J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0656
©2026 *by Journal of Lake Sciences*

近 70 年来洞庭湖区泥沙沉积与补给特征及其洪枯效应*

朱玲玲[1**], 葛华[2], 姚仕明[2], 金业[1]
(1：长江水利委员会水文局，武汉 430010)
(2：长江水利委员会长江科学院，武汉 430010)

摘要：近 70 年长江-洞庭湖水系演变过程中，洞庭湖区对长江及湖南湘江、资水、沅江、澧水的调蓄作用由滞洪沉沙逐渐演变为调洪和补水补沙，江湖关系进入全新阶段，江湖治理与保护需要更新的视野。本文依托长江干流及洞庭湖水系全序列原型观测资料，解析了洞庭湖区泥沙由沉积至补给的发展过程、分布特征与驱动因子，揭示了湖区洪枯水文情势对于泥沙沉积状态变化的宏观响应。结果表明：洞庭湖区先后经历了拦沙减弱期、拦沙稳定期和补沙增强期三个发展阶段，湖区泥沙的沉积自西向东发展、补给自东向西发展，年内保持汛期沉积、非汛期补给的属性，泥沙补给以极细颗粒为主，不参与长江干流的造床作用；较大来沙量和较弱水动力条件是泥沙沉积的主因，控制性水库群运行、水土保持工程等导致的入湖水流含沙量持续下降是泥沙补给的核心驱动因子，但湖区泥沙补给的水平较低且很难进一步发展。泥沙沉积是三峡水库蓄水前湖区最高水位普遍抬升的主要因素之一，三峡水库补水调度难以缓解洞庭湖区最低水位下降趋势，泥沙沉积状态的变化将促进洞庭湖区的防洪形势向好发展。
关键词：泥沙沉积与补给；洞庭湖区；水动力条件；洪枯情势

Sedimentation and replenishment characteristics of Lake Dongting area in the past 70 years and their flood and/or dry effects

Zhu Lingling[1*], Ge Hua[2], Yao Shiming[2] & Jing Ye[1]
(1: *Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P. R. China*)
(2: *Yangtze River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P. R. China*)

Abstract: Over the past 70 years, the evolution of the Yangtze River–Lake Dongting system has led to a gradual transition in the sediment regulation function of the Lake Dongting area, shifting from flood storage and sedimentation to flood control and sand replenishment, which signifies a new developmental stage of the river–lake interaction relationship. This functional transformation necessitates innovative perspectives for river and lake management and ecological conservation. Based on long-term field observational data of the mainstream Yangtze River and the Lake Dongting system, this study systematically analyzes the evolutionary processes, spatial distribution characteristics, and driving mechanisms of sediment deposition and sand replenishment in the Lake Dongting area, and clarifies the macroscopic responses of flood and dry-season hydrological regimes to variations in sediment deposition patterns. The results indicate that the Lake Dongting area has undergone three successive developmental stages, including sediment trapping attenuation, sediment trapping stabilization, and sand replenishment enhancement. Sediment deposition in the lake area presents a west-to-east developmental trend, whereas sand replenishment exhibits an east-to-west progression, with a persistent seasonal pattern of flood-season deposition and non-flood-season replenishment. The replenished

2025-11-291 收稿；2026-01-19 收修改稿;2026-03-13 录用。
长江水科学联合基金项目(U2240224)资助。
** 通信作者；E-mail: zhull1012@foxmail.com

sediment is predominantly composed of ultra-fine particles that fail to participate in the bed-forming processes of the Yangtze River mainstream. High sediment inflow and weak hydrodynamic conditions are the primary causes of local sediment deposition, whereas the continuous reduction in inflow sediment concentration, induced by the operation of cascade reservoir groups and soil and water conservation projects, acts as the core driving factor of sand replenishment in the lake area. Nevertheless, the magnitude of sand replenishment in the Lake Dongting area remains at a low level with no potential for further improvement. Before the impoundment of the Three Gorges Reservoir, sediment deposition was a dominant factor responsible for the widespread rise in the highest water levels across the lake area. The water replenishment regulation of the Three Gorges Reservoir cannot reverse the declining trend of the lowest water levels in the Lake Dongting area, while variations in sediment deposition patterns are conducive to the improvement of regional flood control conditions.

