

湿地公园建设对湿地生态系统韧性的影响 ——以南京长江新济洲国家湿地公园为例

杨雪姣¹, 张 军², 李全文², 庄 犁¹, 钟晶晶¹, 张汉朝^{3*}

(1. 南京朴厚生态科技有限公司, 江苏 南京 210033; 2. 南京长江新济洲国家湿地公园管理中心, 江苏 南京 211110;
3. 南京大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要:湿地公园能对湿地资源进行有效保护,是目前湿地保护管理的主要形式之一。该研究利用2020—2021年高频水质自动监测数据,分析不同时期湿地公园的水质状况,并基于生态系统稳态转换理论,计算时间序列的方差、自相关系数、回复率、变异系数等韧性指标,以探究国家湿地公园建设对南京长江新济洲湿地韧性的影响,为湿地公园的管理建设提供理论指导。结果表明:(1)2021年水体浊度和氧化还原电位显著高于2020年,2020年和2021年水体叶绿素a含量并没有显著差异。(2)从韧性指标来看,2021年水体浊度和氧化还原电位的方差、变异系数和时间自相关系数均小于2020年,同时回复率大于2020年;2021年水体叶绿素a的自相关系数显著小于2020年,回复率大于2020年。这些指标均表明新济洲湿地公园2021年系统韧性高于2020年。(3)从水体浊度的角度来看,新济洲湿地管理维护频率下降导致水体浊度增加,水质相对变差,但其韧性却在提高,表明相对较低的管理维护频率有助于提升系统韧性。该研究基于稳态转换理论分析了新济洲湿地公园的韧性,为湿地公园的建设提供了理论指导基础。

关键词:湿地公园;生态系统韧性;生境质量;生态系统评价;新济洲

中图分类号:Q178.1⁺1;Q178.1⁺2 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2023.02.004

Effects of wetland park construction on ecosystem resilience: Nanjing Yangtze River Xinjizhou National Wetland Park as an example

Yang Xuejiao¹, Zhang Jun², Li Quanwen², Zhuang Li¹, Zhong Jingjing¹, Zhang Hanchao^{3*}

(1. Nanjing Puhou Ecological Technology Co., Ltd., Nanjing 210033, China;
2. Nanjing Yangtze River Xinjizhou National Wetland Park, Nanjing 211110, China;
3. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: "Wetland park" is one of the main forms of wetland conservation and management at present. Based on the high-frequency automatic water quality data from 2020 to 2021, this study analyzed the water quality of wetland parks in different periods, and calculated the variance, autocorrelation coefficient, return rate, coefficient of variation based on the regime shift theory of ecosystem, so as to explore the influence of the construction of national wetland park on the resilience of Nanjing Yangtze River Xinjizhou Wetland to provide theoretical guidance for the management and construction of the Wetland Park. The results showed that: (1) Turbidity and ORP in 2021 were significantly higher than those in 2020, and chlorophyll a in 2020 and 2021 had no significant difference. (2) In terms of resilience indicators, the variance, coefficient of variation and autocorrelation coefficients of turbidity and ORP in 2021 were all smaller than those in 2020, and the return rate was higher than that in 2020. The autocorrelation coefficient of chlorophyll a in 2021 was significantly lower than that in 2020, and the return rate was higher than that in 2020. All these indicators indicated that the system resilience of Xinjizhou

收稿日期:2023-01-05;修回日期:2023-01-29

作者简介:杨雪姣(1984-),女,江苏无锡人,助理研究员,硕士。主要从事湿地生态学研究、湿地生态保护和修复技术研究。

* 通信作者:张汉朝(1998-),男,贵州毕节人,硕士研究生。主要从事景观生态学、生态系统韧性研究。

Wetland Park in 2021 was higher than that in 2020. (3) From the perspective of turbidity, the decrease of management and maintenance frequency of Xinjizhou Wetland led to the increase of water turbidity and the relative deterioration of water quality, but its resilience was improved, indicating that relatively low management and maintenance frequency was conducive to improving the resilience of the system. The resilience of Xinjizhou Wetland Park based on the regime shift theory was analyzed, which provides theoretical guidance for the construction of wetland park.

