

生态适应性协同方法及其应用

胡振鹏¹

(南昌大学 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330029)

【摘要】: 利用现代科学技术分析了我国古代成效卓越的水利工程和现代生态经济成熟模式的原理与方法, 提出生态适应性协同调控方法。基于对生态系统内部运行机制的认知, 采用适当的工程或非工程措施, 改善系统与环、增强生态系统某一方面机能, 实现静态协同性, 提升生态系统服务功能; 针对生态系统内部未了解的运行机制或所处环境的不确定性, 调控措施经过“试验式实施—监测观察—效果评估—调控措施优化—再实施”的动态协同性过程, 逐步寻求最适宜的调控方案, 取得经济—社会—生态环境效益的协同统一。针对鄱阳湖湿地修复保护, 应用生态适应性协同方法, 研究了鄱阳湖枯水期水位过程调控的手段、方法和基本原则, 提出了现阶段枯水期水位过程调控方案。

【关键词】: 湿地生态系统 调控技术 适应性 协同性 可持续发展 鄱阳湖

【中图分类号】: Q147 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)08-1712-11

为了有效利用自然资源、保护生态环境、实现绿色发展, 长期以来世界各国进行了不懈探索, 不断提出实现路径及相应技术。早在 1980 年代初期, 我国科学家提出了生态经济思想, 其核心是生态整合相关生产部门或环节, 使经济与生态环境协调发展^[1,2]。生态经济的推广应用, 产生了许多有效模式, 如循环经济模式、物质和能量多层利用模式、生物互利共生模式等^[3,4]; 并使得生态经济的内涵和外延不断扩展, 有力地推进了绿色发展和生态文明建设^[5]。在水资源开发利用和水环境保护方面, 2004 年董哲文提出了生态水利工程的, 生态水利工程是“在满足人类社会需要的同时, 兼顾水生态系统健康可持续性需求的原理和技术方法”^[6,7]。生态水利工程概念得到学术界和工程技术界的关注和重视^[8,9]。崔保山等认为, 生态水利是研究流域或区域水与相关生态系统(河流、湖泊、沼泽湿地等)关系的一门交叉性应用基础学科, 重点研究水资源开发利用与生态系统良性循环的相互作用关系以及生态系统受扰后的生态修复理论、方法和技术^[9]; 主要研究领域包括: 水与生态系统的相互作用、水利工程的长期生态效应、河湖连通与湿地水系网络构建、受损生态系统的恢复、生态需水与生态补水、水库生态调度、生态补偿、流域生态系统健康等 8 个方面^[9]。

2008 年, 世界银行提出基于自然的解决方案(NBS)的概念, 其含义是“通过与自然合作而不是对抗, 以平衡自然系统的方式管理自然系统, 从而实现弹性、资源高效和绿色经济”^[10,11]。在欧洲共同体的推动下, 基于自然的解决方案在水资源管理、湖泊治理、污染控制与富营养化防治、减缓城市内涝灾害、流域和矿山生态修复、防洪^[12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22]等许多领域得到应用。Barbara Sowińska-Swierkosz 等^[10]分析 970 份 2021 年 2 月以前公开发表的文献后认为, 基于自然解决方案的干预措施应该包含 4 个核心特征: (1) 受到自然启发或以自然为动力; (2) 应对社会挑战并解决问题; (3) 提供多种服务功能, 包括获得生物多样性; (4) 具有高效性和经济效益。日本东北大学提出有关“生态适应性科学”理论和技术体系^[23]; 他们认为, 生态适应性科学充分利用生物和生态系统固有的适应能力, 将传统“被动”治理生态环境的技术转变为“主动”适应性技术, 以实现可持续发展目标; 技术体系包括: (1) 揭示适应性科学的基础理论; (2) 开发有助于各种产业和生态系统管理的适应性技术; (3) 建立面向适应性技

作者简介: 胡振鹏(1948~), 男, 教授, 主要研究方向为水文学与水资源、系统工程和生态学。E-mail:6222136@126.com
基金项目: 国家自然科学基金项目(41261053)

术的社会经济体系^[23]。

进入 21 世纪以后，人类对生态系统内在规律的认识不断深化。运用现代科学技术剖析我国古代成效卓越的水利工程和现代生态经济成熟模式，梳理其中蕴含的生态调控原理与方法，在此基础上总结、提炼出科学可靠、稳健有效的生态系统调控方法或技术，对促进绿色发展和生态文明建设具有重要的理论和实践价值。

1 生态适应性协同方法

1.1 成功案例剖析

“天人合一”“法道自然”是中国传统文化的核心理念。儒家倡导“畏天命、知天命”，认识和掌握自然规律、尊重自然规律；荀子主张“制天命而用之”，在掌握自然规律的基础上利用它为人类谋福利。秉承这些理念，在生产水平不发达的条件下，我国劳动人民顺应自然规律，从事物整体着眼、从调理功能着手，因地制宜，因势利导，采用简单措施调节自然系统，建设了许多卓越的工程，如都江堰、灵渠等，至今还在发挥效益；明代潘季驯提出的“束水攻沙、蓄清刷黄”治河理念一直影响至今。运用现代科学技术，剖析这些成功案例的技术原理和调控方法，为提炼出科学有效的生态调控方法提供启发。

(1) 山区河流梯级堰坝系统

在季风气候影响下，我国南方丰水季节暴雨集中，山区河道来水多，山洪暴发；暴雨之后，水位消落，河道干涸，生产生活用水缺乏。丰水期虽然大量的有机碎屑进入山区河流，由于水流速度快，有机碎屑无法停留和分解，水体呈现贫营养状态，河道中只有一些藻类附着在岩石、砂粒表面，几乎没有大型植物；浮游动物和鱼类生存不易生存，仅有少数两栖动物和小型底栖动物，生物多样性水平极差。

