

近 30 年来鄱阳湖生态系统服务变化*

陈旻坤^{1,2}, 徐昔保^{1**}

(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: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 鄱阳湖是我国最大淡水湖, 在维持区域生态安全和生态平衡中发挥重要作用. 为了解近 30 年鄱阳湖生态系统服务变化情况, 本文对已有文献与监测数据进行收集整理, 直接获取鄱阳湖水资源供给、渔业资源供给、水环境净化服务数据, 通过输沙量法、Berger-Parker 优势度指数计算泥沙淤积调控和生物多样性维持服务, 利用 *RMSD* 方法分析 1992–2014 年鄱阳湖生态系统服务关系. 结果表明: (1) 渔业资源供给和水环境净化服务不断下降, 水资源供给和泥沙淤积调控服务在 2010s 有所恢复; (2) 冬候鸟种类和数量增加, 鱼类种群结构逐渐恢复, 但 Berger-Parker 指数总体上升; (3) 浮游植物、底栖动物多样性上升, 浮游动物多样性下降; (4) 不同时间尺度各服务间均为高权衡关系, 水环境净化服务相对收益始终高于其他服务.

关键词: 湖泊生态系统服务; 变化特征; 权衡关系; 鄱阳湖

Lake Poyang ecosystem services changes in the last 30 years*

Chen Minkun^{1,2} & Xu Xibao^{1**}

(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: As the largest freshwater lake in China, Lake Poyang plays a vital role in maintaining regional ecological security and ecological balance. Due to natural changes and human activities, the hydrology and hydrodynamics of Lake Poyang changed, and the ecosystem of Lake Poyang was seriously threatened, which directly led to the degradation of ecosystem services. In order to capture ecosystem services changes of the Lake Poyang in the past 30 years, the existing literature and monitoring data were systematically collected and sorted to obtain data on Lake Poyang's water supply, fish supply, and water deputation services directly. Sediment transport method and Berger-Parker index were used to estimate sedimentation control and biodiversity protection services. The root mean square deviation (*RMSD*) method was applied to explore the temporal change of the trade-off relationships of Lake Poyang from 1992 to 2014. The results show that: (1) Fish supply and water deputation services continued to decline. Water supply and sedimentation control services recovered gradually in the 2010s. (2) The biodiversity of winter migratory birds and fish biodiversity increased slightly, characterised by the increased species and number of winter migratory birds and the fish population composition. (3) The biodiversity of phytoplankton and benthic animals increased, and the biodiversity of zooplankton decreased. (4) All the ecosystem service pairs had high trade-off relationships, and water deputation service always had a relatively higher benefit than other services.

Keywords: Lake ecosystem services; change characteristics; trade-off relationships; Lake Poyang

湖泊是地表重要的生态系统之一, 提供水资源供给、水环境净化、洪水调蓄等服务, 在保障全球水生态安全格局中具有重要地位. 近 20 年, 国内外在湖泊生态系统服务内涵、评估框架、模型、影响机制、权衡等方

* 2020-02-24 收稿; 2020-05-06 收修改稿.

中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-318) 和国家自然科学基金项目 (41771571) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: xbxu@niglas.ac.cn.

面已开展探究,但由于湖泊生态系统的高度复杂性、特殊性和研究手段的局限性,湖泊生态系统服务的研究滞后于其他生态系统^[1]. 相关研究集中在生态系统服务评估上(以供给服务为主),使用的研究手段较多,包括评估模型(InVEST, SolVES等)^[2-4]、经济学方法(市场价格法、旅行成本法、替代法等)^[5-6]、地理空间方法^[7]、Meta分析^[8]等,但尚未形成通用的评估框架和方法体系^[1]. 湖泊生态系统服务权衡与协同关系研究处于起步阶段,国内外相关研究较少,主要集中在权衡和协同关系辨识^[9],有关驱动机制和后续应用管理的研究较少. 研究方法大致可分为统计分析^[10]、空间分析^[11]、情景模拟^[12]和模型模拟^[13],但当前研究仍以定性和半定量分析方法为主^[1].

鄱阳湖位于江西省北部、长江中下游南岸. 鄱阳湖是我国第一大淡水湖,也是长江流域最大的通江湖泊,每年流入长江的水量约为 $1.457 \times 10^{11} \text{ m}^3$,约占长江水量的15.6%,是重要水源地^[14]. 鄱阳湖地处亚热带季风气候区,年平均气温 $16.5 \sim 17.8^\circ\text{C}$,年平均降水量 1542 mm ^[15]. 作为重要国际湿地,平均每年约有105种候鸟在此越冬,包括112种国际湿地公约指定水鸟和13种世界濒危鸟类^[16]. 同时,湖中有136种鱼类^[3],包括胭脂鱼、鲟鱼等珍稀鱼类,被誉为我国淡水鱼类天然种质资源库和濒危物种“避难所”. 鄱阳湖为长江中下游流域提供生活资源供给、水环境净化、洪水调蓄、气候调节、生物多样性维持、休闲娱乐等多种生态系统服务,在维持长江中下游流域生态安全、区域生态平衡中发挥着至关重要的作用.

