]. Journal of Environmental Management and Planning, 1999 42 (5): 747—766.
- [14] ANONYMOUS. Facilitating integrated river basin management [J]. South African Journal of Science, 1997 93: 483—484.
- [15] BATCHELOR C. Improving water use efficiency as part of integrated catchment management [J]. Agricultural Water Management, 1999 40: 249—263.
- [16] JONCH T, FUGL J. Finishing up the conceptual basis of integrated water resources management [J]. International Journal of Water Resources Development, 2001, 17: 501—510.
- [17] MARGERUM R, BOM SM. A coordination diagnostic for improving integrated environmental management [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2000 43 (1): 5—21.
- [18] WHITE G F. The river as a system: a geographer's view of planning approaches [J]. Water International, 1997 22 (2): 79—81.
- [19] 湖泊及流域学科发展战略研究秘书组. 湖泊及流域科学学科发展历程与展望 [J]. 中国科学基金, 2003 (1): 8—11. [THE RESEARCH GROUP OF THE DEVELOPMENT STRATEGY OF LIMNOLOGY AND WATERSHED SCIENCES. The development review and future prospect of the research in limnology and watershed sciences [J]. Bulletin of National Science Foundation of China, 2003 (1): 8—11.]
- [20] ROWNIRE K. Political and administrative constraints on integrated river basin development: An evaluation of the Tana and Athi Rivers Development Authority [J]. Applied Geography, 1990 10 (1): 21—41.
- [21] SCUDDER T. Recent experiences with river basin development in the tropics and subtropics [J]. Natural Resources Forum, 1994 18 (2): 101—114.
- [22] OAS. Environmental quality and river basin development: A model