为了解决暴雨之后的生产生活用水问题，劳动人民就地取材，用卵石逐级构建堰坝(图 1)。堰坝的上游形成水塘，水流以跌水或瀑布从堰顶下泄，下游河床冲刷成深潭。水塘和深潭不仅提供灌溉用水和生活用水，而且具有防洪和生态效益：山洪暴发时，水塘和深潭储蓄一定洪水、堰坝延缓了洪水下泄时间，减少干流洪峰流量、推迟了洪峰出现时间；水塘和深潭蓄水时，流速变慢，有利于有机碎屑聚集，被细菌、藻类分解，增加了水体中氮磷等营养物质，为水生植物发育创造了栖息条件和营养来源；水生植物群落的形成，又为浮游生物、底栖动物和鱼类提供了食物和栖息环境，显著改善了山区河流生物多样性。



图 1 江西婺源山区河流的梯级堰坝系统

用生态学原理分析，梯级堰坝系统对山区河流水生态系统的调控，主要是通过改变河流生态系统所处环境条件，为生物群落

发育营造栖息地和提供营养物质。

(2) 都江堰工程的分水排沙功能

都江堰水利工程位于成都平原扇形三角洲顶部的岷江干流上，是一座两级分水、两级排沙的无坝引水工程。公元前 256~251 年间，李冰父子率领劳动人民修建。工程有意布置在岷江出山口的一个弯道上(图 2A)，利用河流弯道水流特性，科学确定都江堰鱼嘴、宝瓶口和飞沙堰的位置及规模，自动实现引水、分洪和排沙。其中最精巧的是宝瓶口和飞沙堰的协同作用^[24]。

经过都江堰鱼嘴第一次分流以后，内江的水流至宝瓶口时口门突然束窄(图 2B)，如果没有飞沙堰，水流流速减慢，水位上涨，泥沙沉淀。在宝瓶口右侧设置飞沙堰后，为水流提供了一个侧向出口，水流在宝瓶口受阻产生的势能转变为动能，弯道螺旋流侧向流速增大、动能增加，水流中下层泥沙含量高，在弯道螺旋流的自组织作用下，形成宝瓶口正面引水、飞沙堰侧面分洪与排沙的态势(图 2B)，只要飞沙堰不高，泥沙随着水流自动排到外江去了。引水充足、防洪安全和排沙有效就这样统一在弯道水沙运动过程中^[24]。从系统功能调控的角度看，都江堰工程充分利用自然规律，用简单的工程措施因势利导，发挥流弯道水沙运动自组织、自适应机制，化不利为有利，把引水可靠、防洪安全和排沙有效和谐地统一在水沙运动中。

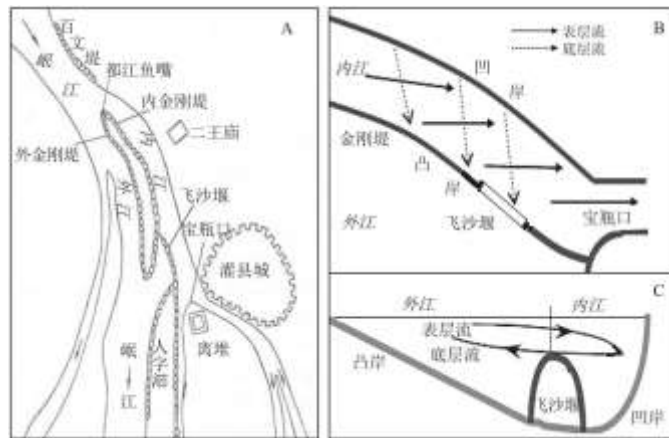


图 2 都江堰工程及宝瓶口和飞沙堰的引水、分洪和排沙原理

古人并没有掌握水沙运动的规律，都江堰精巧的引水、分洪和排沙机制不是一次性形成的^[24]。都江堰工程很早就有严格的“岁修”“大修”和“抢修”制度，每一次岁修人们都希望通过改变都江堰鱼嘴和飞沙堰的位置和规模(高度、宽度)使宝瓶口引水量最大，以满足不断增长的用水需求，如果这次改变成功了，这些措施就固定下来；如果失败了，“抢修”“岁修”时再来修正。“深掏滩、低作堰”的严格定量标准则经过了长期的探索才得以确定^[24]。在生产力不断发展的推动下，在追求工程最佳效益的不懈探索中，经过实践的反复检验，都江堰逐步找到了工程设施最适宜的位置，最完善的结构，最恰当的规模；确定了分水排沙的定量控制标准，社会、经济和生态环境等方面呈现出最佳性能和无限生命力。

(3) 生态农业的“猪—沼—果”模式

1980 年代，赣南农民开发丘陵山区、发展脐橙产业，创建了猪—沼—果生态农业模式，将养猪、脐橙种植和生活结合在一起，人、畜粪便在沼气池发酵，产生的沼气可以烧饭照明，解决家用能源，减少了温室气体排放；沼液和沼渣给果树、粮食和蔬菜施肥，提高了肥料利用率，减少了氮、磷等营养物质对土壤和水体的污染；在粪尿发酵过程中，杀死寄生虫虫卵，改善了卫生条件(图 3)^[25]。这一模式深受农民欢迎，农业部作为发展生态经济的南方模式加以推广。

“猪—沼—果”生态农业将养殖和种植业、生产和生活等环节耦合在一起，通过建设沼气池，引进沼气菌群，在厌氧环境中分解人畜粪尿，收集沼气，和传统种养模式相比，人为地强化了生态系统的分解功能，使人畜粪尿等有机物充分分解，有利于农作物吸收，产生的沼气收集利用，取得了良好的经济、社会和生态效益^[26]。沼气菌群至少包括 100 多种细菌，细菌种类、作用过程和相互作用关系至今尚未完全掌握^[25]。当时，为了获得高效的沼气菌群，农技人员进行了大量调研和监测，从一些产气量较高的农户沼气池里提取沼泥，按不同比例配方后，拿到实践中去检验，经过不断试错，终于找到高效率的沼气菌群。