Key words: Wetland park; Ecosystem resilience; Habitat quality; Ecosystem assessment; Xinjizhou

湿地是一种独特的水陆交错生态系统,具有水源涵养、生物多样性保护、气候调节、碳储存等多种功能^[1],对人类的生存与发展起着至关重要的作用。自工业革命以来,由于人类活动的增强与气候变化,全球湿地急剧减少和退化,引发动物栖息地破碎、生物多样性下降、水质恶化等一系列问题^[2-3]。随着人类对湿地重要性的认识加深,湿地的保护管理逐渐成为研究者与政府机构重点关注的问题之一,各个国家积极开展湿地保护与管理工

作^[4-5]。湿地系统评价是检验湿地保护管理质量的重要手段,目前比较常用的评价方法有“增长缓冲区法”“空缺分析”“系统保护规划”等^[6-8]。但这些方法大多忽视了生态系统韧性大小。韧性反映了生态系统受到干扰后的恢复速率,以及能够抵抗的干扰大小^[9-10],决定了生态系统是否能够长期稳定发展。湿地是一种具有较高敏感性的系统^[11],面对未来不确定的干扰与挑战,湿地可能会发生退化。为维持系统关键功能,实现对湿地的风险管控,对湿地生态系统的韧性进行评估显得尤为重要。根据生态系统稳态转换理论,随着外部环境的变化,系统在发生临界转换前,通常会出现临界慢化现象,即系统在接近稳态突变临界点时从扰动中恢复的速率变得非常缓慢^[12-14],表现为系统韧性降低。系统韧性较低时,若系统受到较强的干扰,其可能难以恢复至平衡态而直接跳跃到另一种状态,在2种稳态之间反复转换,这种现象被称为状态“闪烁”^[15]。此时系统状态时间序列的方差、自相关系数等统计指标出现异常,这些指标被称为稳态转换的早期预警信号^[14, 16],可作为衡量生态系统韧性的指标。

水是湿地重要的组成成分,通过对水质的监测可以判断湿地的健康状况。在水质指标中,水体浊度、叶绿素a等具有监测方便、监测精度较高等优点,这种监测时间长、频率高的指标在反映系统动态方面具有重要意义^[17-18],比如,浊度能够反映水生生态系统是处于清水状态还是处于浊水状态^[19],叶

绿素a含量能够反映水体是否处于富营养化状态^[20],当叶绿素a含量较高时,表明水体藻类较多,水体富营养化较严重^[21]。因此这些水质指标常被用来衡量生态系统韧性。本研究利用长时间高频水质自动监测数据衡量新济洲湿地不同时期的生态系统韧性,以评估湿地公园建设对湿地韧性的影响,为湿地的管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏南京长江新济洲国家湿地公园(以下简称“新济洲湿地”)位于南京市江宁区(118.53° E, 31.844° N),属于典型的河流洲滩型湿地,包括长江低水位时的新济洲、新生洲、再生洲、子母洲和子汇洲5个洲滩,以及公园东侧江边陆域码头区,总面积约2 681.3 hm²。主要土地利用类型包括洪泛平原湿地、草本沼泽、森林沼泽、水库水面、坑塘水面、沟渠等。新济洲岛内部水域主要为沟渠和库塘,水动力条件较差,需要人工维护以保持水环境健康。自2016年新济洲湿地正式成为国家湿地公园以来,公园内始终开展日常管理维护,包括植物生长爆发期水生植物打捞,特别是新济洲岛上水葫芦和水花生等外来入侵种的清理。然而,自2020年起,新济洲岛凤凰湖及周边少部分沟渠开展备用水源地建设,新济洲岛南北部沟渠水体暂时被阻断,岛上水系连通性和水体交换大幅降低,水域管护工作频率也因工程实施暂时下降。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源 自2019年起,新济洲湿地陆续建立了包括水文、水质、土壤、空气质量、噪声等在内的生态环境自动监测点,利用传感器对新济洲湿地的生态环境状况进行长期动态监测,监测点分布情况如图1所示。

为满足韧性指标计算要求,本研究选择了新济洲岛上运行状态较稳定、时间分辨率较高的水质自动监测点的监测数据,监测位置如图1蓝色方块所示,监测指标包括水体浊度、氧化还原电位及叶绿