- el for integrated analysis and planning[M]. Washington DC: Secretary General of the Organization of American States and the Government of Argentina 1978: 67—68
- [23] SLOCOMBE D S Environmental planning ecosystem science and ecosystem approaches for integrating environment and development[J]. *Environmental Management* 1993 17(3): 289—303.
- [24] TACCONI L, TISDELL C Holistic sustainable development implications for planning processes foreign aid and support for research[J]. *Third World Planning Review* 1993 15(4): 411—428
- [25] HENNESSY J, WIDGERY N River basin development the holistic approach[J]. *International Water Power and Dam Construction* 1995 47(5): 24—26
- [26] TUNDESI J, SIRASKRABA M Strategies for building partnerships in the context of river basin management The role of eco technology and ecological engineering[J]. *Lakes and Reservoirs Research and Management* 1995 1(1): 31—38
- [27] EBONG M O River basin development as a regional planning strategy The case of the Cross River Nigeria[J]. *Third World Planning Review* 1988 10(4): 419—430
- [28] HOOPER B P Integrated water resources management and river basin governance[J]. *Water Resources Update* 2003 126 12—20
- [29] LEE C C, WEN C F An economic and environmental balance in a river basin using interactive multiobjective optimization[J]. *Journal of Environmental Science and Health* 1995 30(8): 1727—1748
- [30] VENEMA H D, SCHILLER E J Water resources planning for the Senegal River basin[J]. *Water International* 1995 20(2): 61—71
- [31] WARD F A, LYNCH T P Integrated river basin optimization modeling economic and hydrologic interdependence[J]. *Water Resources Bulletin* 1996 32(6): 1127—1138
- [32] FANIRAN A On the definition of planning regions The case for river basins in developing countries[J]. *Singapore Journal of Tropical Geography* 1981 1(1): 9—15
- [33] GERSON M, DUCKSTEIN L Multiobjective approaches to river basin planning[J]. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 1983 109(1): 13—28
- [34] HAMES Y Y, DAS S Multiobjective land use planning for Momee river basin[R]. Ohio Prepared for Joint Great Lakes Management Committee 1981
- [35] HUANG G H, XU Y L, GUO H C et al Integrated environmental planning for sustainable development in Lake Ehai basin with a diagnostic study for local environmental concerns[M]. Nairobi: United Nations Environment Programme 1997: 66—67
- [36] TISDALE S The Ohio River pollution survey in relation to pollution problems in the lower Ohio River Basin[J]. *American Journal of Public Health* 1941 31: 605—610
- [37] 刘长星. 流域治理与 3S 技术应用研究[J]. *水土保持学报*, 2002 16(6): 36—38 [LIU Changxing Valley regulation and 3S technique application[J]. *Journal of Soil Water Conservation* 2002 6(6): 36—38]
- [38] 文伏波. 进一步搞好长江流域治理开发[J]. *科技进步与对策*, 2001(3): 44—45. [WEN Fubao Further improve administration and development of Yangtze river[J]. *Science & Technology Progress and Policy* 2001(3): 44—45]
- [39] 彭红霞, 杨超, 杨桂芳, 等. 长江流域可持续发展管理模式探讨[J]. *中国人口·资源与环境*, 2002 12(6): 70—72 [PENG Hongxia, YANG Chao, YANG Guifang et al Probe into management model of sustainable development in Yangtze River valley[J]. *China Population Resources and Environment* 2002 12(6): 70—72]
- [40] 贡璐, 张海峰, 安尼瓦尔·阿木提, 等. 干旱区内陆河流域典型绿洲土地利用格局变化中的人为影响空间分异研究[J]. *干旱区地理* 2009 32(4): 585—591. [GONG Lu, ZHANG Hai Feng, Anjwar Amuji et al Spatial difference analysis of land use change and human impact in typical oasis in arid land[J]. *Arid Land Geography* 2009 32(4): 585—591]
- [41] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民, 莫干湖流域土—水生态系统的退化及治理对策研究[J]. *水土保持学报*, 2003 17(1): 72—74 [TONG Changhua, YANG Xiaoe, PU Peimin Degradation of soil and water ecological system of Moqianhu Catchment and control countermeasures[J]. *Journal of Soil Water Conservation* 2003 17(1): 72—74]
- [42] 刘南, 刘仁义. 浙江省数字流域规划灾害治理技术研究[J]. *自然灾害学报*, 2002 11(3): 57—61 [LIU Nan, LIU Renyi Digital valley planning in disaster hamessing technology for Zhejiang Province[J]. *Journal of Natural Disasters* 2002 11(3): 57—61]
- [43] 谢正宇, 刘金博, 张雪梅. 艾比湖湖面变化对周缘农牧生态系统功能影响[J]. *干旱区地理*, 2009 32(2): 226—233. [XIE Zhengyu, LIU Jinbo, ZHANG Xuemei Impact on ecological function caused by surface changes of Lake Ebinur[J]. *Arid Land Geography* 2009 32(2): 226—233]
- [44] 蒋学玮, 周正立, 李凯荣, 等. 景观生态学原理在流域规划中的应用[J]. *西北林学院学报*, 2003 18(2): 112—115 [JIANG Xuewei, ZHOU Zhengli, LI Kairong et al Application of landscape ecology principle in watershed planning[J]. *Journal of Northwest Forestry College* 2003 18(2): 112—115]
- [45] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析[J]. *地理学报*, 2006 61(3): 262—272 [HAO Xingming, CHEN Yanning, LI Weihong The driving forces of environmental change during the last 50 years in the Taim River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica* 2006 61(3): 262—272]
- [46] 张振克, 吴瑞金. 近 300 年来岱海流域气候干湿变化与人类活动的湖泊响应[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2001 22(3): 70—76 [ZHANG Zhenke, WU Ruijin Climatic variation and human activities recorded by lake sediment in the catchment of Daihai lake during the past 300 years[J]. *Journal of Capital Normal University* 2001 22(3): 70—76]
- [47] 李艳, 陈晓宏, 王兆礼. 人类活动对北江流域径流系列变化的影响初探[J]. *自然资源学报*, 2006 21(6): 910—915 [LI Yan, Chen Xiaohong, Wang Zhao Li Human activities on the change of the discharge series in the North Jiang River Basin[J]. *Journal of Natural Resources* 2006 21(6): 910—915]