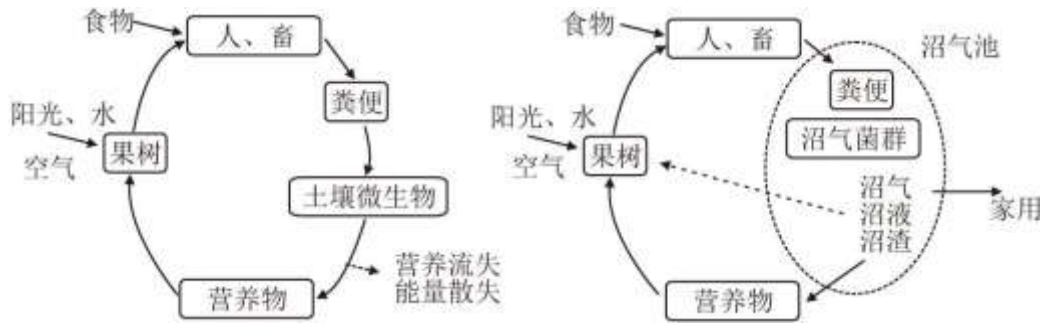


图 3 传统种养模式(左)和“猪-沼-果”模式(右)

从 3 个案例可以看到，如果了解生态系统动力机制与系统结构与演变的关系，可以采取一定的措施调控某一方面的机能，促进系统向提供更多更好的生态服务功能方向发展；即使对系统动力机制与系统状态与演变关系不十分明确，也可以通过试错法不断实验修正，最后取得较好的调控效果。

1.2 生态系统的动力机制

生态系统是一定空间范围内所有生物与其环境相互作用而形成的动态系统，外部环境决定生态系统生存和发育条件。生态系统具有多方面的动力机制，在这些动力机制推动下，生态系统不断发育、生长、完善和演进，从而提供生态服务功能。如图 4 所示，生态系统中的生产者利用太阳能和营养物质进行初级生产，通过食物链将物质与能量传递给消费者，还原者将动植物残渣进行分解，各类生物和非生物组分通过网络连通起来，进行能量传递和物质循环，促进生态系统不断发育、演进。生态系统通过细胞、器官、生物个体、种群、群落等层次组织起来；较低层次具有丰富多彩特性和功能，通过自组织在高一层涌现出较为宏观的综合属性。生态系统具有自我调节功能，在生物个体、种群、群落等不同层次上竞争、适应、优胜劣汰，不断进化，产生了丰富的多样性，具有较强的适应、缓冲和修复能力^[26, 27]。

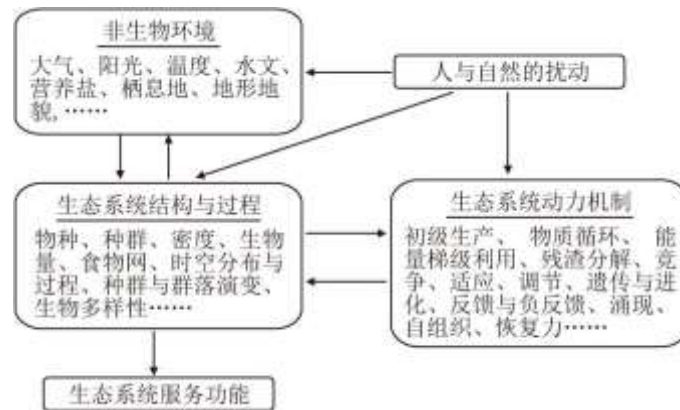


图 4 生态系统的结构与动力机制

1.3 生态适应性协同方法

随着对生物学和生态系统科学认识的深化，运用现代科学技术，对我国古代成效卓越的水利工程和现代生态经济成熟模式进行研究分析，探究成功原因、运作原理和内在机制，据此提炼出生态适应性协同方法。

对于明确掌握系统与环境关系、系统内部相互作用动力机制的生态系统，从人与自然的整体关系出发、从调理系统整体功能着手，遵循自然规律，采用一定的工程或非工程措施，对已认知的系统可控变量或动力机制进行适当调控，如改善生态系统的环境、强化生态系统某些动力机制，调整系统的局部结构，强化有利因素、改造不利条件，充分发挥生态系统自组织、自适应作用，实现系统与所处环境协调统一、动力机制和谐高效，系统结构与过程更符合自然规律，达到增强生态系统服务功能的目的，实现经济、社会和生态环境效益的协调统一。这一过程称为静态协同性。

由于生态系统环境变化存在不确定性，人类对生态系统内在规律的认识并不完全充分，最佳的系统调控策略难以一次性确定，需要通过“调控—观察监测—效果分析—方案修正—再调控”的动态循环过程不断修正与完善。这一过程称为动态协同性(图5)。

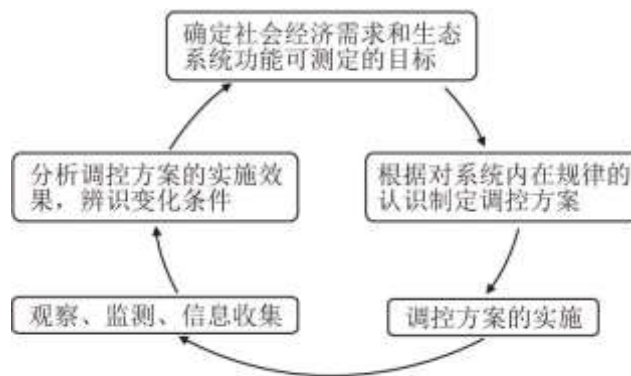


图5 动态协同性过程

应用生态适应性协同方法解决实际问题，3个环节特别重要：(1)对系统整体性的理解：对系统及环境、系统内部相互关系有较为清晰的理解，对系统运行目标有切实的认识；(2)对调控措施有效性的把握：调控措施能够稳定地提高效率、完善功能；(3)调控效果定量化：系统目标与效率能够度量，系统结构与过程协调性可以衡量。

1.4 生态适应性协同方法的特点

生态适应性协同方法适用于对内部运行机制具有一定认知、但不完全了解或面临外部不确定性的复杂系统。生态适应性协同方法的本质是尊重自然规律、在自然现象认知的范围内，按照系统运行机制进行谨慎的、有节制的调控，增强部分环节的功能，通过系统自组织、自适应机制来优化组分之间的关联性，实现静态协同；另外通过反馈循环，形成不断学习、修正和完善的调控过程，适应生态环境变化和目标的改变或偏移，实现动态协同；逐步取得经济、社会和生态环境效益的协调统一。从方法论角度总结，具有3个特点。