Keywords: Sediment deposition and replenishment; Lake Dongting; hydrodynamic conditions; flood and drought conditions

自 19 世纪中后期荆江藕池口、松滋口溃决分流入洞庭湖区后，洞庭湖区与长江干流交织成庞大而复杂的江湖河网水系。自此，洞庭湖区承担长江干流荆江河段与湖南四水洪水的调蓄任务。荆江三口分流和湖南四水的洪水进入湖区后，流速下降，湖区滞纳洪水、沉积泥沙，1956—2002 年湖区累计拦截泥沙约 52.4 亿 t，泥沙淤积侵占湖泊容积、改变滩槽格局，且泥沙也是多种水环境、水生态因子的载体，泥沙沉积对江湖河网水系的防洪、航运、用水及生态环境等造成持续影响[1-4]。

以往关于洞庭湖区的泥沙沉积特征、规律及影响因素开展了大量的研究，研究涵盖荆江三口分流分沙[5,6]、湖南四水入汇及城陵矶出湖水沙条件的变化特征[7,8]，湖区的冲淤变化[9,10]及洲滩格局的演变[11,12]，以及湖区泥沙淤积产生的防洪、航运、水环境、水生态综合效应等[1-4]。尤其是围绕三峡水库蓄水后江湖关系的变化，基于数据分析、数值模拟和遥感解译等，量化了三峡水库蓄水对荆江三口分流分沙的影响[13,14]，开展了荆江三口分流分沙变化趋势预测[15,16]，解析了洞庭湖盆冲淤对水库调控的响应[9,10]，揭示了江湖关系变化的内在机理[17]，着重评估了三峡水库对于洞庭湖区防洪形势的影响[18,19]，提出了对城陵矶防洪补偿的调度对策[20]，为实现“江湖两利”的治理目标提供了重要参考和支撑。观测资料表明，自长江上游以三峡为核心的梯级水库群蓄水运用后，从泥沙输移的视角来看，入湖泥沙量骤减，湖区泥沙沉积从量变发展到质变，从纳沙转变为吐沙，江湖关系调整进入全新的阶段[21]，江湖保护与治理需要更新的视野。与此同时，湖区的泥沙沉积与补给会直接产生洪枯水情效应，尤其是洞庭湖区大量的堤垸防洪级别较低，城陵矶附近仍有超额洪量问题[22]，加之近年来湖区的枯水情势愈演愈烈[23]，泥沙沉积和补给与洞庭湖区洪、枯水情发展的内在联系亟待系统揭示。

本文基于长江—洞庭湖水系系统的水文泥沙、水动力及断面等原型观测资料，梳理总结了 70 年洞庭湖区泥沙沉积过程的特征期，揭示了泥沙沉积与补给的时空分布特征及粒径组成特点，解析了湖区泥沙沉积与补给状态转化的内在机理，定性判断了湖区泥沙补给的发展趋势及其对干流河道的影响，全面剖析了泥沙沉积和补给与洞庭湖区洪、枯水情发展的内在联系，以期进一步加深对湖区泥沙规律及其宏观效应的认识，为江湖河网保护与综合规划治理等提供支撑。

1 数据源与研究方法

1.1 研究区域和数据源

本文以长江-洞庭湖水系为主要研究对象，范围涵盖长江干流宜昌至汉口河段、荆江三口洪道、洞庭湖区及湖南湘江、资水、沅江、澧水尾闾等区域。研究主要基于上述研究区域内水文控制站的水文泥沙观测资料，同时还收集了长江干流、荆江三口洪道及洞庭湖区部分站点断面的实测流速、水深等水动力资料，以及湖区 53 个固定断面的床沙取样资料，研究区域及采用的水文控制站平面分布示意如图 1，观测资料收集与使用情况如表 1。文中采用的水文泥沙观测资料序列长达 70 年，但部分资料时段为 30 年，文章基于一定方法、重要事件并充分考虑对比时段的长度相近等因素，对 70 年序列进行了阶段划分。