- Yan CHEN Xiaohong WANG Zhaoji A tentative discussion on the impact of human activities on the variability of runoff series of the Beijing River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*. *Journal of Natural Resources* 2006 21 (6): 910—915]
- [48] 羊向东, 王苏民, 沈吉, 等. 近 0.3 ka 来龙感湖流域人类活动的湖泊环境响应 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2004, 31 (12): 1031—1038. [YANG Xiangdong WANG Sumin SHEN Ji et al. Human activities to lake environment response in Longgan Lake Basin in nearly 0.3 ka [J]. *Science in China Ser D* 2005 35 (11): 1074—1086.]
- [49] KESEL R H YODIS E G MCCRAW D J An approximation of the sediment budget of the lower Mississippi River prior to major human modification [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 1992 (17): 711—722
- [50] MOSSA J AUTN W J Geographic and geologic aspects of aggregate production in Louisiana [M] // *Aggregate Resources: A Global Perspective*. Rotterdam 1996: 70—71
- [51] ABRAHAMS A D PARSONS A J WAINWRIGHT J Effects of vegetation change on inter-rill runoff and erosion Walnut Gulch southern Arizona [J]. *Geomorphology* 1995 (13): 37—48
- [52] TRIMBLE S W WERICH F W HOAG B L Reforestation and the reduction of water yield on the southern Piedmont since circa 1940 [J]. *Water Resources Research* 1987 (23): 425—437
- [53] 程维明, 周成虎, 刘海江, 等. 玛纳斯河流域 50 年绿洲扩张及生态环境演变研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2005 35 (11): 1074—1086. [CHENG Weiming ZHOU Chenghu LIU Haijiang et al. The evolution of oases expansion and ecological environment in 50 years in Manas river basin [J]. *Science in China Ser D* 2005 35 (11): 1074—1086.]
- [54] 方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望 [J]. *地理学报*, 2004 59 (增刊): 21—32. [FANG Chuanglin Recent progress of studies on man—land relationship and its prospects in China [J]. *Acta Geographica Sinica* 2004 59 (S1): 21—32.]
- [55] 李江凤, 周伟, 徐忠艳. 清江流域古文化时空演进与自然环境的关系 [J]. *华中师范大学学报 (自然科学版)* 2000 34 (1): 111—114. [LI Jiangfeng ZHOU Wei XU Zhongyan The relation between the evolution and progress of ancient culture and the change of natural environment in the Qingjiang River Valley [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)* 2000 34 (1): 111—114.]
- [56] 颜廷真, 韩光辉. 清代以来西辽河流域人地关系的演变 [J]. *中国历史地理论丛*, 2004 19 (1): 16—25. [YAN Tingzhen HAN Guanghui Development of the relationship between human and environment in west Liaohe basin since Qing dynasty [J]. *Collections of Essays on Chinese Historical Geography* 2004 19 (1): 16—25.]
- [57] 陈志清. 历史时期黄河下游的淤积、决口改道及其与人类活动的关系 [J]. *地理科学进展*, 2001, 20 (1): 44—50. [CHEN Zhiqing The deposition breach and diversion in the lower Yellow River and its relationships with human activities during the historical period [J]. *Progress in Geography* 2001, 20 (1): 44—50.]