然而,受自然变化和人类活动干扰,鄱阳湖水文水动力发生变化,鄱阳湖生态系统遭受严重威胁,直接导致生态系统服务退化. 气候变化改变降水、气温和蒸散发,湖底地形地貌变化直接改变湖泊水位、水量,显著改变湖泊水文情势^[17-18]. 随着经济发展,人类围湖造田、建设水利工程、采砂以及过度引水灌溉等干扰行为加剧,鄱阳湖生态进一步恶化. 围垦活动人为地改变了湖泊蓄水体积,影响了鄱阳湖水文水动力,是湖泊萎缩最主要的驱动力^[19]. 流域内水库建设、植被恢复和采砂活动改变出入湖泥沙量,自2001年起湖泊处于净侵蚀状态^[20]. 三峡大坝运行引起的水量变化和伴随的养分输入导致鄱阳湖水质下降和富营养化加剧^[21],并引发季节性缺水^[22],威胁着鸟类、鱼类生存^[23-24]. 生态环境恶化促使研究者开始关注鄱阳湖生态系统服务管理策略. 厘清生态系统服务间权衡/协同关系,是促使生态系统服务效益最大化、科学管理鄱阳湖的重要保障. 冉凤维等^[25]利用食物供给模型、RULSE模型和InVEST模型估算鄱阳湖食物供给、土壤保持和产水服务,综合运用相关分析、冷热点分析和空间制图法探究其权衡与协同关系的空间分异规律. Liu等^[26]以土地利用为数据源,运用当量因子法评估鄱阳湖流域1990—2015年生态系统服务价值与权衡/协同关系,评价了不同情景下生态系统服务间的权衡/协同关系. 目前关于鄱阳湖生态系统服务评价的研究较多,但研究区集中在鄱阳湖全流域、鄱阳湖生态经济区和鄱阳湖环湖区,针对鄱阳湖湖体生态系统服务的研究较少涉及. 相关研究主要集中在生态系统服务价值评估上,权衡和协同关系的研究较少,且更多关注空间上的关系变化.

因此,本文以鄱阳湖湖体为研究区,通过系统梳理鄱阳湖生态环境监测数据及生态系统服务研究文献获取渔业资源供给、水资源供给和水环境净化服务数据,利用输沙量法和Berger-Parker优势度指数估算泥沙淤积调控和生物多样性维持服务,运用RMSD方法定量分析其权衡/协同关系,探究鄱阳湖生态系统服务及其关系在长时间序列尺度的变化,以期对鄱阳湖生态系统保护和管理提供科学依据.

1 数据与方法

1.1 指标选取与数据搜集

根据鄱阳湖各类生态系统服务的重要性、敏感性以及相关数据的可得性,收集整理关键指标数据表征鄱阳湖水资源供给、渔业资源供给、水环境净化、泥沙淤积调控(本文中泥沙淤积调控服务指泥沙的淤积造陆功能)以及生物多样性维持服务,分析各类生态系统服务近30年的变化趋势. 其中,泥沙淤积量、冬候鸟和鱼类生物多样性指数需在原始数据基础上计算获取,其余指标数据均直接获取. 具体表征指标选取与数据来源详见表1. 因相关数据的年份不完全一致,为保证研究数据的一致性与可比性,本文以每10年为一个年代进行划分(1990—1999年为1990s,以此类推).

表 1 指标选取与数据来源
Tab.1 Indicator selection and data source

| 生态系统服务一级类 | 生态系统服务二级类 | 指标 | 时段 | 数据来源 |
|-----------|-----------|-------------------|-------------|----------------------------|
| 供给服务 | 水资源供给 | 蓄水量 | 1990—2014 年 | 江西省水文局 |
| | 渔业资源供给 | 天然捕捞量 | 1990—2017 年 | 参考文献[27];《长江三峡工程生态与环境监测公报》 |
| 调节服务 | 水环境净化 | 水质达标率、富营养化指数 | 1990—2017 年 | 参考文献[28];《江西省水资源公报》 |
| | 泥沙淤积调控 | 泥沙淤积量 | 1991—2018 年 | 参考文献[29-30];《长江泥沙公报》 |
| 维持服务 | 生物多样性维持 | 冬候鸟种类、数量、生物多样性指数 | 1998—2015 年 | 参考文献[28] |
| | | 鱼类生物多样性指数、渔获物种群构成 | 2000—2015 年 | 参考文献[31-34] |
| | | 浮游植物密度、生物量 | 1990—2017 年 | 参考文献[35-37] |
| | | 浮游动物密度、生物量 | 1990—2017 年 | 参考文献[35-36,38] |
| | | 底栖动物密度、生物量 | 1990—2017 年 | 参考文献[28,35-36] |

1.2 研究方法

1.2.1 泥沙淤积量计算 采用输沙量法计算泥沙淤积量,五大支流主要控制站(外洲站、李家渡站、梅港站、虎山站和万家埠站)的总输沙量为入湖输沙量,湖口水文站输沙量为出湖输沙量,公式为:

$$S = W_i - W_o \quad (1)$$

式中, S 为泥沙淤积量, W_i 为入湖输沙量, W_o 为出湖输沙量。

1.2.2 生物多样性计算 采用 Berger-Parker 优势度指数计算物种多样性. Berger-Parker 优势度指数易于计算,侧重群落中优势种的作用,可以综合反映生物群落的丰富度、均匀度和优势度,公式为:

$$d = N_{\max} / N \quad (2)$$

式中, d 为 Berger-Parker 优势度指数, N_{\max} 为最优势种的数量, N 为全部种的个体总数. d 越大,该物种优势度越低,群落生物多样性越高。

1.2.3 权衡分析 采用 $RMSD$ (the root mean square deviation)方法量化鄱阳湖生态系统服务权衡关系. 该方法是目前为止量化生态系统服务间权衡度的较为简单、有效的方法^[39]. $RMSD$ 值越大,权衡度越高. 在计算前需要进行数据标准化处理,以消除量纲,标准化值计算公式为:

$$B_A = \frac{A_{\text{OBS}} - A_{\text{Min}}}{A_{\text{Max}} - A_{\text{Min}}} \quad (3)$$

