

# 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响综述

吴玉琴<sup>1,2,3</sup>, 李玉凤<sup>4</sup>, 刘红玉<sup>4</sup>, 王娟<sup>1,2,3</sup>, 王刚<sup>1,2,3</sup>, 郭紫茹<sup>1,2,3</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 江苏 南京 210023)

(3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(4. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 通过半定量研究相关文献, 分析水文连通度对湿地生态系统单一或综合服务功能的影响, 研究结果表明: (1) 目前水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的结果具有多样性, 其中大部分结果反映了水文连通度增强会对湿地生态系统服务功能产生积极影响; (2) 水文连通度对湿地生态系统单一服务功能影响的文献较多, 且更侧重于直接影响的研究, 而对湿地生态系统综合服务功能的影响机理进行系统阐述的文献较少; (3) 基于目前研究进展及趋势, 今后应加强水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的研究, 并从驱动机理上认识水文连通度对湿地生态系统服务功能的影响。

**[关键词]** 水文连通度, 生态系统服务功能, 景观, 生物多样性, 研究进展

**[中图分类号]** K903 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)01-0057-09

## The Impact of Hydrological Connectivity on Wetland Ecosystem Service Function: Current Progresses and Research Gaps

Wu Yuqin<sup>1,2,3</sup>, Li Yufeng<sup>4</sup>, Liu Hongyu<sup>4</sup>, Wang Juan<sup>1,2,3</sup>, Wang Gang<sup>1,2,3</sup>, Guo Ziru<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

(3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(4. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Semi-quantitative reviews of the literature are performed that hydrological connectivity affects the single or multiple wetland ecosystem services. The research results indicate: (1) Hydrological connectivity shows a multiple effect on wetland ecosystem service, but most of the effectivity is the positive. (2) Most of the researches focus on the single impacts about hydrological connectivity on ecosystem service. Little researches pay attention on the multi-factor functioning of hydrological connectivity impacting on ecosystem service. (3) Based on the current research reviews, more studies will fill the gaps in the impact of hydrological connectivity on ecosystem service from the process. And, it is necessary to understand the influence of hydrological connectivity on wetland ecosystem service function from the driving mechanism.

**Key words:** hydrologic connectivity, ecosystem service, landscape, biodiversity, research progress

水作为湿地生态系统的重要组分, 主导物质循环、能量流动和生物迁移等生态过程, 因此水文连通度对维持湿地生态系统结构和功能的稳定性具有重要作用<sup>[1]</sup>。由于自然及人为因素的干扰, 湿地出现严重萎缩和破碎化现象, 水文连通度发生明显变化, 湿地生态系统的原有结构和功能受到了干扰, 生态系统质量不断下降, 湿地生态系统服务功能也严重受损<sup>[2-3]</sup>。水文连通度变化引起的一系列生态和环境问题已引起全球的广泛重视, 2015 年拉姆萨尔秘书处的研究重点之一即是包括湿地连通的跨流域水系评估<sup>[4-5]</sup>。对水文连通度与生态系统服务功能的研究有助于分析湿地生态系统的退化机制, 提出针对性的修

收稿日期: 2018-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871188、31570459、41401205)、江苏省自然科学基金项目(BK20140921、15KJA170002)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)、江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心资助项目。

通讯作者: 李玉凤, 副教授, 研究方向: 湿地生态评价与 GIS 应用. E-mail: pandalee\_0826@163.com

- ecology[J]. Ecology Letters,2010,7(7):601-613.
- [67] LOREAU M,MOUQUET N,GONZALEZ A. Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2003,100(22):12765-12770.
- [68] YANG F,HE D H. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics,2003,34(2):487-515.
- [69] RD C F,ZAVALITA E S,EVINER V T,et al. Consequences of changing biodiversity[J]. Bioscience,1998,48(6783):234-242.
- [70] BALVANERA P,PFISTERER A B,BUCHMANN N,et al. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services[J]. Ecology Letters,2010,9(10):1146-1156.
- [71] SHI L,WANG Y,JIA Y,et al. Vegetation cover dynamics and resilience to climatic and hydrological disturbances in seasonal floodplain:the effects of hydrological connectivity[J]. Frontiers in Plant Science,2017,8(2196):1-11.
- [72] CHI S,LI M,ZHENG J,et al. Macroinvertebrate communities in the Big East Lake water network in relation to environmental factors[J]. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems,2017,418(22):1-14.
- [73] VON F S,DMITROVIĆ D,PEŠIĆ V. The influence of flooding and river connectivity on macroinvertebrate assemblages in rheocene springs along a third-order river[J]. Fundamental & Applied Limnology,2017,190(3):251-263.
- [74] REN P,HE H,SONG Y,et al. The spatial pattern of larval fish assemblages in the lower reach of the Yangtze River:potential influences of river-lake connectivity and tidal intrusion[J]. Hydrobiologia,2016,766(1):365-379.
- [75] DOU P,CUI B,XIE T,et al. Macrobenthos diversity response to hydrological connectivity gradient[J]. Wetlands,2016,36(1):45-55.
- [76] OBOLEWSKI K,GLIŃSKA L K,STRZELCZAK A. Does hydrological connectivity determine the benthic macroinvertebrate structure in oxbow lakes? [J]. Ecohydrology,2016,8(8):1488-1502.
- [77] PAILLEX A,CASTELLA E,ERMIGASSEN P S E Z,et al. Testing predictions of changes in alien and native macroinvertebrate communities and their interaction after the restoration of a large river floodplain( French Rhône) [J]. Freshwater Biology,2015,60(6):1162-1175.
- [78] 曹祺文,卫晓梅,吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. 生态学杂志,2016,35(11):3102-3111.
- [79] 勾蒙蒙. 亚热带次生林生态系统服务权衡与协同分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
- [80] 沈洁. 上海浦东新区城市化进程对水系结构、连通性及其调蓄能力的影响研究[D]. 上海:华东师范大学,2015.
- [81] BÉLISLE M. Measuring landscape connectivity:the challenge of behavioral landscape ecology[J]. Ecology,2005,86(8):1988-1995.
- [82] DEZA A A,ANDERSON T W. Habitat fragmentation,patch size,and the recruitment and abundance of kelp forest fishes[J]. Marine Ecology Progress,2010,413(6):229-240.
- [83] TSCHARNTKE T,KLEIN A M,KRUESS A,et al. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity—ecosystem service management[J]. Ecology Letters,2010,8(8):857-874.
- [84] BENNETT E M,PETERSON G D,GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters,2010,12(12):1394-1404.
- [85] STEINMAN A D,DENNING R. The role of spatial heterogeneity in the management of freshwater resources[M]. Berlin: Springer,2005:367-387.
- [86] RAUDSEPPHEARNE C,PETERSON G D,BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(11):5242-5247.