- [58] 肖生春, 肖洪浪. 黑河流域水环境演变及其驱动机制研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2008 23 (7): 748—755. [XIAO Shengchun XIAO Honglang Advances in the study of the water regime process and driving mechanism in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science* 2008 23 (7): 748—755.]
- [59] 美国国家研究院, 地学、环境与资源委员会, 地球科学与资源局, 重新发现地理学委员会. 重新发现地理学——与科学和社会的新关联 [M]. 北京: 学苑出版社, 2002: 148—149. [RE- DISCOVERING GEOGRAPHY COMMITTEE BOARD ON EARTH SCIENCES AND RESOURCES COMMISSION ON GEOSCIENCES ENVIRONMENT AND RESOURCES NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Rediscovers Geography—new relevance for science and society [M]. Beijing: Xueyuan Press 2002: 148—149.]
- [60] 王少平, 程声通, 贾海峰, 等. GIS 和情景分析辅助的流域水污染控制规划 [J]. *环境科学*, 2005 25 (4): 32—37. [WANG Shaoping CHENG Sheng tong JIA Haifeng et al. GIS and scenario analysis aid to water pollution control planning of river basin [J]. *Environmental Science* 2005 25 (4): 32—37.]
- [61] 李同升, 徐冬平. 基于 SD 模型下的流域水资源—社会经济系统时空协同分析——以渭河流域关中段为例 [J]. *地理科学*, 2006 26 (5): 551—556. [LI Tongsheng XU Dongping A SD-based spatio-temporal synergy analysis on water system and socio-economic system in river valley: a case study of Guanzhong segment in Weihe River valley [J]. *Scientia Geographica Sinica* 2006 26 (5): 551—556.]
- [62] 郭怀成, 张振兴, 于湧. 流域土地可持续利用规划方法及应用研究 [J]. *地理研究*, 2003 22 (6): 671—679. [GUO Huai cheng ZHANG Zhenxing YU Yong Sustainable basin land-use planning and its application [J]. *Geographical Research* 2003 22 (6): 671—679.]
- [63] 方创琳, 鲍超. 黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用 [J]. *地理学报*, 2004 59 (5): 781—790. [FANG Chuanglin BAO Chao The coupling model of water—ecology—economy coordinated development and its application in Heihe River basin [J]. *Acta Geographica Sinica* 2004 59 (5): 781—790.]
- [64] 赵卫, 刘景双, 苏伟, 等. 辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究 [J]. *中国环境科学*, 2008 28 (1): 73—77. [ZHAO Wei LIU Jingshuang SU Wei et al. Studies on multi-objective programming of water environmental carrying capacity (WECC) in Liaohe Watershed [J]. *China Environmental Science* 2008 28 (1): 73—77.]
- [65] 朱一中, 夏军, 王纲胜, 张掖地区水资源承载力多目标情景决策 [J]. *地理研究*, 2005 24 (5): 732—740. [ZHU Yizhong XIA Jun WANG Gangsheng Assessment of water resources carrying capacity with multi-criteria scenario analysis method: a case study in Zhangye region [J]. *Geographical Research* 2005 24 (5): 732—740.]
- [66] 董雯, 刘志辉. 艾比湖流域水资源承载力综合评价 [J]. *干旱区地理*, 2010 33 (2): 217—222. [DONG Wen LU Zhihui Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Ebir Lake Basin [J]. *Arid Land Geography* 2010 33 (2):