式中, A_{OBS} 、 A_{Max} 、 A_{Min} 分别为生态系统服务 A 的观测值、最大值和最小值。

$RMSD$ 公式为:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (4)$$

式中, ES_i 为标准化值, \overline{ES} 为生态系统服务标准化值的平均值, n 为样本量。

鉴于生物多样性服务各指标数据年份过于分散、数据时间序列长度较短,本文仅对 1992—2014 年渔业资源供给、水资源供给、水环境净化和泥沙淤积调控服务进行权衡分析. 由于多个生态系统服务指标的组合同多,本文重点关注两项生态系统服务在不同时间尺度下的权衡关系,同时计算了 4 项服务的权衡. 水资源供给和水环境净化服务有多个指标,权衡分析中分别采用年平均蓄水量和水质达标率作为替代指标。

2 结果分析

2.1 供给服务

2.1.1 水资源供给 鄱阳湖水资源供给服务下降(图 1). 2000s 年最低、年平均和年最高供给量较 1990s 分别

下降 9.0%、31.5% 和 37.5%。2010s 年平均和年最高供给量有所回升, 而年最低供给量持续下降, 较 2000s 下降 20.1%。以星子站位为代表, 将水位低于 12、10 和 8 m 分别界定为低水位期、一般枯水期(湖区用水受到一定影响)和严重枯水期(湖区用水受到重大影响)^[40]。采用 7 月至次年 6 月为一年进行年份划分^[41], 发现鄱阳湖枯水期出现天数增加、枯水程度加重、水资源供给服务下降(图 2)。低水位期和一般枯水期平均出现天数波动增加, 分别比 1990s 增加 14 和 34 d。1990s 严重枯水期平均出现天数仅 1 d, 2000s 飞速上涨至 25 d, 2010s 出现 20 d, 远超 1990s 水平。

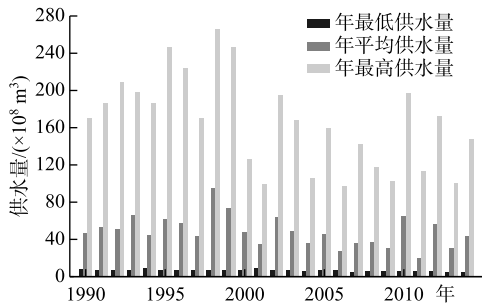


图 1 水资源供给服务变化
Fig.1 Changes in water supply service

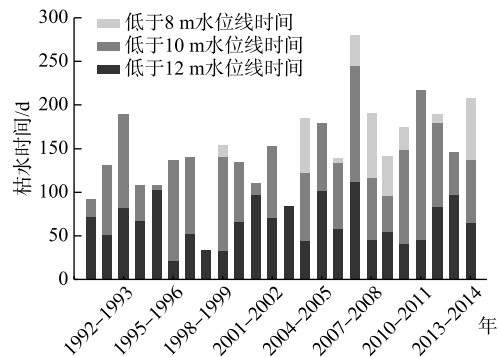


图 2 星子站枯水时间
Fig.2 Dry days of Xingzi Station

2.1.2 渔业资源供给 鄱阳湖渔业资源供给服务呈先增后减趋势(图 3)。1990s 渔业资源供给不断提升, 年平均供给量达 4.26×10^4 t。20 世纪, 渔业资源供给服务下降, 年平均供给量降至 2.94×10^4 t(下降 30.8%)。1998 年渔业资源供给服务最强, 供给量高达 7.19×10^4 t, 2017 年供给量最低, 仅为 1998 年的 27.0%。

2.2 调节服务

2.2.1 水环境净化 鄱阳湖水环境净化服务不断下降, 水质恶化(图 4)。1990s 水环境净化服务强, 水质以 I、II 类为主, 年平均水质达标率(优于或符合 III 类水)近乎 100%。但年平均富营养化指数达 42.5, 处于中营养水平。2000s 水环境净化服务下降, 年平均水质达标率下降 19.6%, 2007 年最低(15.0%), 富营养化指数上升 7.7%。2010s 继续下降, 年平均水质达标率仅为 44.5%, 富营养化指数继续上升 5.5%, 但仍处于中营养水平。

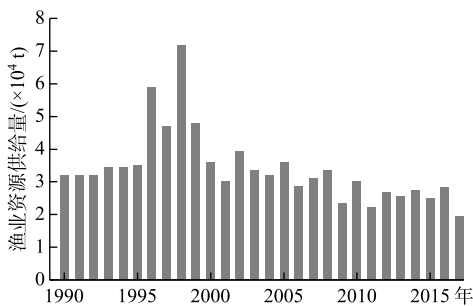


图 3 渔业资源供给服务变化
Fig.3 Changes in fish supply service

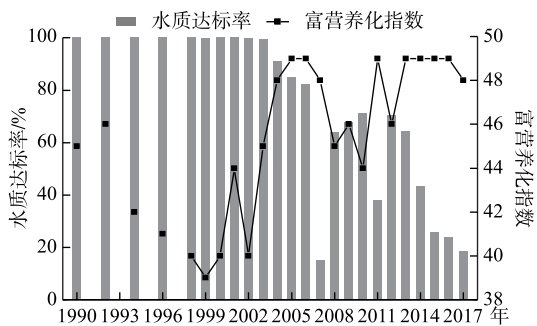


图 4 水环境净化服务变化
Fig.4 Changes in water deputation service

2.2.2 泥沙淤积调控 鄱阳湖泥沙淤积调控服务下降(图 5)。1990s 年平均淤积泥沙 544.2×10^4 t。2000s 鄱阳湖淤积调控服务严重下降, 长期处于净侵蚀状态, 2003 年降至谷底, 净流失泥沙 1246.3×10^4 t。2017 年短暂回到淤积状态, 2018 年再次呈现负增长, 2010s 年平均流失泥沙 388.8×10^4 t。总体上看, 泥沙淤积调控服务不

断下降,但近年有向好趋势.