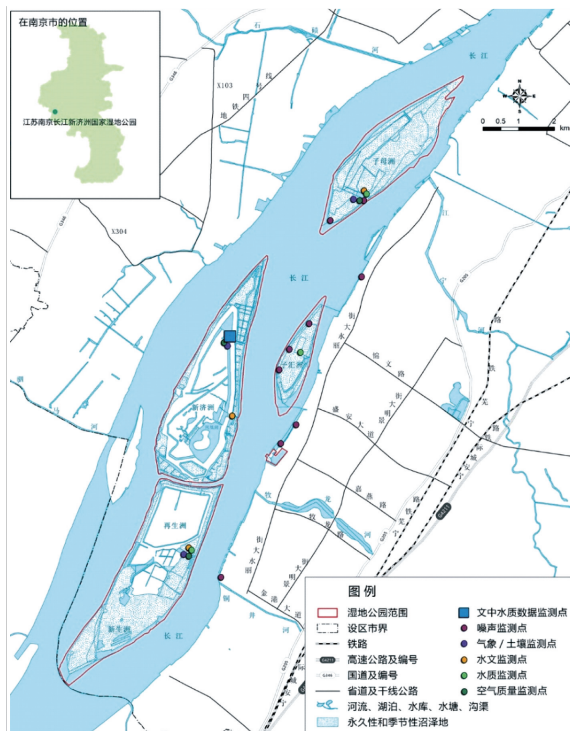


图1 新济洲国家湿地公园地理位置

素 a, 频率为约 3 h 监测 1 次, 监测时间为 2020 年和 2021 年的 4 月 1 日至 5 月 19 日。

1.2.2 评价方法 本研究分别对比了 2020 年和 2021 年各水质指标的时间序列, 并进行了组间 t -检验以验证其是否具有显著差异性。本文选取了 Silverman 提出的基于核密度方法检验了系统频率分布是否存在多峰特征, 以判断系统是否发生了稳态转换。并选取了时间序列的方差、变异系数、回复率以及一阶自相关系数 4 个指标来衡量系统韧性, 其中, 方差、变异系数及自相关系数越大, 表明系统韧性越低, 回复率越大, 表明系统韧性越高。采用滑动窗口的方式计算各个韧性指标, 时间窗口为 200

个时间步长, 并对得到的韧性指标进行 t -检验以判断不同年份的系统韧性是否具有显著差异。所有的统计分析均在 R4.1.3 中完成。

2 结果与分析

2.1 新济洲湿地水质变化特征

对比新济洲湿地 2020 年和 2021 年 4—5 月的水质变化情况, 结果表明, 2021 年水体浊度显著高于 2020 年, 增加了 2.84 NTU (如图 2, 3), 可能的原因为新济洲岛建设备用水源地过程中将水源区域和周边沟渠阻断, 新济洲岛上水体连通性还未重新建立, 导致水体交换能力下降, 同时因工程建设导致水生植物打捞频率下降, 水体中死亡植物难以快速分解, 最终引起水体透明度逐渐下降。2021 年的氧化还原电位显著高于 2020 年, 增加了 18.23 mV (见图 2, 3), 说明水体的氧化性增加, 藻类的生长受到抑制, 有利于鱼类和水生植物的生存。2020 年与 2021 年水体中叶绿素 a 含量无显著差异 ($P > 0.01$)。综上所述, 新济洲湿地水体氧化性增加, 但透明度下降。

2.2 新济洲湿地韧性变化情况

系统状态频率分布的多峰检验表明, 仅 2020 年水体浊度的频率分布存在显著的双峰特征 ($P < 0.05$), 其余水质指标均未发现显著的多峰特征 ($P > 0.05$), 表明 2020 年水体浊度发生了稳态转换, 方向为从浊度低的状态转换到浊度高的状态 (如图 2)。

2020 年新济洲湿地水体浊度的自相关系数、方差以及变异系数分别为 0.85, 0.13, 0.25, 均显著大于 2021 年, 2021 年分别为 0.67, 0.02, 0.04。2020 年水体浊度的回复率为 0.14, 显著大于 2021 年, 2021 年的回复率为 0.33 (如图 4)。

