

DOI: 10.5846/stxb201804040768

徐昔保, 杨桂山, 江波. 湖泊湿地生态系统服务研究进展. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Xu X B, Yang G S, Jiang B. Progress in lake-wetland ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

湖泊湿地生态系统服务研究进展

徐昔保¹, 杨桂山^{1,*}, 江波²

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008

2 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051

摘要: 湖泊湿地生态系统服务可持续供给对维持区域、国家乃至全球生态安全格局具有重要意义。近 20 年, 国内外学者在生态系统服务内涵、评估模型、影响机制、权衡与优化等领域的研究不断深入, 但与管理决策和政策设计的结合仍面临多方面严峻挑战。系统分析湖泊湿地生态系统服务研究进展与存在的不足, 对于今后一段时间内湖泊湿地生态系统服务研究的全方位拓展具有重要指导意义。以湖泊湿地生态系统服务概念与内涵为切入点, 对湖泊湿地生态系统服务评估内容与方法、影响机理、生态系统服务权衡与优化等几个重要方面的研究进展进行了梳理, 并结合管理决策和政策设计的需求, 评述其研究中存在的不足。本研究以生态系统服务监测、模型不确定性、风险评估、优化与调控等四个重点研究方向为切入点, 对湖泊湿地生态系统服务的研究方向进行了展望, 以期深化湖泊湿地生态系统服务研究的理论与方法, 并实现其与管理决策和政策设计的高度结合。

关键词: 湖泊湿地; 生态系统服务; 影响机制; 权衡; 优化

Progress in lake-wetland ecosystem services

XU Xibao¹, YANG Guishan^{1,*}, JIANG Bo²

1 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China

Abstract: Lake-wetlands provide humans with a diversity of ecological benefits, which are of great importance in guaranteeing regional, national, and global ecological security. In recent decades, scientists have been testing a variety of methodologies for incorporating ecosystem services into lake-wetland management. The main challenge is to manage lake-wetlands in order to reduce the unwanted tradeoffs and maintain a sustainable supply of lake-wetland ecosystem services. Based on the analysis of lake-wetland ecosystem services concept and connotation, this paper reviews the important progresses on evaluating ecosystem services, identifying impact driving factors, and revealing trade-offs among ecosystem services. We found that there are several constraints limiting the incorporation of ecosystem services into management and policy design. In order to advance the ecosystem services research for lake-wetland management, we suggest that future research should focus on: (1) strengthening ecosystem services monitoring on lake-wetland ecosystem characteristics metrics and final ecosystem services in order to gather the necessary datasets for creating ecological production functions; (2) developing integrated models for upscaling analysis and model applicability and accuracy; (3) establishing ecological risk assessment and diagnostic models to identify high risk areas and high risk types, and formation conditions for the changes in lake-wetland ecosystem services; (4) integrating ecosystem services assessment models and traditional ecological process models, to explore the coordinated optimization roads and regulation strategies for lake-wetland ecosystem services. This study aims to intensify and enrich the theories and methods of lake-wetland ecosystem services, and contribute to the

基金项目: 中科院重点部署项目 (KFZD-SW-318); 国家自然科学基金 (41771571); 中科院南京地理与湖泊研究所前沿探索与基础性研究项目 (NIGLAS2016QY02)

收稿日期: 2018-04-04; **修订日期:** 2018-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gsyang@niglas.ac.cn

advanced integration of ecosystem services into management and policy design.

Key Words: lake-wetlands; ecosystem services; impact mechanism; trade-offs; optimization

生态系统服务是生态系统对福祉效益的直接或间接贡献,其可持续供给是影响区域、国家及全球可持续发展与生态安全的重要因素^[1-4]。自 2005 年联合国发布千年生态系统评估报告(Millennium Ecosystem Assessment, MA)后,生态系统服务研究取得了前所未有的快速发展。国际上先后发布并实施了一系列重大国际研究计划,如福利核算和生态系统服务价值评估(WAVES)全球伙伴关系^[5]、2020 生态系统及其服务状况制图与综合评估计划^[6]、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台^[7]等。2014 年开始实施的未来地球计划(Future Earth),将 IGBP 等全球变化研究计划逐步拓展到全球变化对生态系统服务的影响,明确提出要全面认识环境、经济、社会和政策变化下水—能源—粮食供给服务之间的相互作用机制,合理调控与优化多种生态系统服务之间的权衡关系,并将其融入到决策制定过程中^[8]。上述重大国际研究计划的实施,进一步提高了世界各国科学界对生态系统服务研究的关注,生态系统服务已逐渐成为地理学、生态学和环境科学等多学科交叉研究的前沿和热点^[9-11]。