2.3 生物多样性维持服务

2.3.1 冬候鸟、鱼类 冬候鸟 Berger-Parker 指数呈先降后升趋势. 1998—2008 年指数波动下降,2009—2015 年指数上升 25.5%. 鱼类 Berger-Parker 指数在 2000—2003 年不断上升,2003 年后基本处于较为稳定的波动状态,年平均指数较前一时段上升 21.8%,生物多样性下降(图 6).

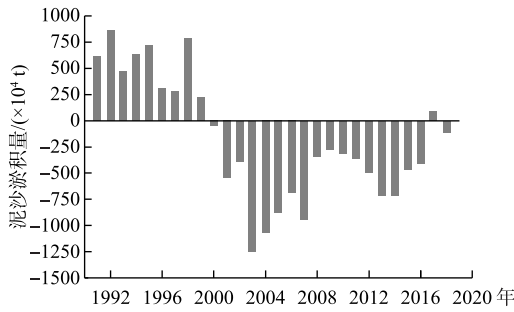


图 5 泥沙淤积调控服务变化

Fig.5 Changes in sedimentation control service

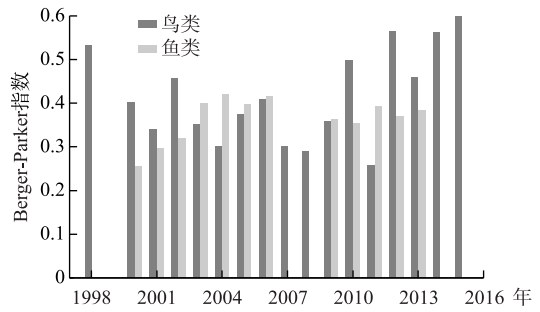


图 6 冬候鸟、鱼类生物多样性变化

Fig.6 Changes in winter migratory birds and fish biodiversity

2.3.2 水生动植物 水生动植物变化显著(表 2). 浮游植物种类数基本不变,年平均密度增加 523.2%,生物多样性上升. 浮游动物种类减少 32.3%,年平均密度下降 84.6%,生物多样性减少. 底栖动物年种类增加 62.7%,物种丰富度增加,但年平均密度下降 60.8%,单位面积数量减少. 但浮游植物平均生物量下降,大型浮游植物减少,存在小型化趋势;浮游动物和底栖动物平均生物量增加,2010s 底栖动物生物量突增 33.7 倍,大型水生动物增加.

表 2 水生动植物物种特征值

Tab.2 Characteristic values of aquatic plant species

| 种类 | 种类数 | 年平均密度 | 年平均生物量 | 调查时间 |
|------|------|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| 浮游植物 | 107 | 65.9×10 ⁴ ind./L | 346.0 mg/L | 1990s |
| | 106 | 410.7×10 ⁴ ind./L | 2.0 mg/L | 2010s |
| 浮游动物 | 86 | 877.0 ind./L | 0.4 mg/L | 1990s |
| | 65 | 135.0 ind./L | 1.9 mg/L | 2010s |
| | 底栖动物 | 51 | 596.0 ind./m ² | 146.7 g/m ² |
| 35 | | 222.0 ind./m ² | 245.9 g/m ² | 2000s |
| 83 | | 233.4 ind./m ² | 7120.4 g/m ² | 2010s |

2.4 生态系统服务关系

鄱阳湖两项生态系统服务在各年代均表现出显著的权衡关系(图 7). 1990s 权衡关系极强(0.39~0.46),其中 5 个服务对权衡度高于 0.4. 2000s 权衡度均降低(降低 0.09~0.15),下降最多的是渔业资源供给—水环境净化服务,但仍都属于高权衡关系. 2010s 权衡度均升高(升高 0.07~0.11),水环境净化—泥沙淤积调控服务权衡度上升最多、权衡关系最强,略微超过 1990s. 水资源供给—泥沙淤积调控服务权衡度亦高于 1990s,其余各服务间权衡度较 1990s 下降,渔业资源供给—水资源供给服务权衡度在各年代都最低. 4 项生态系统服务权衡关系年代变化与两项相一致,先降后升,始终处于高权衡关系. 此外,各生态系统服务组合在较长时间尺度下(1992—2014 年)亦均处于高权衡关系(0.24~0.37).

不同时间尺度生态系统服务相对收益方有所不同(图 8). 1992—2014 年水资源供给服务收益高于渔业资源供给,但分年代时 2000s 渔业资源供给服务收益较高,其他年代收益相当. 1992—2014 年泥沙淤积调控服务收益高于渔业资源供给服务,但各年代均无相对收益方. 1992—2014 年水资源供给—泥沙淤积调控服

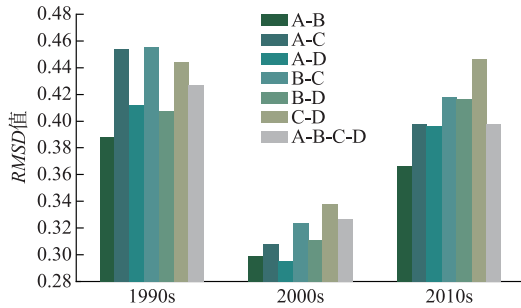


图7 生态系统服务权衡度 (*RMSD* 值)
(A 为渔业资源供给服务, B 为水资源供给服务, C 为水环境净化服务, D 为泥沙淤积调控服务, A-B 表示渔业资源供给与水资源供给服务的权衡, 以此类推)

Fig.7 Trade-offs (*RMSD* values) of ecosystem services (The capital letters (A-D) represents fish supply, water supply, water depuration, sedimentation control and biodiversity protection, respectively. A-B represents the trade-off between fish supply service and water supply service, and so on)

务无相对收益方,分年代时收益方从无到泥沙淤积调控服务,再到水资源供给服务不断变化. 在任何时间尺度下,水环境净化服务均为较高收益方,但分年代时存在向无相对收益方转变的趋势.