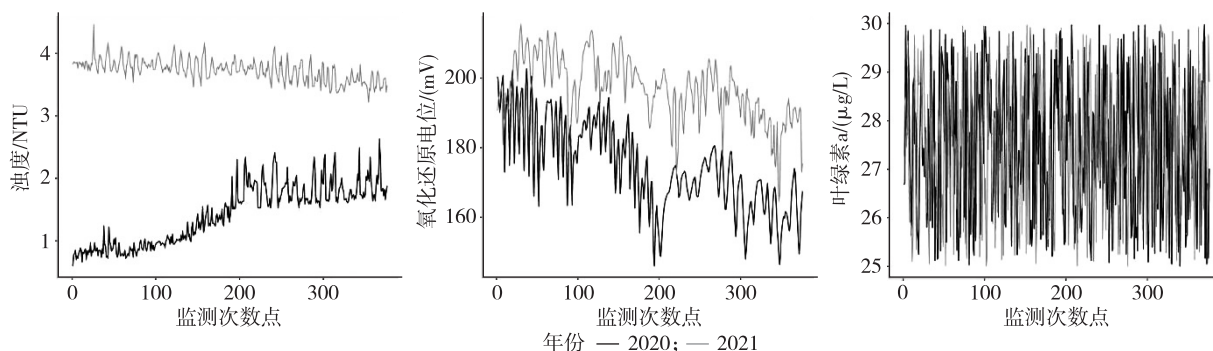


图2 新济洲湿地水质自动监测时间序列

2020年新济洲湿地水体氧化还原电位的自相关系数、方差以及变异系数分别为0.87, 98.93, 0.06, 均显著大于2021年, 2021年分别为0.85,

56.66, 0.04。2020年水体氧化还原电位的回复率为0.13, 显著小于2021年, 2021年的回复率为0.15(如图5)。

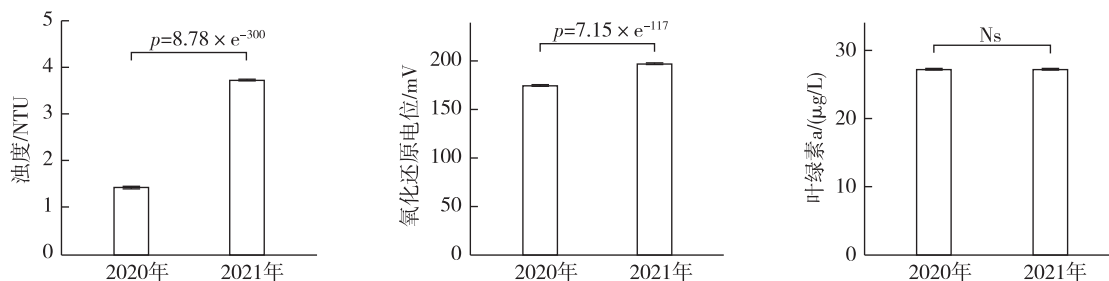


图3 新济洲湿地水质指标 *t*-检验结果

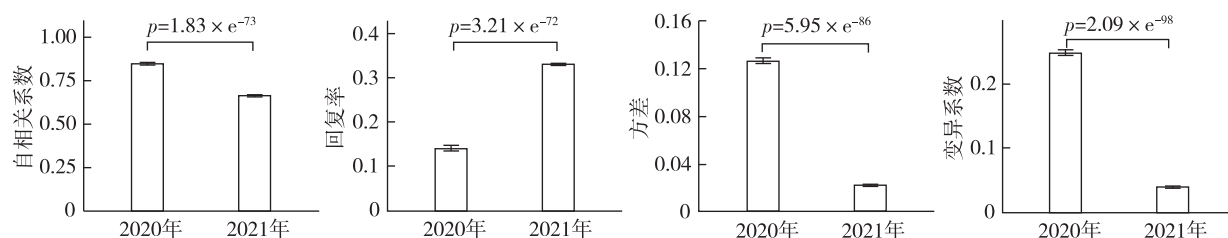


图4 由浊度反映的韧性指标

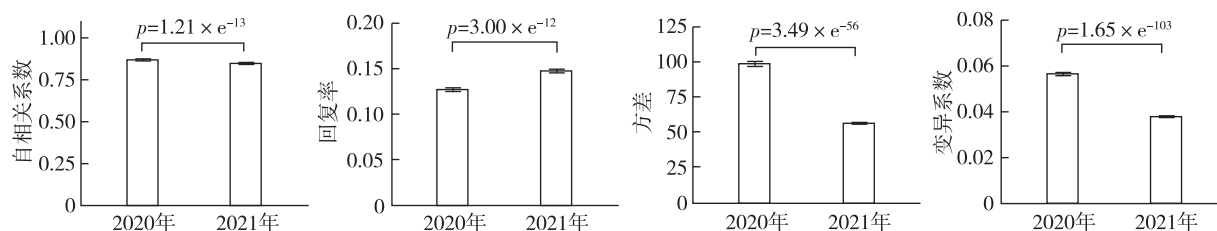


图5 由氧化还原电位反映的韧性指标

2020年新济洲湿地水体叶绿素a的自相关系数为0.05, 显著大于2021年, 2021年为0.009。同时2020年的回复率为0.95, 显著小于2021年, 2021年为0.99(如图6)。但2020年与2021年叶绿素a的方差和变异系数并没有显著差异。产生这种现象的原因可能有2种:一方面,在某些情况下,在系统发生稳态转换前,系统状态时间序列的方差和变异系数可能会降低,而不是像时间序列一

阶自相关系数一样总是增加的^[13, 22-23], 因此自相关系数是一个更加稳健的指标。另一方面,本次研究使用的水质自动监测数据可能因为传感器漂移而存在测量误差,导致方差等指标不能完全反映出系统韧性^[24]。