随着生态系统服务研究的不断深入,生态系统服务从提高公众认知到理论框架不断完善及案例研究深入拓展,并逐步深化为管理决策和政策设计应用^[4-5,11]。全球湖泊湿地面积约 $7-10 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占全球陆地总面积的 5%—8%,与其他生态系统类型相比,湖泊湿地生态系统有着区别于其他生态系统类型的水文过程和生物地球化学循环过程,因此其提供的生态系统服务也从一定程度上区别于其他生态系统类型。主要体现在涉水的生态系统服务,包括水资源供给、水质净化、洪水调蓄、生物多样性维持、休闲娱乐等,在保障全球水生态安全格局中占有重要地位^[12-13]。据估算,湖泊湿地生态系统服务提供的价值占全球生态系统服务价值总量的 23.2%^[14]。湖泊湿地生态系统因其巨大的生态系统服务价值、保障区域/国家乃至全球生态安全的重要作用及其在社会经济快速发展下导致的不断退化和萎缩的趋势,已引起了各国政府及学者的高度关注^[14,15-16]。中国明确把“湿地面积不低于 8 亿亩”列为 2020 年生态文明建设的主要目标之一,并纳入国家“十三五”纲要。然而,受湖泊湿地生态系统的高度复杂性、特殊性 & 研究手段局限等多方面条件限制,湖泊湿地生态系统服务内涵,评估方法及其管理决策与政策设计等方面的研究和应用尚处在探索阶段。目前,尚未形成通用的湖泊湿地生态系统评估框架和方法体系,难以有效地服务于湖泊湿地生态系统管理决策与政策设计。本文以湖泊湿地生态系统服务概念与内涵为切入点,并结合管理决策和政策设计的需求,评述当前湖泊湿地生态系统服务研究中存在的不足,并对未来研究的重点方向进行了深入剖析和讨论,以期深化湖泊湿地生态系统服务研究的理论与方法,推动湖泊湿地生态系统服务由理论走向管理决策与政策设计,服务于国家生态文明建设等顶层设计和战略需求。

1 重要研究进展与不足

生态系统服务研究从概念提出到不断发展大体可划分为四个阶段:生态系统服务概念探讨(1997 年前)、生态系统服务分类体系建立与经济价值评估快速发展阶段(1997—2005 年)、分类体系/评估框架/评估方法逐步完善阶段(2005—2010 年)、权衡分析、供需耦合机制及与政策设计结合阶段(2010—至今)(表 1)。相比其他生态系统类型,湖泊湿地生态系统服务研究相对较为滞后,主要始于 2005 年联合国千年生态系统评估后开展价值评估与影响分析,2010 年前后进入热点研究阶段。当前,湖泊湿地生态系统服务研究主要集中在:土地利用变化对湖泊湿地生态系统服务的影响、模型在湖泊湿地生态系统服务评估的应用、湖泊湿地生态修复对生态系统服务的影响与评估等几个方面,而在模型开发、权衡分析、管理决策和设计等方面仍处在探索阶段。因湖泊湿地独特的水文特性和生物地球化学循环过程,现有模型大部分难以有效应用于评估湖泊湿地生态系统服务研究。此外,受监测数据和模型局限,大部分研究集中在湖泊湿地生态系统供给服务评价。总

结和回顾湖泊湿地生态系统服务近十多年取得主要进展与存在的不足如下。

表 1 生态系统服务研究阶段、研究内容与研究方法

时间 Time	研究阶段 Research period	研究内容 Research contents	研究方法 Research methods	湖泊湿地生态系统服务 研究 Lake-wetland ecosystem service research
1997 年前	生态系统服务概念提出	生态系统服务概念 探讨 ^[17-19]		
1997—2005 年	生态系统服务分类体系建 立与经济价值评估快速发 展阶段	以 Costanza 生态系统价值 评估为代表,以 MA 分类体 系为主导 ^[1-3] ;从点位—区 域—全球尺度上开展生态 系统服务价值评估	市场价值法、影子工程法、 旅行成本法、条件价值法、 效益转化法	
2005—2010 年	分类体系、评估框架、评估 方法逐步完善阶段	以 Wallace、Fisher et、 Haines-Young、Kumar 等 为 代表,开展生态系统服务分 类体系探讨 ^[20-23] ;多层次、 多角度开展生态系统服务 评建模及应用研究 ^[24-26]	InVEST、ARIES、SolVES、 EPM、EcoMetrix 等模型为 代表 ^[24-26]	初步开展湖泊湿地生态系 统服务评估的案例研究;以 野外调查、经济价值评估 为主 ^[27-29]
2010—至今	权衡分析、供需耦合机制及 与政策设计结合阶段	以定性分析为主判定生态 系统服务权衡关系,定量研 究相对较少 ^[30-31] ;生态系 统服务在土地利用规划、生 态补偿、生态功能区划、海 岸带管理、水资源管理、自 然资源损害评估等应用 ^[4]	统计方法、空间分析方法、 情景模拟方法和服务流动 性分析方法 ^[4,32]	湖泊湿地评估研究进入热 点研究阶段,开展价值与物 质量评估、动态变化与影响 机理分析;尝试利用 InVEST、SolVES 等模型开展 湖泊湿地生态系统服务权 衡分析 ^[33-35]

1.1 湖泊湿地生态系统服务内涵

湖泊湿地提供的生态系统服务,不仅涉及多尺度利益相关方,而且在特定的时空尺度具有不可替代性^[12,36],如最新研究表明湿地是陆地生态系统中硝酸盐削减效率最高的生态系统^[13]。随着公众和管理决策者对湖泊湿地生态系统服务功能重要性认识的不断提高,湖泊湿地生态保护已逐渐被提升到事关国家生态安全的理论高度,生态系统服务研究也已成为生态文明制度建设、生态系统管理与保护的重要技术手段。