[责任编辑:严海琳]

复措施,维护其稳定性,促进湿地资源开发利用与生态环境保护。

本文从文献检索和发文数量角度,系统分析了水文连通度对湿地生态系统服务功能的影响研究进展,并指出了水文连通度对湿地生态系统服务功能影响研究方面的不足及其展望。

## 1 水文连通度及湿地生态系统服务功能研究进展

### 1.1 水文连通度研究进展

国内外学者对水文连通度/连接度已进行了大量研究,但由于研究角度不同,水文连通度的定义还未达成共识<sup>[6-7]</sup>。1980 年 Vannote 等<sup>[8]</sup>提出“河流连续体”概念( river continuum concept, RCC)。Western 等<sup>[9]</sup>和 Freeman 等<sup>[10]</sup>基于水文学角度认为水文连通度是指径流及其作为载体携带的物质和能量从源区—干流—流域网络—流域出口的迁移效率。Ward<sup>[11]</sup>建立了水生生态系统的四维体系,提出河流除了纵向连通外,还包括横向、垂向和时间 3 个维度的联系。Pringle<sup>[12]</sup>受到 Ward<sup>[13]</sup>关于河流连通性定义的启发从区域和全球角度定义了水文连通度,即水文连通度是基于水文循环要素的物质、能量和生物体以水为媒介进行迁移和传递的能力。Turnbull 等<sup>[14]</sup>则从流域生态学角度指出,水文连通度是一个用水文过程描述的区域相互连接的动态属性。目前,通常认可的水文连通度概念是指以水为媒介的物质、能量和生物体在水循环要素内部和各要素之间进行迁移和传递的能力<sup>[4,12,15-16]</sup>。

水文连通度可以从 4 个维度来研究,即纵向连接度、横向连接度和垂向连接度 3 个空间维度以及 1 个时间维度<sup>[4,11,15]</sup>,如图 1 所示。纵向连接度表征的是从源头到河口上下游存在梯度;横向连接度则指洪泛区、河流水体等与河岸带在水平方向上的水文连通程度;垂向连接度指地表水和地下水垂直方向上的水文连通状况;从时间维度来看,水文连通度会随水文特征值的周期性变化而变化<sup>[4,15]</sup>。水文连通度的 4 个维度都会对生态系统服务功能产生影响。水文连通度可分为 2 大类:一是湿地景观在空间结构特征上表现出来的连通性即结构连通度,包括水文连通度的 3 个空间维度;二是以所研究的湿地景观要素的生态过程和功能关系为主要特征和指标来确定水文连续性即功能连通度<sup>[1,4,17-18]</sup>。

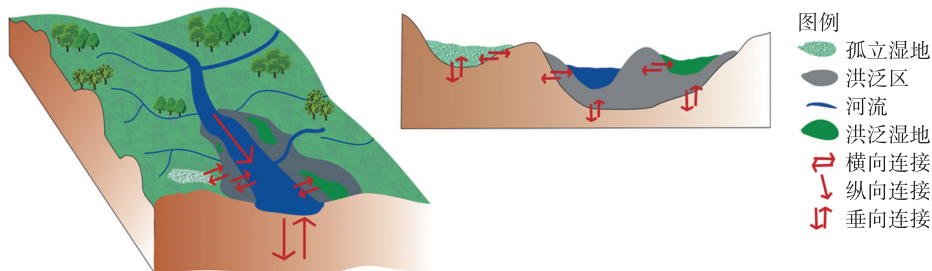


图 1 水文连通度空间维度模型

Fig. 1 The spatial dimension model of hydrologic connectivity

国内对水文连通度评价研究是随着近年来防洪减灾、水资源调配和改善水环境的需求日益增加而越加重视的,在这方面的研究尚处于起步阶段,成果较少。高常军等<sup>[1]</sup>综述了国内外水文连通度评价方法后,将应用于流域尺度内的评估方法分为 4 大类:原位监测法、水文模型法、连通性函数法以及图论方法。姚安坤<sup>[19]</sup>通过进行一系列的室内人工降雨实验,将水流长度运用于小区尺度的研究,并讨论了不同坡度下水文连通度的变化;Lane 等<sup>[20]</sup>基于 PDHM 模型来量化流域地表坡面流与河道网络连接关系,评估了陆地与河网的水文连通度;夏敏等<sup>[21]</sup>考虑到平原河网地区站点水位联系较大,综合了表征河网连通程度的主要指标,构建了指标体系,对巢湖环湖地区的水系连通度进行了评价;Cui 等<sup>[22]</sup>利用图论的最短路径算法评价了河道网络系统不同流量时期的水文连通度。