- (1)整体指导下的还原，还原基础上的整合；系统分析和实践模拟相结合，系统调控和系统学习相结合。
- (2)将刚性干预转变为柔性调控：调控措施具有一定弹性，适应系统的自组织、自适应功能；可以不断修正。

(3)将知识管理转变为知识创新：以监测、评估为基础，“摸着石头过河”，不断学习，深化对系统运行机理的理解与认知。

2 保护鄱阳湖湿地健康的生态适应性协同方法

2.1 鄱阳湖湿地出现退化趋势

鄱阳湖是我国最大的淡水湖。是一个水体流动浅水湖泊，水资源丰富，平均每年流入长江水量达 $1480 \times 10^8 \text{m}^3$ ，以长江流域 9% 的流域面积向长江干流输送了 16.7% 的水量。受季风气候影响，鄱阳湖“丰水是湖、枯水似河”，丰水期呈现大型湖泊景观，水生动植物种类多、生物量大；枯水期呈现湖泊—河流—洲滩景观，湿地生物门类齐全，是东亚地区越冬候鸟的主要栖息地。鄱阳湖湿地是长江中下游水资源、水环境和水生态的绿色屏障。

2003 年以后，由于长江上游水库蓄水运行，加上清水下泄、长江干流河床冲刷严重，鄱阳湖湿地生态系统出现退化趋势，主要表现在以下 5 方面。

(1) 湖水位持续低枯：

2003 年以后，鄱阳湖区枯水出现时间提前、枯水期延长、最低枯水位屡创新低。如图 6 所示，就多年平均而言，2003 年以后比 2003 年以前“河相”与“湖相”分界水位 10m(1985 国家高程)平均提前 30d 出现，极端枯水位 8m 平均延长 14d。按照月平均计算，湖区水位站各月平均水位均比 2003 年以前降低 0.06~2.52m，其中湖口、星子、都昌、棠荫和康山站 10 月分别降低 2.52、2.45、2.41、2.02 和 1.38m。

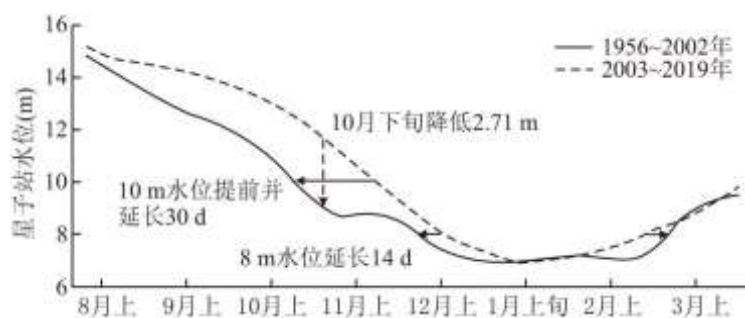


图 6 1956~2002、2003~2019 年鄱阳湖星子站旬平均水位比较

(2) 湖泊水体总磷浓度较高：

2003 年以前年平均总磷浓度为 0.017~0.033mg/L，2006~2018 年总磷浓度在 0.062~0.110mg/L 之间，2018 年彻底整治湖区无序采砂等人类活动后，总磷浓度维持在 0.07mg/L 左右。

(3) 沉水植被退化：

主要表现在沉水植被面积比 1980 年代减少 38%；生物量由 1980 年代的 1921 减少到 1328g/m²；沉水植被群落组成物种简单化，生物多样性减少；优势物种改变等方面^[28]。

(4) 候鸟栖息地承载能力下降：

浅水水域和沼泽面积减少,越冬水鸟栖息地面积缩减、质量下降。越冬候鸟结构发生变化,雁类、鹭类候鸟比例上升,鹤类、鸭类候鸟比例下降。1998~2015年湖区候鸟栖息数量超过 10^4 只的觅食地平均每年有8.5处;2016、2018年仅2处,2017、2019年0处;2016年开始,越冬候鸟分散到湖泊周边农田、藕塘、鱼池觅食^[29]。白鹤食物结构改变,稻谷占34%、莲藕占23%、紫云英11%,传统食物苦草块茎仅占2%^[30]。

(5)生态服务功能削弱:

新中国建立以来陆续在鄱阳湖区建有共有72个城镇自来水厂、273座提灌站,这些设施的取水口高程都与当时湖水位相适应。2003年以后,湖水位持续低枯导致大多数城镇自来水厂取水不足,都昌、星子县自来水厂不得不择址新建;9、10月正是晚稻拔节、扬花、灌浆的关键时期,灌溉取水困难, $15 \times 10^4 \text{hm}^2$ 农田的灌溉保证率下降到50%以下,每年损失粮食数亿斤。

2.2 生态适应性协同方法保护鄱阳湖湿地健康的原则

鄱阳湖湿地生态系统是一个复杂系统,内部组分相互影响以及外部环境作用机制复杂。如图7所示^[31],浮游生物、水生植物、底栖动物、鱼类和鸟类等种群的相互作用、相互制约、相互影响关系列在中间;自然环境变化(像气候变暖等缓慢变化的自然因素未列出)和人类活动对湿地生态系统影响及其途径列示在两边。2018年整顿取消了湖区采砂、酷渔滥捕、捞螺捕蚌、肥水养鱼等人类活动,2020年开始“十年禁渔”,控制入湖污染负荷和碟形湖管理是长期的管理任务。自然环境变化主要体现在水文情势改变,对于流动水体浅水湖泊而言,湖水位是关键因素,直接影响到水动力过程和水化学、水环境^[32]。