3 讨论

3.1 生态系统服务变化影响因素

鄱阳湖生态系统服务多呈下降趋势,水资源供给服务下降是气候、江湖关系和人为活动综合作用的结果. 三峡对鄱阳湖枯水期起补水作用,但作用甚微,且只能影响到星子站^[42]. 而2000年后由于人为活动(下垫面改变)和气候变化(降水减少、气温升高),鄱阳湖蒸发量增加,入湖径流减少,湖泊水量减少,供水服务下降^[43-44]. 2010年起降水量增加^[45],年最高和年平均供水量有所回升. 但三峡运行导致鄱阳湖与长江关系变化^[46],长江顶托作用减弱,出湖水量增加,加剧了极端干旱水文事件,最低供水量继续下降.

渔业资源供给服务受洪水、捕捞力度、捕捞强度等外界因素影响. 1996和1998年特大洪水使大量人工养殖鱼类和江湖洄游鱼类涌入鄱阳湖^[24],导致这

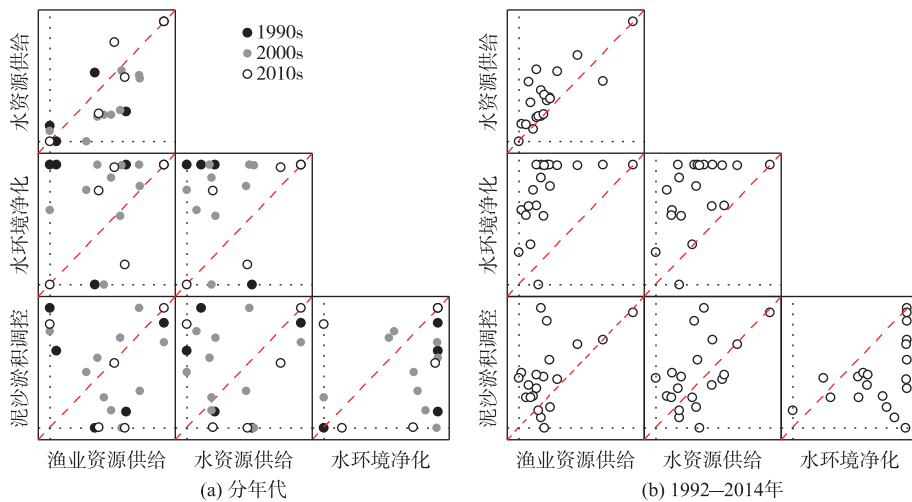


图8 生态系统服务对散点分布图(以标准化后的生态系统服务值作为横纵坐标轴(黑色虚线),红色虚线为1:1线. 一对生态系统服务的坐标点到1:1线的距离越远,*RMSD* 值越大. 坐标点与1:1线的相对位置代表在该条件下某种生态系统服务更有利,该服务为相对收益方)

Fig.8 Scatter plot matrices of paired ecosystem services (ESs) (Use the standardized ES value as the horizontal and vertical axis (black dotted line), and red dash lines are 1:1 lines. The farther the distance from the coordinate of a pair of ESs to the 1:1 line, the larger the *RMSD* value is.

In addition, the relative position of the data point to the 1:1 line indicates which ES is more beneficial at the given condition, and the service is a relative beneficiary)

两个年份鄱阳湖渔业资源供给服务飞速提升. 而湖泊水量减少, 面积萎缩, 鱼类索饵范围缩小, 饵料减少, 鱼类减少. 水环境净化服务不断下降, 水质由 I、II 类下降为 III、IV 类, 甚至 V 类. 20 世纪, 鄱阳湖水量减少, 枯水期延长, 湖泊污染物稀释能力下降. 人类活动干扰使水环境净化服务进一步退化, 采砂等活动搅动底泥, 释放氮、磷等污染物^[47]. 加上江西经济快速发展, 废水排放增加, 入湖污染物增加, 鄱阳湖污染物沉积^[48].

人为活动改变了出入湖输沙量, 是鄱阳湖泥沙淤积调控服务下降的主要因素. 江西省自 1983 年起实施山江湖工程, 森林覆盖率提升, “五河”流域水土流失改善, 且“五河”中上游兴建水利工程, 拦截上游水流泥沙, 入湖输沙量不断下降. 此外, 航道整治和采砂等活动使出湖水流裹挟泥沙量增加. 2013 年江西省实施鄱阳湖区江西五项专项治理, 减少鄱阳湖采砂船只和采砂力度. 2016 年出台《江西省河道采砂管理条例》把采砂整治纳入地方法规. 在政府整治、管理下, 出湖输沙量下降, 2017 年泥沙淤积调控服务短暂恢复.

不同物种生物多样性变化不同, 浮游植物多样性上升, 鱼类和浮游动物多样性下降, 冬候鸟和底栖动物物种丰富度增加. 冬候鸟 Berger-Parker 指数上升, 但种类和数量增加(图 9), 1998—2003 年冬候鸟种类较少, 2004 年迅速增加, 此后呈稳定波动状态, 年平均种类数为先前的 2.8 倍, 冬候鸟种类丰富度增加. 鸭类和鸕鹚类数量先增加后减少, 其余种类呈波动上升, 冬候鸟数量总体上升. 因 Berger-Parker 指数易受全部物种的个体总数和最优种数量影响, 2010s 冬候鸟最优种数量迅猛增加使 Berger-Parker 指数不降反升. 鱼类资源供给和生物多样性下降, 但 2011 年起为保护长江鱼类, 三峡集团实行生态调度, 四大家鱼和其他产漂流性卵的鱼类繁殖能力提升^[39], 四大家鱼占比增加, 鲤鱼占比下降, 鳊鱼、鲃鱼、鳊鱼和短颌鲚等鱼类逐渐恢复(图 10), 鱼类生物多样性小幅恢复上升.