- 217—222.]
- [67] FAIKENMARK M. Water management and ecosystems living with change[M]. Global Water Partnership 2003: 9.
- [68] VERO SMARTY C, LETTENMAIER D, LEVEQUE C, et al. Humans transforming the global water system[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union* 2004, 85(48): 509—513—514.
- [69] LAUTZE J, REEVES M, VEGA R, et al. Water allocation climate change and sustainable peace: the Israeli Proposal[J]. *Water International* 2005, 30(2): 197—209.
- [70] 左其亭, 张云. 塔里木河流域人水和谐定量评价及调控对策[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(2): 164—174. [ZUO Qiting, ZHANG Yun. Quantitative evaluation and control measures of human—water harmony for the Tarim River Basin[J]. *Arid Land Geography* 2008, 31(2): 164—174.]
- [71] 胡文俊. 石羊河流域水资源利用和生态环境保护对策[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(6): 969—973. [HU Wenjun. Countermeasures of water resources utilization and ecological protection of Shiyang River Basin[J]. *Arid Land Geography* 2007, 30(6): 969—973.]
- [72] 胡文俊. 咸海流域水资源利用的区域合作问题分析[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 821—827. [HU Wenjun. Regional cooperation issues in water utilization of Aral Sea Basin[J]. *Arid Land Geography* 2009, 32(6): 821—827.]
- [73] 宋豫秦, 张力小, 曹淑艳, 等. 淮河流域人地系统的自组织分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(4): 85—88. [SONG Yuqin, ZHANG Lixiao, CAO Shuyan, et al. Self-organization analysis of human—environment system in Huaihe River basin[J]. *China Population Resources and Environment* 2002, 12(4): 85—88.]
- [74] 王慧敏, 徐立中. 流域系统可持续发展分析[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2): 165—172. [WANG Huimin, XU Lizhong. Analysis on sustainable development of the basin system[J]. *Advances in Water Science* 2000, 11(2): 165—172.]
- [75] 王雁林, 王文科, 杨泽元, 等. 渭河流域陕西段水资源与生态环境保护[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(1): 79—84. [WANG Yanlin, WANG Wenke, YANG Zeyuan, et al. Study on ecological environment protection and exploitation and utilization of water resources in Shaanxi part of Weihe River basin[J]. *Journal of Earth Science and Environment* 2004, 26(1): 79—84.]
- [76] 王录仓, 程国栋, 赵雪雁. 内陆河流域城镇发展的历史过程与机制——以黑河流域为例[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 598—607. [WANG Lucang, CHENG Guodong, ZHAO Xueyan. The history process and developing mechanisms of the cities in the inland river basin taking the Heihe River basin as a case[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2005, 27(4): 598—607.]
- [77] 宋桂琴, 王丽芝, 杨勤科, 等. 王东沟流域人地关系分析与预测[J]. *水土保持通报*, 1995, 15(6): 46—50. [SONG Guiqin, WANG Lizhi, YANG Qinko, et al. Analysis and prediction on human—environment correlation in Wangdong Gully watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 1995, 15(6): 46—50.]
- [78] 马燕, 郑祥民, 曹希强, 等. 近 200 年来黑河下游天鹅湖湖泊沉积记录的环境变迁[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 261—266. [MAYan, ZHENG Xiangmin, CAO Xiqiang, et al. Environmental changes recorded by lacustrine sediment from Lake Swan lower reaches of Heihe River during recent 200 years[J]. *Journal of Lake Sciences* 2006, 18(3): 261—266.]
- [79] 肖生春, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 2000 年来黑河中下游水土资源利用与下游环境演变[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 405—408. [XIAO Shengchun, XIAO Honglang, SONG Yaoyuan, et al. Water land resources utilization and environmental evolution in middle to lower reaches of Heihe River basin during the past 2000 years[J]. *Journal of Desert Research* 2004, 24(4): 405—408.]
- [80] 段学军, 虞孝感. 长江流域可持续发展综合分析与评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(2): 75—80. [DUAN Xuejun, YU Xiaogan. Analysis and assessment of the sustainable development in Changjiang River valley[J]. *China Population Resources and Environment* 2002, 12(2): 75—80.]
- [81] 刘玉, 刘毅. 长江流域区域可持续发展态势与对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 497—502. [LIU Yu, LIU Yi. Current status and perspectives of regional sustainable development in the Yangtze River valley[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* 2003, 12(6): 497—502.]
- [82] 杨东, 杨秀琴. 西北半干旱地区流域系统的可持续发展分析——以甘肃临夏大夏河流域为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(6): 38—43. [YANG Dong, YANG Xiuqin. Analysis on sustainable development of the Daxia River Basin System in Linxia Gansu Province[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment* 2004, 18(6): 38—43.]
- [83] 秦莉云, 金忠青. 流域可持续发展评价指标体系框架设计[J]. *人民黄河*, 2001, 23(2): 3—5. [QIN Liyun, JIN Zhongqing. The design of sustainable development evaluation index system framework in river basin[J]. *Yellow River* 2001, 23(2): 3—5.]
- [84] 冯平, 李健, 李绍飞. 地下水与社会经济的协调发展分析模型及其应用[J]. *数学的实践与认识*, 2006, 36(4): 61—66. [FENG Ping, LI Jian, LI Shaofei. A corollary development evaluation model of groundwater and social economic and its application[J]. *Mathematics in Practice and Theory* 2006, 36(4): 61—66.]
- [85] 赵雪雁, 周健, 王录仓. 黑河流域产业结构与生态环境耦合关系辨识[J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(4): 69—73. [ZHAO Xueyan, ZHOU Jian, WANG Lucang. Quantitative research on the coupling relationships between industrial structure and eco-environment in the Heihe River Basin[J]. *China Population Resources and Environment* 2005, 15(4): 69—73.]
- [86] 崔步礼, 常学礼, 陈雅琳, 等. 山东半岛丘陵区典型流域影响河流径流的人文因素分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 115—117. [CUI Buli, CHANG Xueli, CHEN Yalin, et al. Analysis of influencing human factors on runoff of typical basin of hilly area in Shandong Peninsula[J]. *Research of Soil and Water Conservation* 2007, 14(3): 115—117.]
- [87] 周宾. 灰色关联分析法在淮河流域水环境质量综合评价中的应用[J]. *广州环境科学*, 2007, 22(3): 39—43. [ZHOU Bin. Application of gray correlation analysis in water quality assessment.