综上所述,由浊度、叶绿素a以及氧化还原电位计算的韧性指标均表明,2021年新济洲湿地的系统韧性高于2020年。

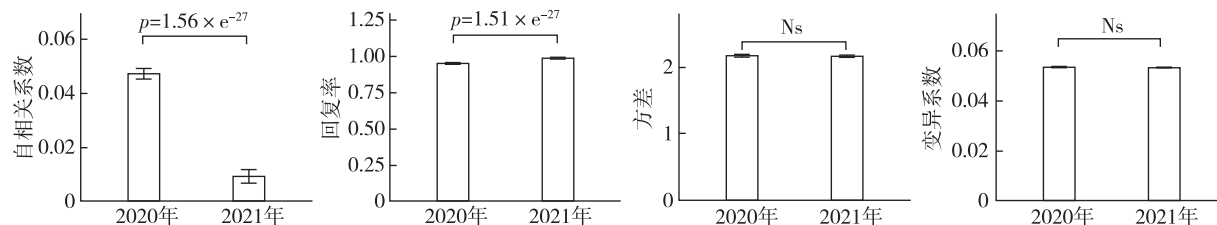


图6 由叶绿素a反映的韧性指标

3 结论

本研究利用 2020—2021 年的高频水质自动监测数据,对比不同时期的水质状况,并计算南京长江新济洲国家湿地公园不同时期的韧性指标,以研究湿地公园建设对湿地生态系统韧性的影响。

(1)2020 年新济洲湿地的水体浊度和氧化还原电位均显著低于 2021 年,2020 年和 2021 年新济洲湿地的水体叶绿素 a 含量并未发生显著变化。

(2)2020 年水体浊度出现了显著的双峰特征,说明水体浊度在此期间发生了稳态转换,水体浊度显著上升。2020 年水体浊度、氧化还原电位的方差、变异系数、自相关系数均大于 2021 年,且 2020 年的回复率小于 2021 年;同时 2020 年水体叶绿素 a 的自相关系数大于 2021 年,回复率小于 2021 年。这些指标均说明 2021 年新济洲湿地的系统韧性显著高于 2020 年,2021 年新济洲湿地的稳定性更强。

(3)从水体浊度的角度来看,因工程建设引起的人工维护频率降低导致了新济洲湿地水环境质量相对变差,但 2021 年新济洲湿地的韧性显著高于 2020 年。反之,可以说明在人工维护频率较高时水体浊度较低,但其稳定性也相对较低。因此本研究建议在对新济洲湿地公园进行相关建设时,可适当减少湿地管理维护频率,以提升新济洲湿地水环境的稳定性。