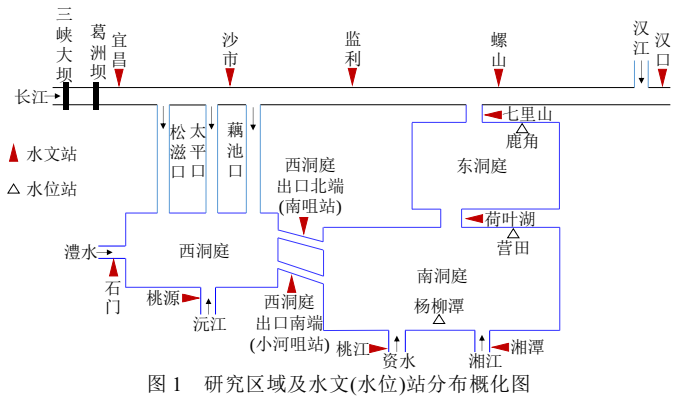


图 1　研究区域及水文(水位)站分布概化图

Fig.1　Distribution of research area and Hydrological and water level stations

表 1　研究区域水文泥沙观测数据基本情况

Table 1 Hydrological and sediment observation data in the study area

区域	水文(水位)站	时段(年)	数据来源
长江干流荆江三口湖南四水	宜昌、沙市	1991—2024	长江委水文局
	监利、螺山、汉口	1956—2024	
	新江口、沙道观、弥陀寺、藕池(康家港)、藕池(管家铺)		
	湘潭、桃江、桃源、澧水	1956—2024 (1991—2024)	湖南省水文局
洞庭湖区	南咀 小河咀 杨柳潭 营田 鹿角 七里山		长江委水文局
	荷叶湖	2010—2017	

1.2 研究方法

定义洞庭湖区及其主要水系对长江干流的泥沙补给(拦截)率(κ)为：洞庭湖区泥沙补给量(W_L)与长江干流螺山站输沙量(W_{LS})扣除城陵矶七里山站输沙量(W_Q)后比值的百分比，可按下式进行计算：

$$\kappa = \frac{W_L}{W_{LS} - W_Q} \times 100$$

式中，洞庭湖区及其主要水系的泥沙补给量W_L是指洞庭湖出口七里山站输沙量W_Q与荆江三口来沙量W_{SK}的差值，包括湖区产生和湖南省湘江、资水、沅江、澧水入湖的泥沙，输沙量的单位均为万 t。螺山站位于洞庭湖入汇口下游的长江干流，自然条件下，螺山站的泥沙远大于七里山站；三峡水库蓄水后，螺山站泥沙来源有三个部分，一是以监利水文站为控制的上游干支流来沙，二是以城陵矶七里山站为控制的洞庭湖来沙，三是监利至螺山河段河床冲刷补给的泥沙，理论上螺山站的输沙量恒大于七里山站。因此，当κ<0 时，表明洞庭湖区为拦沙沉积状态，κ值表征洞庭湖区对长江干流输入泥沙的拦截水平；当κ>0 时，则表明洞庭湖区为吐沙补给状态，湖区向长江干流河道补给泥沙。

文中关于洞庭湖区控制站的水位特征值(年最高、平均、最低水位)和流量特征值(年最大、平均、最小流量)的变化趋势，采用 Mann-Kendall 进行检验（Fattah 等人，2024）。检验结果中，P 值小于显著性水平(α=0.05）表明存在变化趋势，且测试统计量 Z>0 表示上升趋势，Z<0 表示下降趋势；P 值大于显著性水平(α=0.05）则表明无明显变化趋势。

2 泥沙沉积与补给的时空特征

2.1 沿时变化特性

2.1.1 年际变化　1950s 年以来洞庭湖区泥沙沉积过程可以概括为拦沙减弱期、拦沙平稳期和补沙增强期共 3 个阶段。考虑长江上游以三峡为核心的梯级水库群运行前，洞庭湖区的泥沙主要来源于荆江三口分流[9]，而造成其分流、分沙减少的核心因素是下荆江自然和人工裁弯[6]，同时也结合泥沙补给(拦截)率的年际变化，可以将有观测资料以来的洞庭湖区的泥沙沉积与补给过程划分为三个阶段：第一阶段为 1956—1975 年，这一时期洞庭湖区入湖泥沙的 83.6%来源于荆江三口，伴随着荆江三口分流分沙的持续减小[5]，加之洞庭湖区存在大规模的围垦[9]，洞庭湖湖泊容积、面积大幅减小，1954—1971 年洞庭湖湖泊面积减小 1095km^2，容积减小 80 亿 m^3(七里山水位为 33.5m 时)，从而使得湖区泥沙拦截率趋势性下降，可概括为拦沙减弱期；第二阶段为 1976—2002 年，荆江三口分流分沙减小的速度放缓，洞庭湖区的径流来源从上一阶段荆江三口与湖南四水的 4:6 调整为 3:7，泥沙来源变化较小，同时洞庭