- ment of Huaihe Catchment area [J]. Guangzhou Environmental Sciences 2007 22(3): 39—43.]
- [88] 罗国富. 提高科技水平 综合治理汀江流域 [J]. 福建水土保持, 2003 15(1): 15—17. [LUO Guofu. Improve technology level comprehensive governing River basins [J]. Fujian Soil and Water Conservation 2003 15(1): 15—17.]
- [89] 王思远, 王光谦, 陈志祥. 黄河流域生态环境综合评价及其演变 [J]. 山地学报, 2004 22(2): 133—139. [WANG Siyuan, WANG Guangqian, CHEN Zhixiang. Eco-environmental evaluation and changes in Yellow River basin [J]. Journal of Mountain Research 2004 22(2): 133—139.]
- [90] 刘瑞民, 沈珍瑶. 大宁河流域生态环境综合评价及其演变 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2006 42(2): 200—203. [LIU Ruimin, SHEN Zhenyao. Integrated assessment and changes of ecological environment in Daining River watershed [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2006 42(2): 200—203.]
- [91] GUSTAVSON K R, STEPHEN C L, RUIENBEEK H J. Selection and modeling of sustainable development indicators: a case study of the Fraser River Basin, British Columbia [J]. Ecological Economics 1999 28: 117—132.
- [92] 王武科, 李同升, 徐冬平, 等. 基于 SD 模型的渭河流域关中地区水资源调度系统优化 [J]. 资源科学, 2007 30(7): 983—989. [WANG Wukuo, LITongsheng, XU Dongping et al. A system dynamics study of optimal decision making for water resource distribution in the Weihe River basin [J]. Resources Science 2007 30(7): 983—989.]
- [93] 王慧敏, 刘新仁, 徐立中. 流域可持续发展的系统动力学预警方法研究 [J]. 系统工程, 2001 19(3): 61—68. [WANG Huimin, LIU Renxin, XU Lichong. Study on early warning methods of system dynamics of river basin sustainable development [J]. Systems Engineering 2001 19(3): 61—68.]
- [94] 鲍超, 方创琳. 内陆河流域用水结构与产业结构双向优化仿真模型及应用 [J]. 中国沙漠, 2006 26(6): 1033—1040. [BAO Chao, FANG Chuanglin. Simulation model and application on mutual optimization of water utilization structure and industrial structure in inland river basins [J]. Journal of Desert Research 2006 26(6): 1033—1040.]
- [95] 方创琳, 步伟娜, 鲍超. 黑河流域水—生态—经济协调发展方案及用水效益 [J]. 生态学报, 2003 24(8): 1701—1709. [FANG Chuanglin, BU Weina, BAO Chao. Options of water—ecology—economy balanced development and water usage analysis in the Heihe Watershed [J]. Acta Ecologica Sinica 2003 24(8): 1701—1709.]
- [96] 李林红. 滇池流域可持续发展投入产出系统动力学模型 [J]. 系统工程理论与实践, 2002(8): 89—94. [LILinhong. The system dynamics model for the sustainable development of Dianchi Lake basin [J]. Systems Engineering—theory & Practice 2002(8): 89—94.]
- [97] 郭怀成, 徐云麟, 邹锐, 等. 不完备信息条件下流域环境系统规划方法研究 [J]. 环境科学学报, 1999 19(4): 421—426. [GUO Huaicheng, XU Yunlin, ZOU Rui et al. Study on the environmental system planning method for watershed under incom-
- plete information [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 1999 19(4): 421—426.]
- [98] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究 [J]. 地理研究, 2001 20(2): 191—198. [HUIYanhe, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang et al. On system dynamic simulation model of water resources bearing capacity in dual mode [J]. Geographical Research 2001 20(2): 191—198.]
- [99] HAMES Y Y. Hierarchical analysis of water resources systems modeling and optimization of large-scale system [M]. New York: McGraw Hill 1977: 1—10.
- [100] SINGH M G, TILIA A. System decomposition, optimization and control [M]. New York: Peram on Press 1978: 162—232.
- [101] GUPTA R A. River basin management: a case study of Narmada Valley development with special reference to the Sardar Project in Gujarat, India [J]. Water Resources Development 2001 17(1): 55—78.
- [102] ROSEGRANT W, RINGER C, MCKINNY D C et al. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo River Basin [J]. Agricultural Economics 2000 24(1): 33—46.
- [103] MCKINNY D C, CAIX M. Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method [J]. Environmental Modeling & Software 2002 17: 413—425.
- [104] KOK J L, KOFALK S, BERLEKAMP J et al. From design to application of a decision support system for integrated river basin management [J]. Water Resources Management 2008 23(9): 1781—1811.
- [105] BERLEKAMP J, LAUTENBACH S, GRAF N et al. A decision support system for integrated river management of the German Elbe [EB/OL]. <http://www.mssanz.org.au/modsim05/papers/berlekamp/Pdf/2009-1-20>
- [106] HAMALAINEN R, KETTUNEN E, EHTAMO H. Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management [J]. Group Decision and Negotiation 2001 10(4): 331—353.
- [107] XU Z X, ITO K, SCHULTZ G A et al. Integrated hydrologic modeling and GIS in water resources management [J]. Computing in Civil Engineering 2001 15(3): 217—223.
- [108] SHIM K C, FONTANELO ASCEN M et al. Spatial decision support system for integrated river basin flood control [EB/OL]. <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=JWRMD5000128000003000190000001&idtype=cvip&gifs=yes/2009-1-20>
- [109] 段学军. 流域可持续发展决策支持系统的建设及应用 [J]. 经济地理, 1999 19(6): 12—17. [DUAN Xuejun. The construction and application of the valley sustainable development decision support system [J]. Economic Geography 1999 19(6): 12—17.]
- [110] 沈珍瑶, 杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法 [J]. 自然资源学报, 2007 17(2): 187—197. [SHEN Zhenyao, YANG Zhifeng. Index system and method for assessing water resources renewability of the Yellow River Basin [J]. Jour-