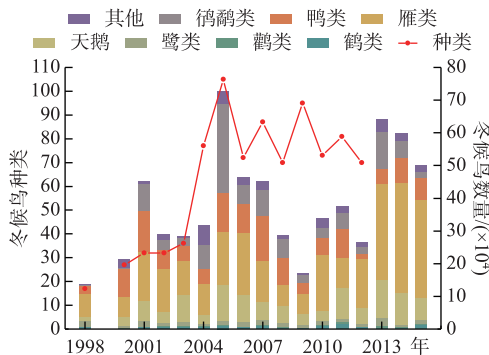


图9 冬候鸟种类和数量变化

Fig.9 Changes in species and population of winter migratory bird

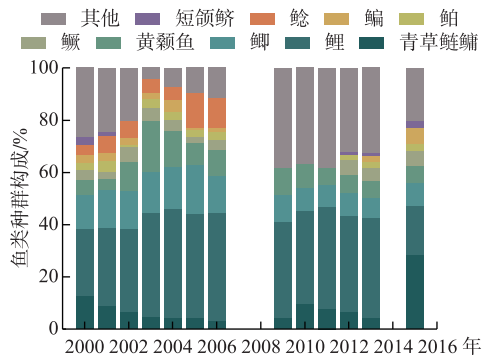


图10 鱼类种群构成变化

Fig.10 Changes in population composition of fish

3.2 不确定性分析

1) 研究数据的不确定性. 首先, 由于本文采用的数据来源多样, 包括政府部门统计数据和相关研究成果, 数据的标准和采样点等均存在一定的差异, 导致数据本身可能存在一定的误差. 其次, 浮游植物、浮游动物数据不连续, 缺乏 2000s 数据, 导致其趋势分析可能存在误差. 再次, 部分指标观测时间较短, 例如缺乏 1998 年前的冬候鸟数据, 而不同时间尺度下的变化趋势存在差异, 有待进一步搜集和监测相关数据, 为更长时间尺度的分析奠定数据基础.

2) 指标的不确定性. 受数据限制, 水资源供给服务采用蓄水量为指标, 得到的供水量并不是完全可为人类所用的, 为生态系统中间服务. 此外, 天然渔业丰富度易受洪水干扰, 鄱阳湖外的鱼类进入湖中, 可能影响其准确性. 后期研究在可以获得大规模、长时序的观测数据时, 统一采用最终服务指标进行评估, 并使用相适应的评估模型排除外界干扰, 以更准确地评估多因素综合作用下鄱阳湖生态系统服务的变化趋势和特征.

4 结论

近 30 年以来鄱阳湖关键生态系统服务发生较大变化. 渔业资源供给和水环境净化服务呈不断下降趋

势. 水资源供给、泥沙淤积调控服务下降,但在 2010s 有所恢复. 浮游植物多样性上升,浮游动物生物多样性下降,底栖动物物种丰富度增加. 冬候鸟、鱼类 Berger-Parker 指数上升,但冬候鸟种类和数量增加,鱼类种群结构逐渐恢复,2010s 生物多样性小幅上升. 各时间尺度生态系统服务之间均为高度权衡关系,最低值均出现在 2000s(0.30~0.34). 其中,水环境净化服务与其他服务相比收益较高,渔业资源供给—水资源供给服务和渔业资源供给—泥沙淤积调控服务在不同时间尺度相对收益存在差异.

致谢:感谢李冰助理研究员提供鄱阳湖水量和水位数据!