### 1.2 湿地生态系统服务功能研究进展

近年来国内外对湿地生态系统服务功能的研究主要聚焦于概念及其分类体系研究以及价值分类及其评估研究两大类。20 世纪 70 年代,生态系统服务功能作为科学术语被首次提出;1997 年 Daily<sup>[23]</sup>介绍了生态系统服务功能的概念即生态系统及生态过程所提供的能够满足和维持人类生活需要的条件和过程;Costanza 等<sup>[24]</sup>将生态系统提供的产品和服务统称为生态系统服务功能,并将其分为 17 类,同时指出生态系统服务功能与生态系统功能的对应关系;联合国千年生态系统评估( millennium ecosystem assessment, MA)

对生态系统服务功能的定义被国内外学者广泛认同,即人类从生态系统中直接或间接获取的大量的效益<sup>[25]</sup>。基于 MA 对生态系统服务功能的定义,湿地生态系统服务功能是指人类从湿地生态系统中直接或间接得到的能够满足人类生活需要的所有惠益,是人类利用湿地生态系统功能的一种表现。千年生态系统评估将生态系统服务功能分为 4 大类:供给功能、调节功能、支持功能以及文化功能<sup>[25]</sup>。不同的学者结合各自的研究角度对湿地生态系统服务功能进行了分类,傅娇艳等<sup>[26]</sup>结合 Costanza 等<sup>[24]</sup>对生态系统服务功能的划分原则,将湿地生态系统服务功能划分为提供产品、防洪减灾、调节作用、保护生物多样性以及社会文化载体 5 大类。

1997 年 Costanza<sup>[24]</sup>等对全球主要类型的生态系统服务功能价值进行评估,揭开了生态系统服务功能价值研究的序幕。刘玉龙等<sup>[27]</sup>总结了徐嵩龄对生态系统服务功能价值与市场关系的分析,将生态系统服务功能价值分为 3 类:以商品形式出现于市场的功能;不能以商品形式出现于市场,但有着与某些商品相似的性能或能对市场行为有明显影响的功能;既不能形成商品,又不能明显地影响市场行为的功能。欧阳志云等<sup>[28]</sup>将生态系统服务功能的价值分为直接利用价值、间接利用价值、选择价值以及存在价值 4 大类。有关生态系统服务功能价值评估的方法有很多,目前常用到的生态系统服务方法为:直接市场评估法、替代市场评估法和模拟市场价值评估法<sup>[27]</sup>。国内学者对单个地区的湿地生态系统服务功能价值进行了评估,辛琨等<sup>[29]</sup>运用市场价值法、碳税法 and 造林成本法、影子工程法、模糊数学法、条件价值法、旅行费用法以及生态价值法对辽河三角洲盘锦地区的湿地生态系统服务功能进行了价值评估;崔丽娟<sup>[30]</sup>根据鄱阳湖服务价值的不同获得途径,将鄱阳湖湿地服务功能价值评估方法分为直接市场评价法、揭示偏好与替代品市场法、陈述偏好法,并根据不同的功能采用了不同的环境经济学计算方法。

## 2 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响研究现状

### 2.1 文献检索方法

为进一步了解国内外对水文连通度与湿地生态系统服务功能关系研究的进展,本研究于 2019 年 1 月在 Web of Science 和 CNKI 数据库分别以“hydrologic connectivity”or“river connectivity”or“river-lake connectivity”和“水文连通度”、“水文连接度”、“湿地连通”、“沟渠连通”、“河湖水系连通”、“湿地水文过程”为主题搜索截止 2018 年底出版的文章;同时也利用追溯法来查找文献,即以文献所附的参考文献、书目等为线索,查找与本研究有关的文献。经对所查文献进行初步浏览,找到其中与生态系统服务有关的文献,通过最终筛选,发现明确研究水文连通度与湿地生态系统服务功能关系的文献共 291 篇。根据文献发表年份、水文连通度的类型、生态系统服务的类型和数量、水文连通度对湿地生态系统服务功能的影响情况等对文章进行分类整理。

### 2.2 文章数量分析

如图 2 所示,通过年发文量和年引文量的变化趋势可以看出学术界对水文连通度与湿地生态系统服务功能关系研究主题的兴趣与关注逐渐增强,主要可分为 3 个阶段:(1)2001~2006 年,该阶段共发文 17 篇,年发文量均在 5 篇以下;引文量共 855 篇,年引文量均在 300 篇以下;处于该研究主题的萌芽阶段。(2)2007~2012 年,该阶段共发文 69 篇,年发文量均在 20 篇以下;引文量共 3 584 篇,年引文量均在 1 000