4 讨论

生态系统韧性是衡量系统受到扰动时保持稳定的能力,是系统评价的重要内容。目前,基于早期预警信号的指标是衡量系统韧性常用的方法,但这些指标大多是定性或者半定量的,且可能并不完全适用于某些线性变化的系统,例如,当湖泊从浮游植物群落过渡到有毒蓝藻主导的状态时,湖泊藻类生物量的方差表现出下降趋势^[25],而当系统具有多稳态且发生稳态转换前,系统总是表现出方差增加的现象^[26]。此外,由于环境随机性较大,韧性指标在应用于现实生态系统时可能出现假预警的现象^[23]。因此,在衡量系统韧性时,需要对生态系统的本质有一定的认识,针对不同的生态系统选择合适的指标衡量韧性^[24]。本研究中选择水体浊度、叶绿素 a 以及氧化还原电位作为评价新济洲湿地韧性的水质指标,这些水质指标是衡量水生态系统韧性较为稳健的指标。不同水质指标衡量的系统韧性呈现出较为

一致的结果,即 2020 年新济洲湿地的韧性低于 2021 年。

湿地公园建设的目的在于保护湿地资源,提升湿地的生态环境质量。一般情况下,湿地公园建设能够增加生物多样性,提升湿地的稳定性。本研究发现,由于工程建设导致新济洲岛水体交换能力变弱和日常管护频率下降,其水体透明度逐渐下降。水体浊度的增加降低了沉水植物的光合作用,影响了水生植物的生长,进而导致水体营养过剩,藻类大量繁殖,最终可能引发湿地由“清水状态”向“浊水状态”的转换^[27]。从这一现象推断,新济洲湿地似乎正朝着一种“较坏”的方向发展。但从韧性的角度分析,2021 年新济洲湿地的韧性更高,抗干扰能力更强。综合而言,尽管 2021 年新济洲湿地的水体透明度显著下降,但其稳定性却大幅上升,系统韧性显著提高,这可能是新济洲湿地自然条件下的一种稳定平衡状态。

在人为管护频率高的条件下,新济洲湿地的水体流通性较好,交换能力较强,死亡的植物也能及时被清理,水体透明度能够保持在较高水平,但系统稳定性反而较低。当缺少人工干预时,新济洲湿地的水体流通性较差,同时死亡的沉水植物无法及时清理,导致水体浊度增加,但其稳定性也随之增加。因此,湿地公园的建设需要权衡湿地生态系统的状态与韧性,在改善生境质量的同时,避免湿地韧性的降低,以减少湿地的管理维护成本。

参考文献:

- [1] MITSCH W J, BERNAL B, NAHLIK A M, et al. Wetlands, carbon, and climate change[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [2] 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等.湿地退化研究进展[J].*生态学报*, 2012, 32(4): 289-303.
- [3] 杨 阳,张 亦.我国湿地研究现状与进展[J].*环境工程*, 2014, 32(7): 43-48,78.
- [4] 李春晖,郑小康,牛少凤,等.城市湿地保护与修复研究进展[J].*地理科学进展*, 2009, 28(2): 271-279.
- [5] 孙乾照,林海英,张美琦,等.滨海盐沼湿地生态修复研究进展[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 151-158.
- [6] TOWNSHEND J, ALTSTATT A, SUNGHEE K, et al. Change in the subtropical forest of eastern paraguay during the 1990s[R]. College Park, MD: Global Land Cover Facility, 2004.
- [7] RODRIGUES A, AKCAKAYA H R, ANDELMAN S, et al. Global gap analysis: priority regions for expanding the global protected-area network[J]. *BioScience*, 2004, 54(12): 1092-1100.
- [8] SCOTT J M, DAVIS F, CSUTI B, et al. Gap analysis: a geographic