5 参考文献

- [1] Xu XB, Jiang B, Tan Y *et al.* Lake-wetland ecosystem services modeling and valuation: Progress, gaps and future directions. *Ecosystem Services*, 2018, **33**: 19-28. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.08.001.
- [2] Taguchi K, Nakata K. Evaluation of biological water purification functions of inland lakes using an aquatic ecosystem model. *Ecological Modelling*, 2009, **220**(18): 2255-2271. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.05.007.
- [3] Sun CZ, Zhen L, Giashuddin MM. Comparison of the ecosystem services provided by China's Poyang Lake wetland and Bangladesh's Tanguar Haor wetland. *Ecosystem Services*, 2017, **26**: 411-421. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.02.010.
- [4] Ma Q, Liu K, Gao Y *et al.* Assessment on social values of ecosystem services in Xi'an Chanba national wetland park based on Solves Model. *Wetland Science*, 2018, **16**(1): 51-58. [马桥, 刘康, 高艳等. 基于 SolVES 模型的西安灞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.]
- [5] Colautti RI, Bailey SA, Overdijk CDA *et al.* Characterised and projected costs of nonindigenous species in Canada. *Biological Invasions*, 2006, **18**(1): 45-59. DOI: 10.1007/s10530-005-0236-y.
- [6] Gong J, Li JY, Yang JX *et al.* Land use and land cover change in the Qinghai Lake region of the Tibetan Plateau and its impact on ecosystem services. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(7): 818. DOI: 10.3390/ijerph14070818.
- [7] Politi E, Rowan JS, Cutler MEJ. Assessing the utility of geospatial technologies to investigate environmental change within lake systems. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 791-806. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.136.
- [8] Reynaud A, Lanzaova D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecological Economics*, 2017, **137**: 184-194. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.001.
- [9] Qiao XN, Gu YY, Zou CX *et al.* Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 218-229. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.135.
- [10] Dong XH, Xu M, Lin MZ *et al.* Lake sediment evidences historical patterns of lake ecosystem services and their tradeoff/synergy mechanism; Progress, case studies and prospective. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(1): 28-37. [董旭辉, 徐敏, 林媚珍等. 沉积记录揭示的湖泊长期生态系统服务权衡/协同机制:进展、案例剖析与展望. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(1): 28-37.]
- [11] Swallow BM, Sang JK, Nyabenge M *et al.* Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in the Lake Victoria basin of East Africa. *Environmental Science & Policy*, 2009, **12**(4): 504-519. DOI: 10.1016/j.envsci.2008.11.003.
- [12] Hu YN, Peng J, Liu YX *et al.* Integrating ecosystem services trade-offs with paddy land-to-dry land decisions: A scenario approach in Erhai Lake Basin, southwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 849-860. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.340.
- [13] Jiang Y, Dinar A, Hellegers P. Economics of social trade-off: Balancing wastewater treatment cost and ecosystem damage. *Journal of Environmental Management*, 2018, **211**: 42-52. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.01.047.
- [14] Wu ZS, Zhang DW, Cai YJ *et al.* Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 17999. DOI: 10.1038/s41598-017-18285-y.
- [15] Qi LY, Huang JC, Huang Q *et al.* Assessing aquatic ecological health for lake Poyang, China: Part I index development. *Water*, 2018, **10**(7): 943. DOI: 10.3390/w10070943.
- [16] Hu ZP, Ge G, Liu CL. Response of wintering migratory birds to hydrological processes in Poyang Lake. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1770-1779. DOI: 10.11849/zzyxb.2014.10.012. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 越冬候鸟对鄱阳湖水文过程的响应. *自然资源学报*, 2014, **29**(10): 1770-1779.]

- [17] Su XL, Zeng B, Huang WJ *et al.* Effects of the Three Gorges Dam on preupland and preriparian drawdown zones vegetation in the upper watershed of the Yangtze River, P.R. China. *Ecological Engineering*, 2012, **44**: 123-127. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.001.
- [18] Leon JX, Cohen TJ. An improved bathymetric model for the modern and palaeo Lake Eyre. *Geomorphology*, 2012, **173/174**: 69-79. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.029.
- [19] Min Q. Computation and analysis of affected flood water level for enclosing and disclosing the Poyang Lake. *Journal of China Hydrology*, 2000, **20**(4): 37-40. [闵騫. 鄱阳湖围、退垦对洪水水位影响的计算与分析. 水文, 2000, **20**(4): 37-40.]
- [20] Qi SH, Xiong MY, Liao FQ *et al.* Impacts of human activities on sediments budget in Poyang Lake. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(6): 888-894. [齐述华, 熊梦雅, 廖富强等. 人类活动对鄱阳湖泥沙收支平衡的影响. 地理科学, 2016, **36**(6): 888-894.]
- [21] Ding YK, Wang SR, Zhang WQ *et al.* A rule of hydrological regulating on nutritional status of Poyang Lake, since the operation of the Three Gorges Dam. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 535-542. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.054.
- [22] Lai XJ, Liang QH, Jiang JH *et al.* Impoundment effects of the three-gorges-dam on flow regimes in two China's largest freshwater lakes. *Water Resources Management*, 2014, **28**(14): 5111-5124. DOI: 10.1007/s11269-014-0797-6.
- [23] Dong ZC, Liang ZM, Li DY *et al.* Influences of Three Gorges Project on water resources and ecological effects in Poyang Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(1): 13-18. [董增川, 梁忠民, 李大勇等. 三峡工程对鄱阳湖水资源生态效应的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(1): 13-18.]
- [24] Xie P. Ecological impacts of Three Gorges Dam on Lakes Dongting and Poyang. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(10): 1607-1618. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201710013. [谢平. 三峡工程对两湖的生态影响. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(10): 1607-1618.]
- [25] Ran FW, Luo ZJ, Wu JP *et al.* Spatiotemporal patterns of the trade-off and synergy relationship among ecosystem services in Poyang Lake Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(3): 995-1004. [冉凤维, 罗志军, 吴佳平等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. 应用生态学报, 2019, **30**(3): 995-1004.]
- [26] Liu H, Zheng L, Wu J *et al.* Past and future ecosystem service trade-offs in Poyang Lake Basin under different land use policy scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, **13**(2): 1-16. DOI: 10.1007/s12517-019-5004-x.
- [27] Qian XE, Huang CG, Wang YM *et al.* The status quo of fishery resources of Poyang Lake and its environmental monitoring. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**(6): 612-617. [钱新娥, 黄春根, 王亚民等. 鄱阳湖渔业资源现状及其环境监测. 水生生物学报, 2002, **26**(6): 612-617.]
- [28] Tang GH. Study on evolution, protection and management of Poyang Lake's wetland [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2017. [唐国华. 鄱阳湖湿地演变、保护及管理研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2017.]
- [29] Liao Z, Jiang ZB, Xiong Q. Analysis of scouring and deposition change with different periods in Poyang Lake. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2015, **41**(6): 419-424, 432. [廖智, 蒋志兵, 熊强. 鄱阳湖不同时期冲淤变化分析. 江西水利科技, 2015, **41**(6): 419-424, 432.]
- [30] Hu CH, Ruan BQ, Zhang SH *et al.* eds. Relationship between Dongting Lake, Poyang Lake and Yangtze River and its regulation. Beijing: Science Press, 2017: 332. [胡春宏, 阮本清, 张双虎等. 长江与洞庭湖鄱阳湖关系演变及其调控. 北京: 科学出版社, 2017: 332.]
- [31] Fang CL, Chen WJ, Zhou HM *et al.* Poyang Lake fish resources and their utilization suggestions. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, **44**(9): 233-243. [方春林, 陈文静, 周辉明等. 鄱阳湖鱼类资源及其利用建议. 江苏农业科学, 2016, **44**(9): 233-243.]
- [32] Jiang H, Liu LT, Zheng XS. The Poyang Lake fishery resources environment status and protection countermeasures. *Fishery Modernization*, 2013, **40**(1): 68-72. [姜红, 刘礼堂, 郑喜森. 鄱阳湖水域渔业资源现状调查及主要保护对策. 渔业现代化, 2013, **40**(1): 68-72.]
- [33] Huang XP, Gong Y. Study on Poyang Lake fishery resources status and conservation countermeasures. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2007, (4): 2-6. [黄晓平, 龚雁. 鄱阳湖渔业资源现状与养护对策研究. 江西水产科技, 2007, (4): 2-6.]
- [34] Zhang S, Gao XP, Deng S. Investigation and suggestion on fish fishing specifications and fishing gear and fishing law of Poyang Lake. *Jiangxi Fishery Sciences and Technology*, 2016, (2): 4-7. [张颂, 高小平, 邓晟. 鄱阳湖鱼类捕捞规格