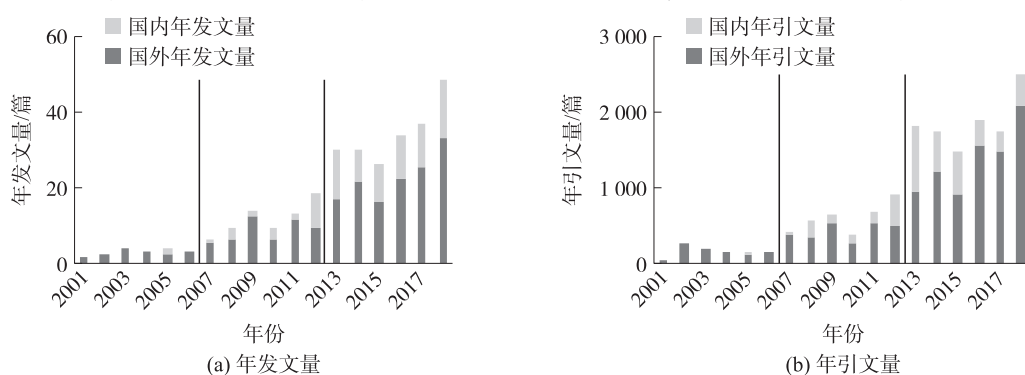


图 2 年发文量及年引文量情况统计

Fig. 2 Statistics of annual publications and citations



篇以下;处于该研究主题的初步发展阶段,该阶段大多数文献只研究了水文连通度对湿地生态系统单一服务功能的影响,发展速度缓慢。(3)2013~2018 年,该阶段共发文 205 篇,年发文量均在 50 篇以下;引文量共 11 265 篇,年引文量均在 2 600 篇以下;处于该研究主题的中期发展阶段,该阶段水文连通度对湿地生态系统综合服务功能影响的研究逐渐显现,发展速度有所加快,但仍然处于发展期。国内最早的文献发表于 2005 年,截止 2018 年,总发文量和总引文量分别为 93 篇和 4 031 篇,总体发展速度缓慢但有增长趋势,研究热度在逐渐提高。

### 2.3 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响概述

水文连通度的四维体系对湿地生态系统服务功能有一定影响。从纵向来看,维持湿地生态系统水文连通度有利于水体的流动、泥沙和营养物质的输移以及鱼类的迁徙<sup>[15]</sup>,如研究发现查干湖中沉积物与其人工和自然补给水源有着密切的关系<sup>[31]</sup>。从横向来看,水文连通度有利于营养物质和能量在各类湿地间的相互流动,有利于提高湿地蓄水滞洪和净化水体等能力,可以为物种的生存和繁殖提供更加丰富的环境<sup>[15,32-33]</sup>。从垂向来看,水文连通度与水分、盐分和营养物质在地表水、地下水间的相互转化密切相关<sup>[15]</sup>。约 40% 的文献同时研究了横向和纵向连接度,这两者一般会共同影响湿地生态系统服务功能,如河漫滩与河流间的横向连接度降低同时下游的供水量也会下降,从而对下游的生态系统服务功能产生影响<sup>[34-35]</sup>。仅有约 12% 的文章同时提及了 3 个连接度对湿地生态系统服务功能的影响。单独研究横向和纵向连接度对湿地生态系统服务功能影响的文献分别约占总文献数的 15% 和 20%,Goździewicz 等<sup>[36]</sup>研究了横向连接度对泛滥平原湖泊浮游动物群落结构的影响;Branco 等<sup>[37]</sup>研究结果表明纵向连接会影响淡水鱼的分布。单独研究垂向连接度的文献很少,关于水分、盐分和营养物质在地表水、地下水间的相互转化对生态系统服务功能的影响研究相对匮乏。水文连通度周期性变化对湿地生态系统服务功能影响的研究还处于探索阶段,在调查的文献中仅有 12% 的文献提及了两者的关系。为了更好地认识水文连通度与湿地生态系统服务功能的关系,有必要进一步研究水文连通度的四维体系对湿地生态系统服务功能的影响。

水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的研究方法具有多样性,针对不同的湿地生态系统有多种不同的指标来衡量水文连通度是否对湿地生态系统服务功能产生影响以及影响的程度。通过分析可将水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的研究方法分为 3 大类,即建模法、定量分析法和归纳法。在调查的文献中,约 57% 的文献利用建模法来研究水文连通度与湿地生态系统服务功能的关系,如洗卓雁<sup>[38]</sup>通过构建海口市水资源合理配置模型,发现水文连通度的改变使区域缺水问题得到了一定程度的缓解;约 29% 的文献通过实验得出的数据来反映水文连通度对湿地生态系统服务功能的影响,如潘保柱等<sup>[39]</sup>在实验室对天鹅洲采样样品进行处理分析,得到研究区底栖动物群落的变化特征,从而证明中等程度的水文连通度有助于维持底栖动物的生物多样性;约 14% 的文献通过对资料的整理、归纳和理论分析,指出水文连通度会对湿地生态系统服务功能产生影响,如崔保山等<sup>[4]</sup>对大量文献进行调研后发现,水文连通度会对湿地生境和生物产生重要影响。

如图 3 所示,通过文献分析可以发现,水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的结果存在很大差异,其中反映水文连通度增强会对湿地生态系统服务功能产生积极影响的文献最多,约占全部文献数量的 51%,而与之相反产生负面影响的大约仅占 3%;约 21% 的文献并未说明水文连通度会对所研究的湿地生态系统服务功能产生怎样的影响,而只说明了两者存在一定的关系,还提及水文连通度是和其他因素共同作用来影响所研究的湿地生态系统服务功能的;约 11% 的文献表明加强湿地生态系统的水文连通度既会对湿地生态系统服务功能产生积极影响,也会对其产生消极影响;研究结果表明适宜的或中等程度的水文连通度会对湿地生态系统服务功能产生最积极影响的文献约占全部文献数量的 11%;约 3% 的文献反映了水文连通度的变化对湿