- approach to protection of biological diversity [J]. Wildlife Monographs, 1993, 123: 3-41.
- [9] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [10] GUNDERSON L H. Ecological resilience—in theory and application [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31: 425-439.
- [11] 尚二萍, 摆万奇. 湿地脆弱性评价研究进展[J]. 湿地科学, 2012, 10(3): 378-384.
- [12] SCHEFFER M, CARPENTER S R, DAKOS V, et al. Generic indicators of ecological resilience; inferring the chance of a critical transition [J]. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 2015, 46(1): 145-167.
- [13] 赵东升, 张雪梅. 生态系统多稳态研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6314-6328.
- [14] 徐 驰, 王海军, 刘权兴, 等. 生态系统的多稳态与突变[J]. 生物多样性, 2020, 28(11): 1417-1430.
- [15] SCHEFFER M, CARPENTER S R, LENTON T M, et al. Anticipating critical transitions [J]. Science, 2012, 338(6105): 344-348.
- [16] ARANI B M S, CARPENTER S R, LAHTI L, et al. Exit time as a measure of ecological resilience [J]. Science, 2021, 372(6547): 1168-1173.
- [17] SEEKELL D A, CARPENTER S R, CLINE T J, et al. Conditional heteroskedasticity forecasts regime shift in a whole-ecosystem experiment [J]. Ecosystems, 2012, 15: 741-747.
- [18] IBELINGS B W, PORTIELJE R, LAMMENS E H R R, et al. Resilience of alternative stable states during the recovery of shallow lakes from eutrophication: Lake Veluwe as a case study [J]. Ecosystems, 2007, 10: 4-16.
- [19] SCHEFFER M, RINALDI S, GRAGNANI A, et al. On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes [J]. Ecology, 1997, 78(1): 272-282.
- [20] 王世强, 郭 琦, 邱小琮, 等. 太阳山湖群叶绿素 a 变化及与总氮、总磷关系 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(9): 31-36.
- [21] 吴东浩, 贾更华, 吴浩云. 2007-2019 年太湖藻型和草型湖区叶绿素 a 变化特征及影响因子 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1364-1375.
- [22] SEEKELL D A, CARPENTER S R, PACE M L. Conditional heteroscedasticity as a leading indicator of ecological regime shifts [J]. American Naturalist, 2011, 178(4): 442-451.
- [23] DAKOS V, CARPENTER S R, VAN NES E H, et al. Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 370(1659): 20130263.
- [24] DAKOS V. Identifying best-indicator species for abrupt transitions in multispecies communities [J]. Ecological Indicators, 2017, 94(11): 494-502.
- [25] CARPENTER S R, BROCK W A, COLE J J, et al. Leading indicators of phytoplankton transitions caused by resource competition [J]. Theoretical Ecology, 2009, 2(3): 139-148.
- [26] CARPENTER S R, BROCK W A. Rising variance: a leading indicator of ecological transition [J]. Ecology Letters, 2006, 9(3): 308-315.
- [27] WANG H J, WANG H Z, LIANG X M, et al. Total phosphorus thresholds for regime shifts are nearly equal in subtropical and temperate shallow lakes with moderate depths and areas [J]. Freshwater Biology, 2014, 59(8): 1659-1671.

· 征订启事 ·

欢迎订阅 2023 年度《江苏林业科技》

《江苏林业科技》为国内外公开发行的综合性林业科学技术刊物。1974 年创刊。为科学引文数据库 (SCD) 和《中国学术期刊 (网络版)》入编期刊、全国优秀期刊、江苏省优秀期刊、全国优秀农业期刊、华东地区优秀期刊。加入“万方数据——数字化期刊群”和中国期刊网等。

《江苏林业科技》主要刊登良种选育、育苗造林、园林绿化、林副特产、森林经营、森林保护、调查设计、野生动物等方面的学术论文、科研报告、经验总结, 以及林业新成果、新技术, 有较强的指导性、技术性、实用性, 是林业科研、教学工作者、管理部门及广大林业生产者不可少的参考资料。欢迎订阅, 欢迎投稿, 欢迎刊登广告, 宣传产品等。

《江苏林业科技》为双月刊, 大 16 开本, 国内外公开发行。国内统一刊号: CN 32-1236/S, 国际标准刊号: ISSN 1001-7380, 每期定价 15.00 元, 全年订费 90.00 元。全年办理订阅手续, 需订阅者请到当地邮局订阅或将订款汇至南京市江宁区东善桥江苏省林业科学研究院本刊编辑部, 邮政编码 211153。电话 (025) 52745438, 83602820, 83602060。由银行或邮局汇寄均可。开户银行: 南京市农业银行金鹰支行, 户名: 江苏省林业科学研究院, 帐号: 10105101040000010。邮发代号: 28-303。