生态系统服务自其概念提出到其与管理决策和政策设计结合,经历了几十年的发展历程。Daily、de Groot、Costanza 和 MA 等针对生态系统服务概念、内涵及分类体系进行了全面的分析和系统的探讨^[1-3,37]。MA 将生态系统服务划分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类,在全球范围内得到了广泛应用和推广^[3]。然而,MA 分类体系在生态系统服务的集成研究和系统评估等方面的应用存在较大局限性,究其原因 MA 体系混淆生态系统中间服务和最终服务,使得生态系统服务的精细评估和管理设计缺乏可靠的数据支撑^[38]。为推动生态系统服务由概念设计走向理论实践,Wallace、Fisher et、Haines-Young、Staub 等针对生态系统中间服务和最终服务的区分进行了深入的探讨^[21-23,27]。随着生态系统服务理论体系研究的不断深入,生态系统服务概念也进一步深化为:生态系统对人类效益的间接或直接贡献^[23,39]。EPA (Environmental Protection Agency) 基于此概念,提出了“环境→最终产品→直接/间接利用→生态系统服务直接利用者”的分析框架,并建立了 NESCS (National Ecosystem Services Classification System) 生态系统服务分类体系^[40],从理论上区分了中间服务和最终服务,为生态系统服务研究奠定了重要基础,促进了生态系统服务权衡与协同、生态系统服务形成机制、生态系统服务集成评估及政策设计等方面的进展。按照生态系统服务的最新进展,湖泊湿地生态系统服务大致可以分为 17—23 类,但具体分类体系因研究区域的生态特征和受益者偏好而具有较大差异。因此,在选择湖泊湿地生态系统服务分类与评估指标体系时,应根据研究区域的生态环境综合特征进行定制;同时为保障不同研究之间的横纵可比性,指标体系选择应在统一的分类体系框架下确定。

1.2 湖泊湿地生态系统服务评估

湖泊湿地生态系统开展生态系统服务评价是全球生态系统服务评价的重要组成部分^[3,41-42]。近 20 年,国际上对湖泊湿地生态系统服务评估开展了一系列案例进展。Schallenberg 等从供水、鱼类供给、水源净化、洪水控制、湖滨保护、气候调节、休闲娱乐等 12 类生态系统服务角度出发,对新西兰 8 个面积超过 100 km² 的湖泊进行了生态系统服务评价^[36]。2010 年,美国启动五大湖恢复计划(Great Lakes Restoration Initiative)对五大湖生态系统服务进行了系统评估,分析生态系统服务变化过程与驱动因素,通过投资超过 10 亿美元的众多管理及工程措施来改善五大湖地区生态系统服务,显著提高了五大湖水水质净化、水资源供给、生物多样性保护以及景观美学等重要生态系统服务^[16]。Steinman 等综合分析了美国五大湖的生态系统服务状态与未来趋势,讨论了五大湖生态系统服务定量评估面临的挑战及未来急需解决的问题^[43]。Reynaud & Lanzaova 利用元分析统计方法估算了全球 699 个湖泊生态系统服务价值的均值^[44];此外在加拿大、尼泊尔、埃塞俄比亚等国家也相继开展了湖泊湿地生态系统服务评估案例研究,主要集中在湖泊湿地生态系统服务价值评估、物质质量或功能评估^[45-47]。

在模型发展方面,基于遥感和 GIS 技术等为支撑的生态系统服务评估模型也得到了快速发展,出现了包括 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)、ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services)、SolVES (Social Values for Ecosystem Services)、MIMES (Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services)、EPM (Ecosystem Portfolio Model)、ESR (Ecosystem Services Review)、EcoMetrix、Benefit Transfer and Use Estimating Model Toolkit 等 20 多个模型^[24-26]。受湖泊湿地生态系统高度复杂性、模型结构及适用性等制约,上述大多数模型在湖泊湿地生态系统服务评估中的应用刚处于起步阶段。目前 InVEST 模型在湖泊湿地生态系统服务评估中进行了一些尝试,主要用于模拟评估水资源供给、生物多样性维持、水质净化等生态系统服务。InVEST 模型具有使用简便、数据易获取等优点,但因模型采用简化的水文模型,不能准确模拟具有高频变化特征的水情变化及其对生态系统服务的影响,其模拟结果相对传统的水文和水质模型存在较大的不确定性^[48-49]。

近年来,国内学者也开展了一系列湖泊生态系统服务评估案例研究,主要采用以下 4 种方法:1)列举湖泊生态系统提供的所有服务(包括中间服务和最终服务),选取相应的生态属性指标或效益指标,基于生态监测、野外调查^[50-51]和问卷调查^[52-54]等方法,评估湖泊生态系统服务价值量或物质量;2)以土地利用/土地覆盖为替代数据,直接采用效益转化法评估湖泊生态系统服务价值评估^[55-57];3)利用长序列的古湖沼学记录数据分析湖泊生态系统服务变化特征^[58-59];4)基于生态系统服务评估模型(如 InVEST, SolVES),模拟评估湖泊湿地生态系统服务物质量和价值量^[60-62]。