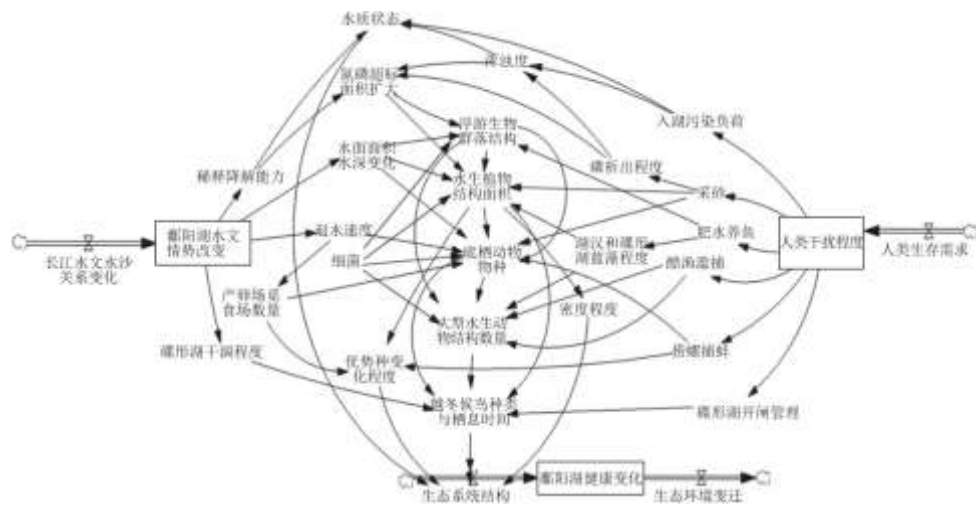


图7 鄱阳湖湿地生态系统内部组分相互影响及外部环境作用机制

鄱阳湖是一个通河达江的流动水体浅水湖泊,湖水位受到赣江等五河入湖流量和长江干流流量的双重影响。星子站水位 H 与长江汉口站流量 Q_1 和五河入湖流量 Q_2 的定量关系为: $H=0.0002524Q_1+0.0003106Q_2+4.326$ ^[31]。通过增加五河入湖径流和长江流量,把枯水期水位提高到2003年以前水平,可能不具备这样的气候条件。因此,抬高湖水位需要实施一定的工程措施——修建鄱阳湖水利枢纽工程。

鄱阳湖湿地生态系统的结构和演变对水位变化及其敏感^[31]。应用生态适应性协同方法保护鄱阳湖湿地健康的思路是,以鄱阳湖水利枢纽工程为调控手段,科学调控枯水期水位过程,使水位变化适应各类生物物种生长发育的时间节律,改善生湿地生态系统演进所需的水环境条件,遏制湿地生态系统退化趋势,利用湿地生态系统自适应、自组织、自修复机制,辅之以控制入湖污染负荷、科学利用湖区资源等措施,保护和恢复鄱阳湖湿地生态系统健康。

长江和鄱阳湖相互影响、相互依存，鄱阳湖在维护长江中下游水资源、水环境和水生态安全方面具有重要地位，调控鄱阳湖枯水期水位过程，必须坚持以下原则。

(1) 扬长补短，调枯不控丰

鄱阳湖主汛期为 4~6 月，长江主汛期 7~9 月；受长江顶托，鄱阳湖对长江中下游防洪安全起到重要作用。有关部门利用 1953~1998 年发生的 13 场洪水资料计算，鄱阳湖平均每次对入湖洪水的调蓄总量为 $143.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，相当于储蓄了流域一次洪水总量的 1/3；长江遭遇洪水时，由于倒灌和顶托作用，鄱阳湖可以削减长江洪水流量 $15450 \text{ m}^3/\text{s}$ ，削减率约 20%^[33]。鄱阳湖的这些蓄洪功能在长江流域防洪安全中无法替代，不能因建闸使这一功能受到损害。

另一方面，江湖连通是江河湖泊健康的重要保障之一。每年通过湖口流出或进入的水量、泥沙、污染物和四大家鱼过程如图 8 所示。4~8 月倒灌入湖水量占全年 64%、出湖泥沙占 47%、出湖总氮、总磷分别占 62.2% 和 61.0%、入湖四大家鱼占 95%。为了保持江湖连通，发挥鄱阳湖在长江防洪中的重要作用，丰水期 4~8 月闸门全开，不进行调控，仅 9~次年 3 月枯水期利用闸门进行水位调控。