- 及渔具渔法调查与建议. 江西水产科技, 2016, (2): 4-7.]
- [35] Liu H, Xu L, Zhang Q *et al.* A dataset of water environment monitoring in Poyang Lake from 2013 to 2018. *Science Data Bank*, 2019. DOI: 10.11922/sciencedb.876. [刘贺, 徐力刚, 张奇等. 2013—2018年鄱阳湖水环境监测数据集. 中国科学数据, 2019.]
- [36] Yang FY, Liu XT, Zhao KY *et al.* Natural fishery function of Poyang lake. *Wetland Science*, 2011, 9(1): 82-89. [杨富亿, 刘兴土, 赵魁义等. 鄱阳湖的自然渔业功能. 湿地科学, 2011, 9(1): 82-89.]
- [37] Qian KM, Liu BG, Chen YW. Long term dynamics of phytoplankton functional groups in Lake Poyang during 2009–2016. *J Lake Sci*, 31(4): 1035-1044. DOI: 10.18307/2019.0402. [钱奎梅, 刘宝贵, 陈宇炜. 鄱阳湖浮游植物功能群的长期变化特征(2009—2016年). 湖泊科学, 2019, 31(4): 1035-1044.]
- [38] Lv Q, Hu XR, Nie X *et al.* Impact of water level fluctuation on the succession of zooplankton in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 40(4): 1486-1495. DOI: 10.5846/stx201812142730. [吕乾, 胡旭仁, 聂雪等. 鄱阳湖丰水期水位波动对浮游动物群落演替的影响. 生态学报, 2020, 40(4): 1486-1495.]
- [39] Lu N, Fu BJ, Jin TT *et al.* Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708. DOI: 10.1007/s10980-014-0101-4.
- [40] Yu ZW, Hu KD. Variation and trend analysis on low water level of Poyang Lake. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2014, 40(4): 253-257, 265. [喻中文, 胡魁德. 鄱阳湖低枯水位变化及趋势性分析研究. 江西水利科技, 2014, 40(4): 253-257, 265.]
- [41] Min Q, Lai ZS. Characteristics of low-water level changes in Lake Poyang during 1952-2011. *J Lake Sci*, 2012, 24(5): 675-678. DOI: 10.18307/2012.0505. [闵騫, 占腊生. 1952-2011年鄱阳湖枯水变化分析. 湖泊科学, 2012, 24(5): 675-678.]
- [42] Wu NH, Luo Y, Liu TH *et al.* Experimental study on the effect of the Three Gorges Project on water level in Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2014, 26(4): 522-528. DOI: 10.18307/2014.0405. [邬年华, 罗优, 刘同宦等. 三峡工程运行对鄱阳湖水影响试验. 湖泊科学, 2014, 26(4): 522-528.]
- [43] Tang AG, Yang J, Li Y *et al.* Climate change and its influence on runoff in Poyang Lake Watershed. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(5): 35-39. [涂安国, 杨洁, 李英等. 鄱阳湖流域气候变化及其对入湖径流量的影响. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 35-39.]
- [44] Liu JY, Zhang Q, Deng XY *et al.* Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2016, 28(2): 432-443. DOI: 10.18307/2016.0224. [刘剑宇, 张强, 邓晓宇等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析. 湖泊科学, 2016, 28(2): 432-443.]
- [45] Qian GW, You L, Chen AM. Prediction of future water resources quantity in Poyang Lake Basin. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 45(8): 53-54, 73. [钱贵伍, 游黎, 陈爱民. 鄱阳湖流域水资源量预测. 安徽农业科学, 2017, 45(8): 53-54, 73.]
- [46] Fan SY. The impact of the river-lake relationship changes on the hydrological and hydrodynamic conditions of Poyang Lake [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2018. [范少英. 江湖关系变化对鄱阳湖水文水动力的影响研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2018.]
- [47] Chen W. Study of Poyang Lake water environment carrying capacity and pollution management mechanism [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2010. [陈巍. 鄱阳湖水环境承载力及污染管理机制研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.]
- [48] Liu L, Wang GY. Trend analysis of water quality and main pollutants in Poyanghu Lake. *Water*, 2016, 36(3): 61-64, 96. [刘恋, 王国英. 鄱阳湖水环境质量及主要污染物变化趋势分析. 水文, 2016, 36(3): 61-64, 96.]