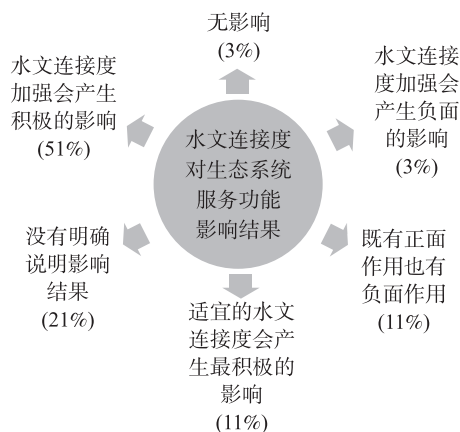


图 3 水文连通度对生态系统服务功能影响的结果统计  
Fig. 3 Types of impacts of hydrological connectivity on ecosystem services

地生态系统服务功能并无影响。

大多数调查的文献都是研究水文连通度对湿地动植物丰富度和生物多样性的影响<sup>[40-45]</sup>,有一部分研究了水文连通度对湿地调蓄能力的影响<sup>[46-50]</sup>,大部分研究都表明调蓄能力会随着水文连通度的降低而降低<sup>[49-52]</sup>。只有一两篇文献研究了某些生态系统服务功能,如交通运输、气候调节、粮食供应和旅游休闲等服务<sup>[32,53]</sup>。对上述文献的研究表明,水文连通度和湿地生态系统服务功能之间有多种联系,但目前有关水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的研究还处于发展阶段。

### 3 水文连通度对湿地生态系统单一服务功能的影响

#### 3.1 直接影响

水文连通度对湿地生态系统服务功能的直接或间接影响在文献中都有体现,其中约 51% 的论文研究了直接影响,如通过研究河湖水系连通性来改善区域水资源的质量以及水资源的配置问题<sup>[38,54-56]</sup>;水文连通程度下降改变了湿地生物的活动形式,从而直接影响生物的分布与数量<sup>[57-59]</sup>。由于很多湿地生态系统服务功能都是依靠湿地景观对物种运动和物质流动的促进和阻碍来实现的,因此水文连通度是通过控制物种流和物质流的速度和形式直接影响湿地生态系统服务功能的<sup>[2,60]</sup>;同时,水文连通度还可以影响种群的数量和消耗资源的速率,从而直接对湿地生态系统服务功能产生影响<sup>[61-62]</sup>。物质循环的速度和形式会影响很多重要的湿地生态系统服务功能,如提供水源、对水质、气候和自然灾害的调节等<sup>[46-52]</sup>。例如,水流通过河岸缓冲带的速度减缓,能够加强对污染物的过滤,对水质进行调节,但同时下游的供水量会减少。相反,从河流流向其周围河岸缓冲区的水流减少会降低水质调节和防洪能力,但下游的供水量会增加<sup>[2,63]</sup>;湿地水循环过程减弱,导致湿地珍稀或濒危物种消失,从而使湿地的美学、艺术和科学价值丧失。因此,这些湿地生态系统服务功能将在一定程度上依赖于水、营养物质和污染物的流动。生物的迁移和运动也会对湿地生态系统服务功能产生影响<sup>[2,64]</sup>。例如,人为建造大坝、水闸严重破坏了鱼类的生长、繁殖,阻断了鱼类洄游通道,很多经济鱼种消亡,减少了天然水产品供给的数量和种类<sup>[65]</sup>。

#### 3.2 间接影响

研究水文连通度对生态系统服务功能间接影响的论文约占总文献数的 31%。已有研究表明,生境斑块之间的连接度对确保种群的可持续性和生物多样性至关重要<sup>[63,66]</sup>,且斑块之间适中的连接度将维持较高的生物多样性,生物多样性的增强有助于提高各生境斑块的生态系统功能的稳定性和平均水平<sup>[61,63,67]</sup>。而水文连通度会影响生物多样性和生态功能,生物多样性及其提供的生态系统功能会影响湿地生态系统服务的供给<sup>[68-70]</sup>。因此,水文连通度会通过改变生物多样性和生态系统功能间接影响湿地生态系统服务能力。例如,自由连通的漫滩湿地,植物遗传多样性较高,可降低病虫害和湿地植物的疾病<sup>[71]</sup>;长江故道底栖动物群落被江湖阻隔,即妨碍了水文自由连通导致底栖动物多样性降低,最终会使得底栖动物衰退<sup>[39]</sup>。很多文献对水文连通度变化与底栖无脊椎动物多样性、鱼群落组成的关系进行了研究<sup>[72-77]</sup>。保持这些多样性取决于水文连通度的维持,而这反过来又会影响湿地生态系统服务的供给和稳定性。

### 4 水文连通度对湿地生态系统综合服务功能的影响

在特定的时空尺度下,湿地生态系统服务间并非独立存在,而是存在多种相互作用关系<sup>[78]</sup>。水文连通度的变化影响某一种或几种湿地生态系统服务功能时,会间接地对其他湿地生态系统服务产生影响,不同的湿地生态系统服务功能之间几乎不可能同时满足人类利用的最大利益,即存在着权衡或协同的关系<sup>[79]</sup>。不同的湿地生态系统服务功能会对水文连通度的变化做出不同的反应,从而产生权衡或协同作用<sup>[2]</sup>。约 18% 的论文研究了多个湿地生态系统服务功能,如 Obolowski 等<sup>[34]</sup>在漫滩湖泊连通性恢复研究中提到水文连通度对涵养水源与维持生物多样性的影响。但这些研究大多没有系统阐述水文连通度对湿地生态系统综合服务功能的影响。近年来湿地破碎化严重影响了湿地生态系统的调蓄能力<sup>[80]</sup>,因此研究水文连通度与湿地调节服务关系的文章中调蓄能力的研究占大多数。有关水文连通度与支持服务的研究中对水文连通度与生物多样性关系的研究相对更多一些。而供给服务功能、文化服务功能与水文连通度之间的研究还处于探索阶段,研究服务类型的单一性使得缺乏多项服务研究而导致的问题更加复杂。目