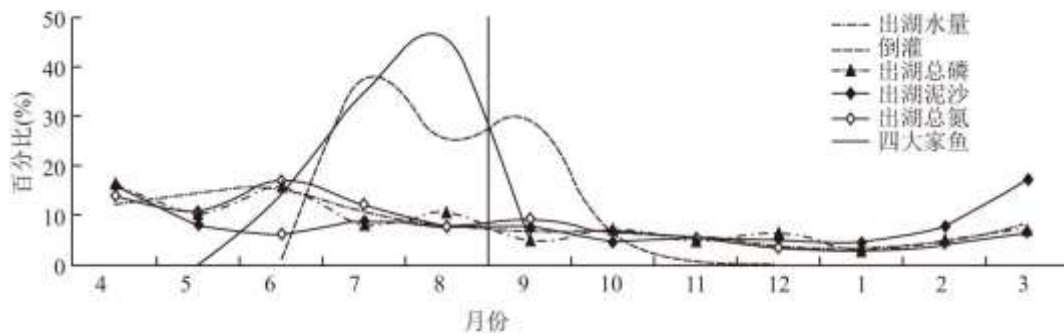


图 8 湖口几类物质和生物进出湖时程分布

(2) 枯水调控，江湖两利

枯水期水位调控尽可能做到江湖两利。9 月初长江处于主汛期时，抓住鄱阳湖洪水“尾巴”适当蓄水；长江上游水库蓄水期间鄱阳湖加大流量下泄，增加长江流量。

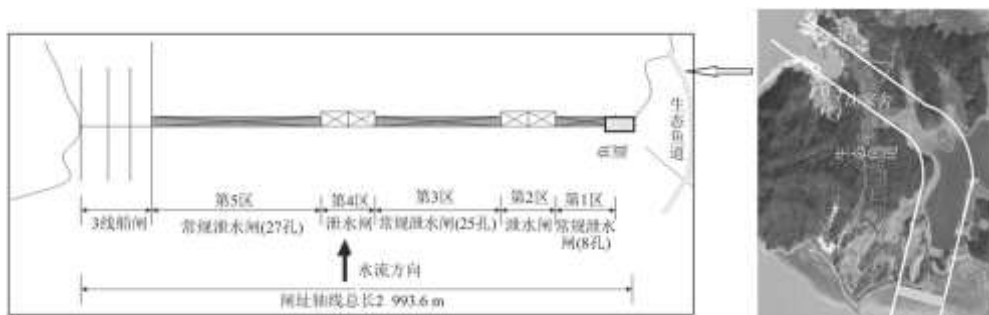


图 9 鄱阳湖水利枢纽工程建筑物布置示意图

2.3 鄱阳湖水利枢纽工程建筑物布置

根据调控原则, 枢纽主要由泄水闸构成, 为了便于航运, 左岸布置 3 线船闸, 右岸布置 3 条鱼道, 便于浅水、中水和深水鱼类 9 月至次年 3 月进出湖; 利用右岸屏峰山中间的湖汊, 开挖一条仿河流生态鱼道, 宽 120m、长 2000m, 进水口采用卧式平板闸门控制, 4~8 月闸门平卧在闸室底部, 无障碍沟通闸门上下游, 便于长江江豚进出湖; 9 月蓄水时闸门竖立挡水。图 9 是枢纽布置示意图。

3 枯水期水位过程的科学调控

枯水期鄱阳湖水位过程调控是运用生态适应性协同方法恢复和保护鄱阳湖湿地健康的关键。虽然现在对鄱阳湖湿地生态系统的结构、物种分布、演变过程及其相互作用机理有了一定的认识, 但并未完全掌握内在规律和演变趋势, 外部环境的变化还存在不确定性, 枯水期水位调控过程不是一次性完全确定。通过“初始调控方案—实施—观察监测—修改调控方案—再实施”的动态过程, 逐步确定最优水位调控方案。在这一过程中, 初期实施的调控方案特别重要, 如果不切合鄱阳湖生态系统实际, 不仅今后多走弯路, 甚至会对生态系统产生新的损害。

3.1 鄱阳湖水利枢纽工程初期运行枯水期调控水位

根据长江大保护要求, 当前阶段鄱阳湖湿地生态系统的保护目标是: 恢复鄱阳湖自然水文节律和湿地生态系统所需的自然环境, 有效遏制鄱阳湖湿地退化趋势, 不搞大开发。标志性指标包括: 恢复到 2003 年以前的水文状态, 湖泊水体总磷浓度保持在 0.06mg/L 左右; 沉水植被群落保持苦草为优势物种、底栖动物群落以螺蚌为主体; 考虑“十年禁渔”的积极效应, 湖区栖息觅食的长江江豚数量比 2015 年有所增加; 鹤类、鸕类、天鹅类和鸬鹚类等越冬水鸟栖息地承载力增强, 藕田稻田白鹤逐步回归鄱阳湖区等。

鄱阳湖湿地生态系统经过一千多年的进化, 各类物种经过竞争、适应、进化形成了适应鄱阳湖水文节律和演变特征的生态位、生长发育时间节律及其特性, 生物种群之间也形成了较为稳定的竞争、协同、共生和演进关系。按照遵循自然规律的原则, 初期运行枯水期水位过程调控恢复到 2003 年以前枯水期多年平均水位过程。

下面以主湖区为对象, 以几种有代表性的生物物种、种群和生态服务功能为例, 分析鄱阳湖枯水期初期调控水位能否实现初期调控目标。图 10 中间的 A 是鄱阳湖湿地卫星遥感影像, 椭圆形虚线框内属于主湖区, 从北到南地表高程约 11~12m^[34], 这一区域比较典型地体现鄱阳湖“高水是湖、枯水似河”的景观特征, 湖水位高于 10m 从河道开始漫滩, 11m 草洲开始淹没, 超过 12m 呈现大湖景观, 丰水期是沉水植被、螺蚌等底栖动物和鱼类的主要栖息地; 枯水期呈现草洲—河流—沼泽地貌景观, 湿生和沼生植被发育, 是越冬候鸟和兽类的重要栖息地。图中的虚线代表 1956~2002 年平均水位过程, 实线为 2003~2019 年平均水位过程(现状)。

(1) 豆雁是鄱阳湖越冬候鸟中数量最多的物种, 豆雁以洲滩出露 10~20d 后的鲜嫩藁草茎叶为食^[35]。藁草分布在主湖区边缘高程 14m 以上地带, 2003 年以后 8 月中下旬 14m 洲滩已经出露, 10 月初豆雁来到鄱阳湖时, 藁草生长将近 50d, 已经老化, 豆雁无法食用。2003 年以前 14m 洲滩到 9 月中旬出露, 豆雁来到时正好 20d 左右(图 10B), 适宜豆雁取食。

(2) 鄱阳湖第二次科学考察结果显示, 生活在连续水淹时间少于半年水域中的底栖动物种群结构不稳定、生物量较少^[31]。如图 10C 所示, 2003 年以后主湖区 11m 水域连续水淹时间仅 5 个月; 2003 年以前 12m 水域水淹时间超过 6 个月, 2003 年以前的水位过程更有利于底栖动物生长繁衍。

(3) 沉水植物 4 月开始萌芽发育, 10 月底完全成熟^[31]。如图 10D 所示, 2003 年以后 9 月下旬 12m 洲滩开始出露、10 月上旬 11m 洲滩出露, 也就是说, 沉水植物没有完成生命周期主湖区已经干涸了。2003 年以前 9 月底 12m 地带没有露滩, 保证了沉水植物完整地完成生命周期。

(4) 鄱阳湖周边灌溉泵站进水口地板高程一般在 10~15m 之间, 9、10 月是晚稻需水高峰期。2003 年以后由于水位低枯, 约有一半以上泵站无法取水, 2003 年以前灌溉保证率则达到 80%以上(图 10E)。