1.3 湖泊湿地生态系统服务影响机制

湖泊湿地通常是一个开放、连续的生态系统,受自然过程和人类活动的干扰与干预,湖泊湿地生态系统服务呈现高度复杂性、高频时空变化和高耦合关联等特征,而水情是气候变化与人类活动作用于湖泊湿地生态系统服务过程中最为重要的过程变量。气候变化通常会导致洪旱灾害的频繁发生,气候因子可改变降水量、气温、蒸散等时空分布格局,进而使得水文情势产生显著变化^[63]。随着社会经济的快速发展,人类活动干预在不断加强,诱发湖泊湿地生态系统的一系列问题,如大型水利工程的建设显著地影响湖泊水情,对湖泊湿地生态系统带来正负双重效应,使湖泊生态系统趋于更加不稳定状态^[64]。湖区及流域城镇扩展、工业及旅游业发展等,加剧了对淡水资源供给需求和入湖污染物排放,进而对湖泊湿地生态系统的生态系统服务产生负面影响。Smith 等利用专家咨询与问卷调查法,分析了入湖污染物、入侵外来物种、水文及气候条件变化、栖息地改变、水资源供给能力、湖泊富营养化以及水利工程设施干扰等 50 多个胁迫因子对美国五大湖区供水、生物多样性保护、景观美学等重要生态服务功能的胁迫影响机理^[65]。Ricaurte 等利用空间统计、矩阵法和公众参与式制图法识别影响哥伦比亚湿地未来变化的最重要驱动因子为土地利用变化、水资源需求和水污染^[66]。现有的生态系统服务影响机制分析主要采用定性或半定量的统计分析为主,采用模型模拟方法较少涉及。

近年来全球变化导致极端气候事件频发的背景下,控湖工程对湖泊水位波动的影响加强,湖泊长期形成的动态平衡水位波动模式与湿地水文需求关系被打破,大多数湖泊生态系统已经发生了显著变化,湖区水源供给、环境净化、生物多样性等多种生态系统服务在水利工程的影响下呈现出明显的退化迹象^[67-68]。众多案例研究表明,无水利工程控制的湖泊在其各个水深梯度均可以支撑结构更多样的植物群落,而被控河湖水系因水位波动的减小而生物多样性降低,洲滩湿地生态系统物种构成向单一化均匀化发展^[29,69-70]。此外,控湖工程下湖泊水情的改变,还导致湖泊悬浮物负荷、水动力、水环境等产生动态变化,进而使得湖泊水质状况面临更为严峻的考验^[71]。

1.4 湖泊湿地生态系统服务权衡与优化

生态系统服务由于类型多样性、空间非均衡性、人类使用选择性等特点,多种生态系统服务之间存在显著的权衡与协同等关系形式^[10,30,72]。理解与掌握生态系统服务权衡与协同关系,是对多种生态系统服务实行保护、优化与可持续利用的前提,有利于制定区域发展与生态保护“双赢”的政策措施,有利于明确生态管理决策的最优和次优空间^[4,31-32]。生态系统服务权衡研究方法总体可分为统计方法、空间分析方法、情景模拟方法和服务流动性分析方法^[4,73]。目前生态系统服务权衡分析研究主要以定性分析为主,主要通过空间制图与地统计分析方法,判定生态系统服务权衡或协同关系^[30],量化研究相对较少^[31]。

目前,针对湖泊湿地的生态系统服务权衡与优化研究处于刚起步阶段,相关研究较少涉及。Jessop 等通过野外采样,利用主成分分析和冗余分析等方法解析湿地养分循环、草本生物量、土壤有机质含量、地表水储存潜力和生物多样性维持等多种生态系统服务之间的权衡关系^[33];Li 等结合 InVEST 模型和农户调查法,分析了南水北调中线水源地多种生态系统服务权衡关系,揭示了生态系统服务四个尺度利益相关者(移民安置农户、当地政府、下游水资源用户和全球受益者)的权衡关系^[34];Yang 等利用 InVEST 模型评估了黄河三角洲滨海湿地生境质量、固碳和物质生产之间权衡与协同关系,揭示了围垦对多种生态系统服务之间关系的影响^[35]。

1.5 研究不足

(1)没有形成通用的湖泊湿地生态系统服务评估框架和方法体系。目前,大多数研究在开展生态系统服务估算与指标选择过程中,混淆湖泊湿地生态过程、功能和最终服务,导致湖泊生态系统服务价值重复计算,评估结果可信度不高^[38];评价指标和评估方法多样化,评估结果横向可比性较差,尺度推绎不确定性较大;生态系统服务评估模型应用往往缺乏有效验证与参数区域化,且大多数模型主要针对供给服务和调节服务(如淡水供给、水源涵养、水土保持、固碳、水质净化等),而对文化服务和支撑服务的模拟功能相对缺乏,导致模拟指标存在一定的片面性,模型估算结果也存在较大的不确定性。

(2)多因素叠加的定量分析与甄别不够深入。受湖泊湿地生态系统服务的高度复杂性、多样性等特征、生态系统服务长期监测数据缺乏以及现有生态过程模型的局限性等制约,定量甄别湖泊湿地生态系统服务变化驱动因素及影响程度仍是目前研究的难点和重点^[36,43,71]。尤其是针对大型洪泛型湖泊湿地,如何定量识别与区分大型水利工程、气候变化、土地利用变化等多重叠加因素对湖泊湿地生态系统服务变化的影响机制仍较为困难,是湖泊湿地生态系统服务研究亟待解决的科学问题之一。此外,绝大数研究都忽视湖泊湿地生态系统服务供给和需求的时空异质性与空间流转,不利于揭示利益相关方与生态系统服务在不同尺度上的影响机制。