前关于水文连通度如何同时影响多种湿地生态系统服务以及水文连通度发生变化时湿地生态系统服务之间的权衡与协同关系如何变化尚不清楚。

## 5 有待研究的问题

### 5.1 水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的过程和机理研究

水文连通度不仅可以通过生物运动和物质循环直接影响湿地生态系统服务功能,还可通过改变生物多样性和生态系统功能的水平间接地影响湿地生态系统服务的供给。但由于湿地景观中生物运动和物质循环的实际情况(即功能连接性)很难衡量<sup>[81]</sup>,水文连通度对湿地生态系统服务功能影响研究中生物运动和物质循环大多没有量化,因此这些影响的相对重要性还不太清楚。为了加深对水文连通度与湿地生态系统服务功能联系的理解,亟待开展的是湿地水文连通对湿地功能影响的过程和机理的深入研究,这一进展将有助于在该领域进行更好的实证研究,并有助于确定水文连通度的类型和最有可能影响湿地生态系统服务功能的尺度,如连接度的规模在空间和时间上的改变会影响湿地害虫调节和渔业产量等服务功能<sup>[82-83]</sup>。

### 5.2 水文连通度对湿地生态系统综合服务功能的影响研究

目前关于水文连通度如何同时影响不同生态系统服务功能的研究还不完善。根据研究发现,物质循环在水文连通度与湿地生态系统服务功能关系的研究中发挥了重要的作用,大多数服务都是通过利用水文连通度控制物质循环的方式从而影响生态系统服务功能的<sup>[60]</sup>。不同的湿地生态系统服务功能对影响它们的各种驱动力和压力,包括连接度,也有不同的反应<sup>[2]</sup>。随着湿地景观结构和人类土地利用方式的改变,产生了各种积极和消极的湿地生态系统服务功能权衡<sup>[2,84]</sup>。例如,在佛罗里达沼泽地,水文连通度较高,导致养分流失,负荷增加,水质和生境质量下降<sup>[2,85]</sup>;但同时,灌溉、含水层补给和供人类使用的水得到改善。随着水文连通度的改变,这些权衡可能会以相似或不同的方式对各种湿地生态系统服务功能起作用<sup>[2,86]</sup>。然而,关于水文连通度和多种湿地生态系统服务功能之间的相互作用关系的研究很少。了解水文连通度对湿地生态系统综合服务功能可以为湿地利用和恢复提供新思路和方法。

## 6 结论

水文连通度会影响湿地生态系统服务功能,学术界对这种影响的关注也逐渐增强,但两者的关系在生态系统服务文献中的研究还处于初步发展阶段。通过文献分析发现,水文连通度对湿地生态系统服务功能影响的结果具有较大的差异性,反映水文连通度加强会对湿地生态系统服务功能产生积极影响的结果占一大半。水文连通度主要通过直接和间接两种方式对湿地生态系统单一服务功能产生影响,通过控制物质流动的速度和形式来直接影响湿地生态系统服务功能是该主题目前研究的热点。水文连通度对湿地生态系统综合服务功能的影响研究较少,有关水文连通度与多种湿地生态系统服务功能之间的权衡与协同关系还不太清楚。为了更好地探讨水文连通度对生态系统服务功能的影响,今后要将湿地水文连通对湿地功能影响的过程和机理的深入研究作为研究的重点。

### [参考文献](References)

- [1] 高常军,高晓翠,贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2017(3):586-594.
- [2] MITCHELL M G E, BENNETT E M, GONZALEZ A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps[J]. Ecosystems, 2013, 16(5): 894-908.
- [3] 陈敏建,王立群,丰华丽,等. 湿地生态水文结构理论与分析[J]. 生态学报,2008,28(6):2887-2893.
- [4] 崔保山,蔡燕子,谢焱,等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 739-747.
- [5] GARDNER R C, BARCHIESI S, BELTRAME C, et al. State of the world's wetlands and their services to people: a compilation of recent analyses[J]. Social Science Electronic Publishing, 2015, 23(7): 1-20.
- [6] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 119: 17-34.