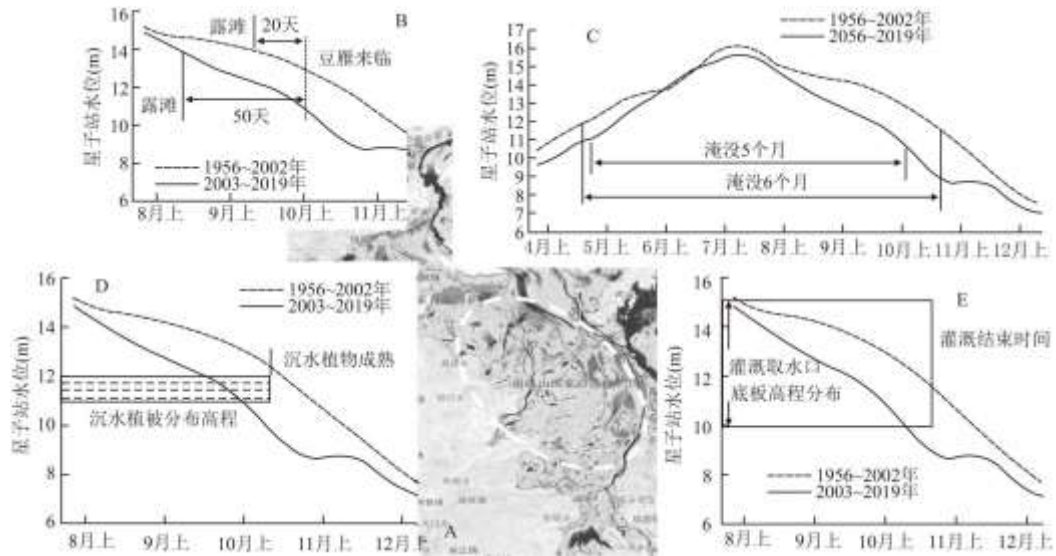


图 10 主湖区主要物种与水位的协同性分析

多年平均水位的分析说明, 鄱阳湖水利枢纽工程初期运行按照 2003 年以前平均水位过程调控可以达到调控目标。水文过程是一个随机过程, 生态学中有“中度扰动生物多样性更丰富”的说法, 在工程设计中, 遭遇到丰水年或枯水年, 水位过程调控在多年平均水位上下浮动。按照因篇幅所限, 浮动情况就不一一叙述。

3.2 枯水期水位调控过程及其效果

用图 11 来说明鄱阳湖水利枢纽工程运行初期枯水期水位调控过程及其效果。图中, 实线代表枯水期水位调控过程线, 即星子站 1956~2002 年平均水位过程线; 虚线是星子站 2003~2019 年平均水位过程线(下文称为“现状”)。调控过程分为 5 个阶段。

(1) 敞泄期:

根据“调枯不控洪”的原则, 4~8 月闸门全开, 来多少水泄多少水, 江湖自由连通。

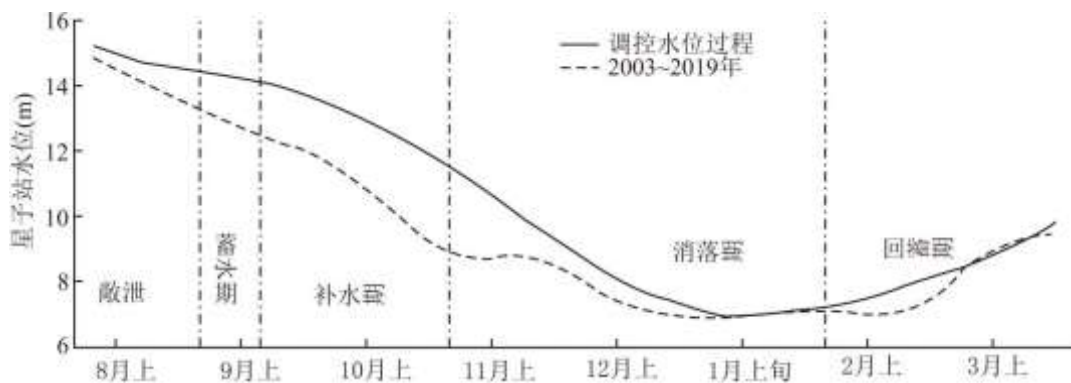


图 11 鄱阳湖水利枢纽枯水期水位调控过程

(2) 蓄水期:

长江上游水库 9 月 10 日开始蓄水, 水流从宜昌流至湖口约需 10d, 即是说上游水库蓄水影响到 15 日尚未在湖口显现, 鄱阳湖水利工程 9 月 1~15 日下闸蓄水。从现在的 13m 蓄到 14.2m, 蓄水量 $28 \times 10^8 \text{m}^3$, 鄱阳湖出流减少 $2140 \text{m}^3/\text{s}$, 9 月 1~15 日进入鄱阳湖流量多年平均约 $6000 \text{m}^3/\text{s}$, 长江干流汉口站多年平均流量 $33900 \text{m}^3/\text{s}$, 湖口出流减少量占长江平均流量的 6.31%; 鄱阳湖工程下泄流量达 $3000 \text{m}^3/\text{s}$, 对闸下河段航运、取水、鱼类和长江江豚洄游不会产生明显影响。

(3) 补水期:

9 月 16 日加大流量下泄, 按照 2003 年前的平均水位过程 10 月 31 日下泄至 12.3m。下泄水量约 $40 \times 10^8 \text{m}^3$, 与现状相比, 9 月 16~10 月 31 日平均增加流量 $1470 \text{m}^3/\text{s}$ 。2003~2020 年此阶段上游水库蓄水, 汉口平均流量 $23100 \text{m}^3/\text{s}$, 鄱阳湖工程可以增加长江干流 6.4% 的流量。

(4) 消落期:

11 月 1 日至 1 月 31 日, 按照 2003 年以前平均水位过程消落, 1 月中旬达到年最低水位。这一阶段鄱阳湖出流比现在增加 $160 \text{m}^3/\text{s}$, 对于流有利。

(5) 回蓄期:

2 月日~3 月 31 日, 按照 2003 年以前平均水位过程逐步蓄水, 与 4 月 1 日开闸平稳相衔接, 鄱阳湖出湖水流与现状基本相同。

从鄱阳湖水利枢纽工程枯水期调控过程可知, 枯水期水位调控遵循鄱阳湖的自然消落规律, 适应湿地生态系统各类生物生长发育的时间节律和栖息环境要求, 同时存在在长江干流流量较小时进行补水, 可以实现“江湖两利”。