(3)湖泊湿地多种生态系统服务权衡与优化研究较少涉及。目前,针对湖泊湿地生态系统服务权衡研究方法主要采用常规的野外监测与采样、地统计分析、价值化半定量评估和 InVEST 模型,仍以定性分析与半定量分析为主,量化分析方法相对较少。此外,研究内容上主要集中在湖泊湿地多种生态系统服务权衡与协同关系的诊断与空间识别方面,而对多种生态系统服务之间的相互作用机制与协同优化路径研究鲜有涉及。

2 未来研究重点

2.1 湖泊湿地生态系统服务监测

目前,基于湖泊湿地野外观测平台与基地,已经开展了一系列针对湖泊湿地生态系统结构与组分(面积、

种类、物种数量、水生生物、生境类型)、水环境(总氮、总磷、藻类)、土壤、水文情势(水位、水量、泥沙含量)、浮游植物初级生产力、鸟类等监测^[12,74-75]。现有的野外监测侧重于湖泊湿地生态系统结构、状态、过程及时空变化等方面,为湖泊湿地生态系统服务评估提供了基础数据和过程机理认识^[76-77]。但现有的常规监测指标多为表征湖泊湿地生态系统的特征指标,无法直接测度湖泊湿地生态系统服务,因为不能有效满足生态系统服务评估、权衡分析和管理决策的需求,无法满足模型率定与验证需求,在很多区域甚至缺乏常规监测。因此,在结合湖泊水位、淹没出露面积、流速、换水周期等水情要素和水质等常规监测指标外,根据湖泊湿地生态系统的特征及其特殊性,选取与人类活动和管理措施直接关联、比较重要且比较敏感的生态系统服务关键表征指标,如污染物降解能力、温室气体排放通量、渔获物、生物量、洪峰削减量、淡水供给量、珍稀鸟类数量等,为生态系统服务评估模型提供关键参数与率定所需的观测数据,同时有助于进一步深化认识湖泊湿地生态系统服务的形成与影响机理。

2.2 模型评估不确定性

生态系统服务评估模型能较直观的刻画生态系统服务时空变化和空间流动移特征,识别生态系统服务时空权衡关系、生态系统服务热点区和重点保护区域,直接为生态系统服务管理和政策设计提供科学依据^[78-79]。模型评估的不确定性主要包括四个方面:1)受生态系统类型多样性及生态系统服务的高度复杂性等因素影响,生态系统服务形成与变化的机理认识仍有待完善;2)在模型设计与开发过程中往往需要对模型结构进行简化,导致模型自身均存在一定的不确定性;3)针对典型生态系统服务的长期定位观测的缺乏,导致生态系统服务评估模型中的部分关键参数很难实测获取或通过率定实现模型参数区域化,使得模型评估存在较大的不确定性;4)现有的生态系统服务评估模型大多只能模拟单一或有限几类生态系统服务,进行生态系统服务综合评估通常需要运用多个生态系统服务评估模型,多个模型之间往往缺乏对多类生态系统服务之间相互作用机制的表达或耦合集成,导致其评估结果也存在一定的不确定性。因此,在未来需加强野外监测和控制实验,提高对湖泊湿地生态系统服务形成及影响机制的认识,进一步优化模型结构。同时,加强生态系统服务的尺度效应与相互作用机制研究,从模拟对象、模型结构、关键参数、模拟方法、适用尺度等多维度对现有的各类模型及模型组合进行敏感性与不确定性,综合比较生态系统服务评估模型的性能与适用性,选择或建立符合区域实际及决策需求的生态系统服务评估模型,提高模型的综合集成模拟能力、精度与可靠性。

2.3 生态系统服务变化风险评估

US EPA 于 1990 年首次提出生态风险概念,并分别于 1992 年和 1998 年颁布了《生态风险评价框架》和《生态风险评价指南》,提出了“明确问题、分析暴露和效应、风险表征”3 步骤的 ERA 评价方法^[80]。近 20 年来,生态风险评估在评价内容、范围、尺度等方面都有了很大进展。由单一化学污染物、单一受体发展到多风险源、多风险评价终点,风险源范围也从化学污染、生态事件等开始扩展到人类活动的影响(如城市化、生活和工业废弃物、LUCC、渔业、气候变化等),已广泛应用于水环境评价^[81]、区域和综合生态风险^[82]、生态系统服务管理和政策^[83]。现有对湖泊湿地生态系统服务研究更多地关注物质量和价值量的评估,对多种因素干扰或胁迫下湖泊湿地生态系统服务变化可能存在的长期或系统风险的研究鲜有涉及,导致生态系统服务变化的风险预警与调控可操作很差^[84-85]。基于生态风险评估的内涵,引入生态系统突变的理论与方法,结合长时间序列的监测数据或模型模拟,诊断生态系统服务发生突变的类型及临界点,构建湖泊湿地生态系统服务变化风险评价体系与诊断模型,识别生态系统服务变化的高风险区、高风险类型及形成条件,将是湖泊湿地生态系统服务未来研究的重要内容之一,有助于真正将生态系统服务评估全面融入到湖泊湿地生态系统管理、生态风险预警与决策过程中。

2.4 湖泊湿地生态系统服务优化与调控

生态系统服务优化与调控是生态系统服务在生态系统管理与政策设计中的典型应用,是生态系统服务研究的最终目标。重点开展以下 3 个方面的研究:1)基于生态系统服务时空变化模拟,开展湖泊湿地生态系统服务权衡分析,揭示湖泊湿地多种生态系统服务之间的权衡协同关系、类型、相互作用机制及尺度效应,建立