- [7] BRACKEN L J, JACKY C. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(13): 1749–1763.
- [8] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept[J]. *Canadian Journal of Fishery & Aquatic Science*, 1980, 37(2): 130–137.
- [9] WESTERN A W, BLÖSCHL G, GRAYSON R B. Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(1): 83–97.
- [10] FREEMAN M C, PRINGLE C M, JACKSON C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 5–14.
- [11] WARD J V. The four-dimensional nature of lotic ecosystems[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1989, 8(1): 2–8.
- [12] PRINGLE C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 17(13): 2685–2689.
- [13] WARD J V. An expansive perspective of riverine landscapes: pattern and process across scales [J]. *GAIA—Ecological Perspectives for Science and Society*, 1997, 6(1): 52–60.
- [14] TURNBULL L, WAINWRIGHT J, BRAZIER R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. *Ecohydrology*, 2008, 1(1): 23–34.
- [15] 赵贤豹. 湿地生态系统水文连接度研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.
- [16] ALI G A, ROY A G. Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems[J]. *Geography Compass*, 2010, 3(1): 350–374.
- [17] WILLIAMS C J, PIERSON F B, ROBICHAUD P R, et al. Structural and functional connectivity as a driver of hillslope erosion following disturbance[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 25: 306–321.
- [18] MILLER G R, CABLE J M, MCDONALD A K, et al. Understanding ecohydrological connectivity in savannas: a system dynamics modelling approach[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(2): 200–220.
- [19] 姚安坤. 基于降雨模拟试验的坡面水文连通性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [20] LANE S N, REANEY S M, HEATHWAITE A L. Representation of landscape hydrological connectivity using a topographically driven surface flow index[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): 2263–2289.
- [21] 夏敏, 周震, 赵海霞. 基于多指标综合的巢湖环湖区水系连通性评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(1): 73–77.
- [22] CUI B, WANG C, TAO W, et al. River channel network design for drought and flood control: a case study of Xiaoqinghe River basin, Jinan City, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(11): 3675–3686.
- [23] DAILY G C. *Nature's services: societal dependence on natural eco-system*[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [24] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *World Environment*, 1997, 387(6630): 253–260.
- [25] 张永民. 千年生态系统评估报告集(三)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [26] 傅娇艳. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 681–686.
- [27] 刘玉龙, 马俊杰, 金学林, 等. 生态系统服务功能价值评估方法综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(1): 91–95.
- [28] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635–640.
- [29] 辛琨, 肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1345–1349.
- [30] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 47–51.
- [31] 郭伟, 陈贺, 庞靖鹏, 等. 查干湖连通水系的沉积物响应及特征[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(9): 80–84.
- [32] 刘鸣, 崔丽娟, 王小文, 等. 湿地岸带景观规划设计研究概述[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(13): 207–213.
- [33] 郭云腾. 四湖流域水文连通度及其对洪水期水文过程的影响[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [34] OBOLEWSKI K, GLIŃSKA L K, OŹGO M, et al. Connectivity restoration of floodplain lakes: an assessment based on macroinvertebrate communities[J]. *Hydrobiologia*, 2016, 774(1): 23–37.
- [35] CLILVERD H M, THOMPSON J R, HEPPELL C M, et al. Coupled hydrological/hydraulic modelling of river restoration impacts and floodplain hydrodynamics[J]. *River Research & Applications*, 2016, 32(9): 1927–1948.
- [36] GOŹDZIEJEWSKA A, GLIŃSKA L K, OBOLEWSKI K, et al. Effects of lateral connectivity on zooplankton community structure in floodplain lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2016, 774(1): 7–21.
- [37] BRANCO P, SEGURADO P, SANTOS J M, et al. Does longitudinal connectivity loss affect the distribution of freshwater fish? [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 48(7): 70–78.
- [38] 洗卓雁. 海口市河湖水系连通及水资源配置研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.



- [39] 潘保柱,王海军,梁小民,等. 长江故道底栖动物群落特征及资源衰退原因分析[J]. 湖泊科学,2008,20(6):806-813.
- [40] AARTS B G W, BRINK F W B V D, NIENHUIS P H. Habitat loss as the main cause of the slow recovery of fish faunas of regulated large rivers in Europe: the transversal floodplain gradient[J]. River Research & Applications, 2010, 20(1): 3-23.
- [41] LOOY K V, HONNAY O, BOSSUYT B, et al. The effects of river embankment and forest fragmentation on the plant species richness and composition of floodplain forests in the meuse valley, belgium[J]. Belgian Journal of Botany, 2003, 136(2): 97-108.
- [42] RECKENDORFER W, BARANYI C, FUNK A, et al. Floodplain restoration by reinforcing hydrological connectivity: expected effects on aquatic mollusc communities[J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(3): 474-484.
- [43] LASNE E, LEK S, LAFFAILLE P. Patterns in fish assemblages in the Loire floodplain: the role of hydrological connectivity and implications for conservation[J]. Biological Conservation, 2007, 139(3): 258-268.
- [44] BAYLEY S E, GUIMOND J K. Effects of river connectivity on marsh vegetation community structure and species richness in montane floodplain wetlands in Jasper National Park, Alberta, Canada[J]. Ácoscience, 2008, 15(3): 377-388.
- [45] DE PAGGI S B J, PAGGI J C. Hydrological connectivity as a shaping force in the zooplankton community of two lakes in the Paraná River floodplain[J]. International Review of Hydrobiology, 2010, 93(6): 659-678.
- [46] YU X, HAWLEYHOWARD J, PITT A L, et al. Water quality of small seasonal wetlands in the Piedmont ecoregion, South Carolina, USA: effects of land use and hydrological connectivity[J]. Water Research, 2015, 73: 98-108.
- [47] LAUDON H, KUGLEROVÁ L, SPONSELLER R A, et al. The role of biogeochemical hotspots, landscape heterogeneity, and hydrological connectivity for minimizing forestry effects on water quality[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2016, 45(Suppl 2): 152-162.
- [48] 孟慧芳. 鄱东南平原河网区水系结构与连通变化及其对调蓄能力的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [49] 邵玉龙. 太湖流域水系结构与连通变化对洪涝的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [50] 张欧阳, 卜惠峰, 王翠平, 等. 长江流域水系连通性对河流健康的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 1-5.
- [51] 周峰, 吕慧华, 许有鹏. 城镇化下平原水系变化及河网连通性影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 402-409.
- [52] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [53] CASTELLO L, MACEDO M N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 990-1007.
- [54] 高强, 唐清华, 孟庆强. 感潮河湖水系连通水环境改善效果评价[J]. 人民长江, 2015(15): 38-40.
- [55] 崔广柏, 陈星, 向龙, 等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1429-1437.
- [56] 陈睿智, 桑燕芳, 王中根, 等. 基于河湖水系连通的水资源配置框架[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 1-4.
- [57] XIA S, WANG Y, LEI G, et al. Restriction of herbivorous waterbird distributions in the middle and lower Yangtze River floodplain in view of hydrological isolation[J]. Wetlands, 2016, 37(1): 1-10.
- [58] FRACZ A, CHOW-FRASER P. Impacts of declining water levels on the quantity of fish habitat in coastal wetlands of eastern Georgian Bay, Lake Huron[J]. Hydrobiologia, 2013, 702(1): 151-169.
- [59] VILMI A, KARJALAINEN S M, HEINO J. Ecological uniqueness of stream and lake diatom communities shows different macroecological patterns[J]. Diversity & Distributions, 2017, 23(9): 1042-1053.
- [60] LUNDBERG J, MOBERG F. Mobile link organisms and ecosystem functioning: implications for ecosystem resilience and management[J]. Ecosystems, 2003, 6(1): 87-98.
- [61] GONZALEZ A, MOUQUET N, LOREAU M. Biodiversity as spatial insurance: the effects of habitat fragmentation and dispersal on ecosystem functioning[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009: 193-198.
- [62] HOLT R D. Ecology at the mesoscale: the influence of regional processes on local communities[C]. RICKLEFS R E, SCHLUTER D. Species diversity in ecological communities: historical and geographical perspectives. Chicago: University of Chicago Press, 1993: 77-88.
- [63] BRAUMAN K A, DAILY G C, DUARTE T K, et al. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services[J]. Social Science Electronic Publishing, 2007, 32(32): 68-87.
- [64] KREMEN C, WILLIAMS N M, AIZEN M A, et al. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change[J]. Ecology Letters, 2010, 10(4): 299-314.
- [65] YI Y, YANG Z, ZHANG S. Ecological influence of dam construction and river-lake connectivity on migration fish habitat in the Yangtze River basin, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2(5): 1942-1954.
- [66] LEIBOLD M A, HOLYOAK M, MOUQUET N, et al. The metacommunity concept: a framework for multi-scale community