4 结束语

利用现代科学技术分析了我国古代成效卓越的水利工程和现代生态经济成熟模式的原理与方法, 提出生态适应性协同调控方法。基于对生态系统内部运行机制的认知, 采用适当的工程或非工程措施, 改善系统与环境、增强生态系统某一方面机能, 实现静态协同性, 提升生态系统服务功能; 针对生态系统内部未了解的运行机制或所处环境的不确定性, 调控措施经过“试验式实施—监测观察—效果评估—调控措施优化—再实施”的动态协同性过程, 逐步寻求最适宜的调控方案, 取得经济—社会—生态环境效益的协同统一。

为了探索复杂系统调控的有效途径, 以鄱阳湖湿地修复保护为目标, 应用生态适应协同方法进行了一些探索。将鄱阳湖湿地修复保护放到长江大保护的框架内, 研究了通过调控鄱阳湖枯水期水位过程, 使其适应湿地生物各物种的生长节律、改善生态系统发育演进的外部环境、促进湿地生态系统自我修复的可行性及其实现途径; 论证了鄱阳湖枯水期水位调控的初期方案及其效果。目的是听取批评和意见, 期望得到帮助和支持。

参考文献:

-
- [1]于法稳. 中国生态经济研究:历史脉络、理论梳理及未来展望[J]. 生态经济, 2021, 37(8):13-22.
- [2]王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3):317-328.
- [3]谢海燕. 绿色发展下循环经济的现状及方向[J]. 宏观经济管理, 2010(1):14-21.
- [4]李金才. 我国生态农业模式分类研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5):1275-1278.
- [5]周宏春, 管永林. 生态经济:新时代生态文明建设的基础与支撑[J]. 生态经济, 2020, 36(9):13-24.
- [6]董哲仁. 试论生态水利工程的基本设计原则[J]. 水利学报, 2004(10):1-7.
- [7]董哲仁. 生态水利工程学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [8]孙宗凤. 生态水利的理论与实践[J]. 水利水电技术, 2003(4):53-55.
- [9]崔保山, 刘康, 宋国香, 等. 生态水利研究的理论基础与重点领域[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1):10-18.
- [10]SOWIŃSKA-ŚWIERKOSZA B, GARCÍA B J. What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification ScienceDirect[J]. Nature-Based Solutions, 2022, 2:100009.
- [11]SEAN O' HOGAIN, LIAM MCCARTON. 基于自然解决方案的技术指南和典型案例——水资源管理的创新[M]. 罗鹏, 等译. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [12]CAMINO L. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits[J]. Ecosystem Services, 2016, 22(Part B):392-401
- [13]PANAGOPOULOS Y, DIMITRIOU E. A large scale naturebased solution in agriculture for sustainable water management: The Lake Karla case[J]. Sustainability, 2020 12(17):6761.
- [14]周伟奇, 朱家菡. 城市内涝与基于自然的解决方案(NbS)研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(13):5137-5151.
- [15]张剑. 基于自然解决方案的流域生态修复成效评估研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12):69-72.
- [16]常俊杰, 刘乐. 基于自然解决方案的矿山生态修复[J]. 科技创新与应用, 2022(3):107-109.
- [17]ÁLVAREZ-ROGE J, BARBERĀG G, MAXWELL B, et al. The case of mar menor eutrophication: State of the art and description of tested Nature-Based Solutions[J]. Ecological Engineering, 2020, 158(1):106286.
- [18]徐兴良, 于贵瑞. 基于生态系统演变机理的生态系统脆弱性、适应性与突变理论[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3):623-628.
- [19]FRANCIS TURKEL BOOM et al. How does a nature-based solution for flood control compare to a technical

solution?Case study evidence from Belgium[J].Ambio,2021,50:1431-1445.

[20]ZHANG C.The River Park on the living shoreline of the Ganjiang River:A nature-based solution to ecological restoration of riverfront landscape[J].Landsc.Archit.Front.,2020,8(3):114-129.

[21]CHEN W,MULLER P,GRABOWSKI R,et al.Green nourishment:An innovative nature-based solution for coastal erosion[J].Frontiers in Marine Science,2022,8:814589.

[22]王振霖. 基于自然解决方案的国际经验及其对河流生态保护的启示[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(8):9-14.

[23]日本东北大学生态适应性科学全球卓越研究中心. 生态适应性科学——活用自然机制, 开拓可持续未来[M]. 李伟, 等译. 北京:科学出版社, 2021.

[24]胡振鹏. 流域综合管理的理论与实践——以山江湖工程为例[M]. 北京:科学出版社, 2010.

[25]胡振鹏, 胡松涛. “猪-沼-果”生态经济模式[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4):638-644.

[26]Sven Erik Jørgensen. 系统生态学导论[M]. 陆健健, 译. 北京:高等教育出版社, 2013.

[27]Sven Erik Jørgensen. 生态系统生态学[M]. 曹建军, 等, 译. 北京:科学出版社, 2017.

[28]胡振鹏, 林玉茹. 鄱阳湖水生植被 30 年演变及驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8):1947-1955.

[29]王文娟. 人工生境已成为鄱阳湖越冬白鹤的重要觅食地[J]. 野生动物学报, 2019, 40(1):133-137.

[30]侯谨谨. 鄱阳湖越冬白鹤在农业用地的食物组成[J]. 动物学杂志, 2019, 54(1):15-21.

[31]胡振鹏. 鄱阳湖水文生态特征及其演变[M]. 北京:科学出版社, 2020.

[32]PAUL K. 湿地生态学——原理与保护(第二版)[M]. 兰志春, 等译. 北京:高等教育出版社, 2018.

[33]熊大衍. 人工控制鄱阳湖的认识过程[M]. 南昌:江西科学技术出版社, 2016.

[34]纪伟涛, 葛刚, 李海辉, 等. 鄱阳湖——地形、水文、植被[M]. 北京:科学出版社, 2017.

[35]孟竹剑, 夏少霞, 于秀波, 等. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21):1-10.