湖泊湿地生态系统服务协同提升与优化的理论与原理。2)解析案例区自然—社会—经济—生态的综合背景特征,评估各类利益相关主体的不同需求,根据需求导向设置典型水文年不同水文季节、不同生态系统服务的多目标优化情景,建立满足特定需求的生态系统服务优化提升规则与调控模型。3)集成生态系统服务评估模型和传统的生态过程模型(如水文水质模型、生物多样性随机森林模型、温室气体排放模型等),综合模拟评估大型水利工程建设、气候变化、湖区综合整治、水库群优化联合调度、土地利用变化等对湖泊湿地生态系统服务受损/增益效应,探索湖泊湿地生态系统服务协同提升路径与调控对策。建立通用的湖泊湿地生态系统评估框架和方法体系,推动湖泊湿地生态系统服务从理论研究提升到湖泊湿地生态系统管理、水利工程建设效应评估与水库群联合优化调度等实践中,将是当前及未来湖泊湿地生态系统服务研究的最核心内容与趋势。

3 结论

开展湖泊湿地生态系统服务研究能揭示湖泊湿地生态系统服务的时空权衡关系及生态系统服务空间流动和转移特征,识别生态系统服务变化驱动因子,为湖泊湿地生态系统服务优化管理提供基础。近 20 年,国内外学者在生态系统服务内涵、评估模型、影响机制、权衡分析与优化等领域的研究不断深入,但湖泊湿地生态系统服务研究相对较为滞后,且在以下几个方面存在较大不足:没有形成通用的湖泊湿地生态系统服务评估框架和方法体系、多因素叠加的定量分析与甄别不够深入、多种生态系统服务权衡与优化研究较少涉及。针对湖泊湿地生态系统服务研究的科学问题及其与管理决策和政策设计结合的现实需求,应加强以下四个方面的重点研究:1)加强湖泊湿地生态系统服务关键表征指标监测,深化认识湖泊湿地生态系统服务的形成与影响机理;2)加强生态系统服务的尺度效应与相互作用机制研究,优化模型结构,提高模型的综合集成模拟能力与精度;3)构建湖泊湿地生态系统服务变化风险评价体系与诊断模型,识别生态系统服务变化的高风险区、高风险类型及形成条件;4)集成生态系统服务评估模型和传统的生态过程模型,探讨湖泊湿地生态系统服务协同提升路径与调控对策。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Guerry A D, Polasky S, Lubchenco J, Chaplin-Kramer R, Daily G C, Griffin R, Ruckelshaus M, Bateman I J, Duraipappah A, Elmqvist T, Feldman M W, Folke C, Hoekstra J, Kareiva P M, Keeler B L, Li S Z, McKenzie E, Ouyang Z Y, Reyers B, Ricketts T H, Rockström J, Tallis H, Vira B. Natural capital and ecosystem services informing decisions: from promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7348-7355.
- [5] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemen L, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [6] Maes J, Hauck J, Paracchini M L, Ratajki O, Hutchins M, Termansen M, Furman E, Pérez-Soba M, Braat L, Bidoglio G. Mainstreaming ecosystem services into EU policy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 128-134.
- [7] Brand U, Vadrot A. Epistemic selectivities and the valorisation of nature: the cases of the Nagoya protocol and the intergovernmental science-policy platform for biodiversity and ecosystem services (IPBES). *Law, Environment and Development Journal*, 2013, 9: 202.
- [8] Future Earth. *Future Earth Strategic Research Agenda 2014*. Paris: International Council for Science, 2014.
- [9] Perrings C, Naeem S, Ahrestani F, Bunker D E, Burkill P, Canziani G, Elmqvist T, Ferrati R, Fuhrman J, Jaksic F, Kawabata Z, Kinzig A, Mace G M, Milano F, Mooney H, Prieur-Richard A H, Tschirhart J, Weisser W. Ecosystem services for 2020. *Science*, 2010, 330(6002): 323-324.
- [10] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [11] Costanza R, de Groot R, Braat Leon, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far