nal of Natural Resources 2007, 17 (2): 187—197]

[111] 李玫, 石敏俊, 张翠芳, 等. 石羊河流域近 40 年来水资源供需格局演变 [J]. 干旱区地理, 2010 33 (4): 651—657. [LIMEI SHIMINJUN ZHANG Cui芳 et al. Evolution of water supply and demand in Shiyang River Basin over nearly 40 years [J]. Arid Land Geography 2010 33 (4): 651—657.]

[112] 赖发英, 魏雪娇, 卢年春, 等. 鄱阳湖流域生态足迹分析与可持续发展的定量研究 [J]. 农业现代化研究, 2006 27 (3): 206—209. [LAI Faying WEI Xuejiao LU Nianchun et al. Analysis of ecological footprints and research on sustainable development of Poyang Lake area [J]. Research of Agricultural Modernization 2006 27 (3): 206—209.]

[113] 王如松. 高效·和谐——城市生态调控原理与方法 [M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1988: 21—22. [WANG Rusong. Efficient harmonious principle and method of urban ecological control [M]. Changsha: Hunan education press, 1988: 21—22.]

Research progress on man—earth areal system in river basin

ZHANG Jié, LI Tong-sheng, ZHOU Du-hui

(1 School of Civil and Architecture Engineering Xi'an Technological University Xi'an 710032 Shaanxi China
2 Department of Urban and Resource Science Northwest University Xi'an 710127 Shaanxi China)

Abstract: With various resources developed by human beings in river basin and the conflict between human and land became increased, it is important to study on man—earth areal system in river basin. This paper reviewed the domestic and international research progress on the theories, ideas, methods and practices of the research of man—earth areal system in river basin. The author pointed out the weak side of this research field at present and prospected the main research directions in the future. These studies showed that it is general for international scholars to pay close attention to the research of planning and management of basin development. The main contents involve the origin, type, management objective, problems of planning and management of river basin development and which also caused Chinese scholars to concern watershed management. International scholars and domestic scholars also studied on the process simulation and scene analysis on the interaction of man—earth areal system in river basin, including historical analysis and dynamic monitoring, situational analysis of man—earth areal system in river basin. Meanwhile, the research on mechanism between human and land of man—earth areal system in river basin was developed, including basic theory of man—earth areal system in river basin, difference in different types of man—earth interaction in river basin. The quantitative analytical methods, such as principal component analysis, gray relational analysis, coordination model, comprehensive evaluation index model, system dynamics model, were generally adopted to appraise man—land relationship areal system in river basin. Geographic information system and decision support system have also been applied in the research on man—earth areal system in river basin. Although a series of theories related to the research on the man—earth areal system in river basin have emerged recently, there are a lot of weak points which should attract our attention. For example, theoretical studies and approach applications are still insufficient and the research system is still not formed. Current research is generally lack of the comprehensive study of the structure evolution, the studies on the coupling mechanism and model of the factors between nature and human, summarized principle researches, quantitative analysis, dynamic analysis and the process of simulation and prediction in different scenarios of man—earth relationship in river basin. The future research on man—earth areal system in river basin should strengthen the multi-disciplinary integration, the mechanism of interaction of man and earth in river basin, the enrichment of research approaches and the application of new technical method and the dynamic simulation.

Key Words: river basin; man—earth areal system; research progress; prospect