- ecology[J]. Ecology Letters,2010,7(7):601-613.
- [67] LOREAU M,MOUQUET N,GONZALEZ A. Biodiversity as spatial insurance in heterogeneous landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2003,100(22):12765-12770.
- [68] YANG F,HE D H. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics,2003,34(2):487-515.
- [69] RD C F,ZAVALITA E S,EVINER V T,et al. Consequences of changing biodiversity[J]. Bioscience,1998,48(6783):234-242.
- [70] BALVANERA P,PFISTERER A B,BUCHMANN N,et al. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services[J]. Ecology Letters,2010,9(10):1146-1156.
- [71] SHI L,WANG Y,JIA Y,et al. Vegetation cover dynamics and resilience to climatic and hydrological disturbances in seasonal floodplain:the effects of hydrological connectivity[J]. Frontiers in Plant Science,2017,8(2196):1-11.
- [72] CHI S,LI M,ZHENG J,et al. Macroinvertebrate communities in the Big East Lake water network in relation to environmental factors[J]. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems,2017,418(22):1-14.
- [73] VON F S,DMITROVIĆ D,PEŠIĆ V. The influence of flooding and river connectivity on macroinvertebrate assemblages in rheocene springs along a third-order river[J]. Fundamental & Applied Limnology,2017,190(3):251-263.
- [74] REN P,HE H,SONG Y,et al. The spatial pattern of larval fish assemblages in the lower reach of the Yangtze River:potential influences of river-lake connectivity and tidal intrusion[J]. Hydrobiologia,2016,766(1):365-379.
- [75] DOU P,CUI B,XIE T,et al. Macrobenthos diversity response to hydrological connectivity gradient[J]. Wetlands,2016,36(1):45-55.
- [76] OBOLEWSKI K,GLIŃSKA L K,STRZELCZAK A. Does hydrological connectivity determine the benthic macroinvertebrate structure in oxbow lakes? [J]. Ecohydrology,2016,8(8):1488-1502.
- [77] PAILLEX A,CASTELLA E,ERMIGASSEN P S E Z,et al. Testing predictions of changes in alien and native macroinvertebrate communities and their interaction after the restoration of a large river floodplain( French Rhône) [J]. Freshwater Biology,2015,60(6):1162-1175.
- [78] 曹祺文,卫晓梅,吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. 生态学杂志,2016,35(11):3102-3111.
- [79] 勾蒙蒙. 亚热带次生林生态系统服务权衡与协同分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
- [80] 沈洁. 上海浦东新区城市化进程对水系结构、连通性及其调蓄能力的影响研究[D]. 上海:华东师范大学,2015.
- [81] BÉLISLE M. Measuring landscape connectivity:the challenge of behavioral landscape ecology[J]. Ecology,2005,86(8):1988-1995.
- [82] DEZA A A,ANDERSON T W. Habitat fragmentation,patch size,and the recruitment and abundance of kelp forest fishes[J]. Marine Ecology Progress,2010,413(6):229-240.
- [83] TSCHARNTKE T,KLEIN A M,KRUESS A,et al. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity—ecosystem service management[J]. Ecology Letters,2010,8(8):857-874.
- [84] BENNETT E M,PETERSON G D,GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters,2010,12(12):1394-1404.
- [85] STEINMAN A D,DENNING R. The role of spatial heterogeneity in the management of freshwater resources[M]. Berlin: Springer,2005:367-387.
- [86] RAUDSEPPHEARNE C,PETERSON G D,BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(11):5242-5247.

[责任编辑:严海琳]