- have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [12] Mitsch W J, Gosselink J G. *Wetlands*. 5th ed. New York: Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [13] Hansen A T, Dolph C L, Foufoula-Georgiou E, Finlay J C. Contribution of wetlands to nitrate removal at the watershed scale. *Nature Geoscience*, 2018, 11(2): 127-132.
- [14] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [15] Niu Z G, Zhang H Y, Gong P. More protection for China's wetlands. *Nature*, 2011, 471(7338): 305-305.
- [16] Great Lakes Restoration Initiative Task Force. Great Lakes Restoration Initiative Action Plan II Measures Reporting Plan, 2017. <https://www.glri.us/sites/default/files/glri-measures-reporting-plan-20170926-156pp.pdf>.
- [17] Study of Critical Environmental Problems (SCEP). *Man's Impact on the Global Environment*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1970.
- [18] Ehrlich P R, Ehrlich A H. *Extinction: the Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. New York: Random House, 1981.
- [19] Schulze E D, Mooney H A. *Biodiversity and Ecosystem Function*. Berlin: Springer Verlag, 1993: 237-253.
- [20] Wallace K J. Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 235-246.
- [21] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [22] Haines-Young R, Potschin M. Proposal for a Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES) for Integrated Environmental and Economic Accounting. (2010-03-21). <http://www.nottingham.ac.uk/cem/pdf/UNCEEAA-5-7-Bk1.pdf>.
- [23] Kumar P. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London: Earthscan, 2010.
- [24] Bagstad K J, Villa F, Johnson G W, Voigt B. *ARIES - Artificial Intelligence for Ecosystem Services: A Guide to Models and Data, Version 1.0*. Bilbao: The ARIES Consortium, 2011.
- [25] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, Winthrop R. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [26] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [27] Staub C, Ott W, Heusi F, Klingler G, Jenny A, Häcki M, Hauser A. Indicators for Ecosystem Goods and Services: Framework, Methodology and Recommendations for a Welfare-Related Environmental Reporting. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental Studies No. 1102: 17S.
- [28] Sophocleous M. Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, 2004, 13(2): 61-75.
- [29] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 336-360.
- [30] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Interactions among ecosystem services across Europe: bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [31] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [32] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [33] Jessop J, Spyreas G, Pociask G E, Benson T J, Ward M P, Kent A D, Matthews J W. Tradeoffs among ecosystem services in restored wetlands. *Biological Conservation*, 2015, 191: 341-348.
- [34] Li C, Zheng H, Li S Z, Chen X S, Li J, Zeng W H, Liang Y C, Polasky S, Feldman M W, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Impacts of conservation and human development policy across stakeholders and scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(24): 7396-7401.
- [35] Yang W, Jin Y W, Sun T, Yang Z F, Cai Y P, Yi Y J. Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 354-366.
- [36] Schallenberg M, de Winton M D, Verburg P, Kelly D J, Hamill K D, Hamilton D P. Ecosystem services of lakes//Dymond J R, ed. *Ecosystem Services in New Zealand—Conditions and Trends*. Lincoln: Manaaki Whenua Press, 2013: 203-225.
- [37] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [38] Fu B J, Su C H, Wei Y P, Willett I R, Lü Y H, Liu G H. Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures. *Ecological Research*, 2011, 26(1): 1-14.
- [39] United States Environmental Protection Agency (US EPA). *Valuing the Protection of Ecological Systems and Services*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2009.
- [40] United States Environmental Protection Agency (US EPA). *National Ecosystem Services Classification System (NESCO): Framework Design and Policy Application*. EPA-800-R-15-002, Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2015.

- [41] La Notte A, Liqueste C, Grizzetti B, Maes J, Egoh B N, Paracchini M L. An ecological-economic approach to the valuation of ecosystem services to support biodiversity policy: a case study for nitrogen retention by Mediterranean rivers and lakes. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 292-302.
- [42] Angradi T R, Launsbach J J, Bolgrien D W, Bellinger B J, Starry M A, Hoffman J C, Trebitz A S, Sierszen M E, Hollenhorst T P. Mapping ecosystem service indicators in a Great Lakes estuarine Area of Concern. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, 42(3): 717-727.
- [43] Steinman A D, Cardinale B J, Munns W R Jr, Ogdahl M E, Allan J D, Angradi T, Bartlett S, Brauman K, Byappanahalli M, Doss M, Dupont D, Johns A, Kashian D, Lupi F, McIntyre P, Miller T, Moore M, Muenich R L, Poudel R, Price J, Provencher B, Rea A, Read J, Renzetti S, Sohngen B, Washburn E. Ecosystem services in the Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(3): 161-168.
- [44] Reynaud A, Lanzaova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecological Economics*, 2017, 137: 184-194.
- [45] Sharma B, Rasul G, Chettri N. The economic value of wetland ecosystem services: evidence from the Koshi Tappu Wildlife Reserve, Nepal. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 84-93.
- [46] Greenland-Smith S, Brazner J, Sherren K. Farmer perceptions of wetlands and waterbodies: using social metrics as an alternative to ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 2016, 126: 58-69.
- [47] Wondie A. Ecological conditions and ecosystem services of wetlands in the Lake Tana Area, Ethiopia. *Ecology & Hydrobiology*, 2018, 18(2): 231-244.
- [48] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2403-2409.
- [49] Hallouin T, Bruen M, Christie M, Bullock C, Kelly-Quinn M. Challenges in using hydrology and water quality models for assessing freshwater ecosystem services: a review. *Geosciences*, 2018, 8(2): 45.
- [50] 李景保, 代勇, 殷日新, 杨燕, 李玉丹, 王克英. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 809-817.
- [51] 崔丽娟, 庞丙亮, 李伟, 马牧源, 孙宝娣, 张亚琼. 扎龙湿地生态系统服务价值评价. *生态学报*, 2016, 36(3): 828-836.
- [52] 贺娟, 舒晓波, 于秀波. 鄱阳湖区农户对湿地生态系统服务认知的调查与分析. *资源科学*, 2010, 32(4): 776-781.
- [53] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 赵娟娟, 欧阳志云. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估. *生态学报*, 2017, 37(8): 2497-2505.
- [54] Sun C Z, Zhen L, Miah M G. Comparison of the ecosystem services provided by China's Poyang Lake wetland and Bangladesh's Tanguar Haor wetland. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 411-421.
- [55] Li X W, Yu X B, Jiang L G, Li W Y, Liu Y, Hou X Y. How important are the wetlands in the middle-lower Yangtze River region: an ecosystem service valuation approach. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 54-60.
- [56] 李哲, 张飞, Kung H T, 张月, 井云清. 1998-2014 年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异. *生态学报*, 2017, 37(15): 4984-4997.
- [57] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. *生态学报*, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [58] Dearing J A, Yang X D, Dong X H, Zhang E L, Chen X, Langdon P G, Zhang K, Zhang W G, Dawson T P. Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the lower Yangtze basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(18): E1111-E1120.
- [59] Xu M, Dong X H, Yang X D, Wang R, Zhang K, Zhao Y J, Davidson T A, Jeppesen E. Using palaeolimnological data and historical records to assess long-term dynamics of ecosystem services in typical Yangtze shallow lakes (China). *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 791-802.
- [60] 孙传淳, 甄霖, 王超, 胡洁, 杜秉贞. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖湿地生物多样性情景分析. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1119-1125.
- [61] 周方文, 马田田, 李晓文, 崔保山. 黄河三角洲滨海湿地生态系统服务模拟及评估. *湿地科学*, 2015, 13(6): 667-674.
- [62] 马桥, 刘康, 高艳, 李影, 范亚宁, 古超. 基于 SolVES 模型的西安浐灞国家湿地公园生态系统服务社会价值评估. *湿地科学*, 2018, 16(1): 51-58.
- [63] Su X L, Zeng B, Huang W J, Xu S J, Lei S T. Effects of the Three Gorges Dam on preupland and riparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P.R. China. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 123-127.
- [64] Yang G S, Zhang Q, Wan R R, Lai X J, Jiang X, Li L, Dai H C, Lei G C, Chen J C, Lu Y J. Lake hydrology, water quality and ecology impacts of altered river-lake interactions: advances in research on the middle Yangtze river. *Hydrology Research*, 2016, 47(S1): 1-7.
- [65] Smith S D P, McIntyre P B, Halpern B S, Cooke R M, Marino A L, Boyer G L, Buchsbaum A, Burton G A Jr, Campbell L M, Ciborowski J J H, Doran P J, Infante D M, Johnson L B, Read J G, Rose J B, Rutherford E S, Steinman A D, Allan J D. Rating impacts in a multi-stressor world: a quantitative assessment of 50 stressors affecting the Great Lakes. *Ecological Applications*, 2015, 25(3): 717-728.
- [66] Ricaurte L F, Olaya-Rodríguez M H, Cepeda-Valencia J, Lara D, Arroyave-Suárez J, Finlayson C M, Palomo I. Future impacts of drivers of

- change on wetland ecosystem services in Colombia. *Global Environmental Change*, 2017, 44: 158-169.
- [67] Watson RT and the Core Writing Team. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, C/O World Meteorological Organization, 2001.
- [68] Fang J Y, Wang Z H, Zhao S Q, Li Y K, Tang Z Y, Yu D, Ni L Y, Liu H Z, Xie P, Da L J, Li Z Q, Zheng C Y. Biodiversity changes in the Lakes of the central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 369-377.
- [69] Coops H, Hosper S H. Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands. *Lake and Reservoir Management*, 2002, 18(4): 293-298.
- [70] Riis T, Hawes I. Relationships between water level fluctuations and vegetation diversity in shallow water of New Zealand lakes. *Aquatic Botany*, 2002, 74(2): 133-148.
- [71] Nowicki C J, Bunnell D B, Armenio P M, Warner D M, Vanderploeg H A, Cavaletto J F, Mayer C M, Adams J V. Biotic and abiotic factors influencing zooplankton vertical distribution in Lake Huron. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, 43(6): 1044-1054.
- [72] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, DeFries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipapp A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [73] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259.
- [74] Ma R H, Duan H T, Hu C M, Feng X Z, Li A N, Ju W M, Jiang J H, Yang G S. A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): L24106.
- [75] Wang Y Y, Jia Y F, Guan L, Lu C, Lei G C, Wen L, Liu G H. Optimising hydrological conditions to sustain wintering waterbird populations in Poyang Lake National Natural Reserve: implications for dam operations. *Freshwater Biology*, 2013, 58(11): 2366-2379.
- [76] Lavorel S, Grigulis K, Lamarque P, Colace M P, Garden D, Girel J, Pellet G, Douzet R. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 135-147.
- [77] Layke C. *Measuring Nature's Benefits: A Preliminary Roadmap for Improving Ecosystem Service Indicators*. Washington, DC: World Resources Institute, 2009.
- [78] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D R, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [79] Scarlett L, Boyd J. Ecosystem services and resource management: institutional issues, challenges, and opportunities in the public sector. *Ecological Economics*, 2015, 115: 3-10.
- [80] United States Environmental Protection Agency (US EPA). *Guidelines for Ecological risk Assessment*. EPA/630/R-95/002F, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [81] de França Doria M, Pidgeon N, Hunter P R. Perceptions of drinking water quality and risk and its effect on behaviour: a cross-national study. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(21): 5455-5464.
- [82] Cormier S M, Smith M, Norton S, Neihsel T. Assessing ecological risk in watersheds: a case study of problem formulation in the Big Darby Creek watershed, Ohio, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(4): 1082-1096.
- [83] Deacon S, Norman S, Nicolette J, Reub G, Greene G, Osborn R, Andrews P. Integrating ecosystem services into risk management decisions: case study with Spanish citrus and the insecticide chlorpyrifos. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 732-739.
- [84] Larsen S, Alp M. Ecological thresholds and riparian wetlands: an overview for environmental managers. *Limnology*, 2015, 16(1): 1-9.
- [85] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.