湖湖泊容积和面积的缩减速率下降，1971—1995 年湖泊面积仅减小 195km^2，湖泊容积减小 21 亿 m^3，湖区泥沙拦截率无趋势性变化，可概括为拦沙平稳期；第三阶段为 2003—2024 年，荆江三口分流量仍有所下降，占入湖径流总量的比例进一步下降至 22.3%，而分沙量骤减，年均分沙量仅为 1976—2002 年均值的 8.6%，占入湖泥沙的比例小于湖南四水，湖区逐渐进入泥沙补给状态，称之为补沙增强期(图 2，表 2)。对应第一、第二阶段，洞庭湖区都处于泥沙沉积状态，仅泥沙沉积量趋势性下降，年均沉积量从 1.51 亿 t 减小至 0.826 亿 t，进入第三阶段后，洞庭湖区的泥沙由沉积转为补给，但补给量相对较小，年均约 143 万 t，且主要集中在 2008—2017 年，这一时期的年均补给量达到 832 万 t(图 3)。

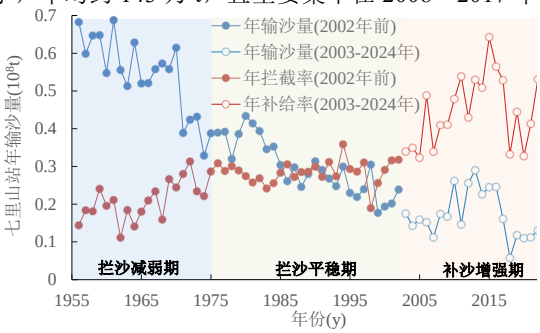


图 2 七里山水文站年输沙量与洞庭湖区泥沙年拦截(补给)率

Fig.2 Annual Sediment Transport at the Qilishan Hydrological Station and Annual Sediment Interception (Supplement) Rate of Lake Dongting

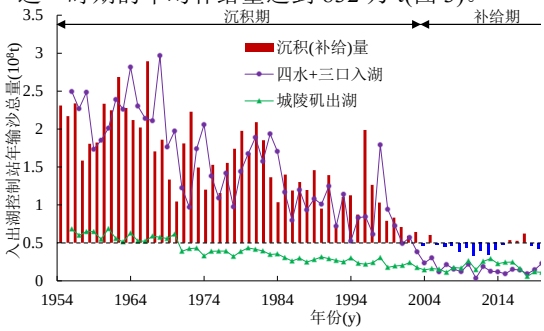


图 3 洞庭湖年入、出湖沙量与湖区泥沙沉积(补给)量

Fig.3 Annual Inflow and Outflow of Sediment in Lake Dongting and Sediment Deposition (Accumulation) in the Lake Area

表 2 不同时期洞庭湖区年均入湖水沙量及对长江干流的泥沙补给量和补给(拦截)率

Tab.2 Annual Average Inflow Sediment Volume of Lake Dongting and Its Contribution to the Yangtze River Mainstream (Supplement and Interception Rates) Across Different Periods

时段(年)	特征时期	荆江三口				湖南四水				出湖(七里山站)沙量(万 t)	螺山站输沙量(万 t)	泥沙补给(拦截)率 K (%)
		径流量(亿 m^3)	占比[1] (%)	输沙量(万 t)	占比[2] (%)	径流量(亿 m^3)	占比[1] (%)	输沙量(万 t)	占比[2] (%)			
1956—1975	拦沙减弱期	1190	42.2	17100	83.6	1630	57.8	3360	16.4	5430	42600	-31.4*
1976—2002	拦沙平稳期	697	29.0	8810	78.4	1710	71.0	2430	21.6	2980	40300	-15.6
2003—2024	补沙增强期	472	22.3	754	49.3	1640	77.7	774	50.7	1670	7710	15.2
备注：	占比[1]和占比[2]分别指径流量、输沙量占入湖总量的比例；*为负值则为拦截率，为正值则为补给率。											

2.1.2 **年内变化** 过去的 70 年，对于入湖的泥沙，洞庭湖区年内基本遵循“汛拦枯补”的规律。针对上述三个阶段，统计年内各月份洞庭湖区泥沙拦截(补给)率和量如图 4 所示，尽管年际间洞庭湖区的泥沙年总量从拦截转变为补给，但拦沙减弱期(1956—1975 年)、拦沙平稳期(1976—2002 年)和补沙增强期(2003—2024 年)均遵循年内“非汛期补给泥沙、汛期拦截泥沙”的规律。按照长江干流的汛期(5～10 月)和非汛期(11～4 月)统计，1956—1975 年汛期的泥沙拦截率最大，为 47.0%，此后逐渐递减至 1976—2002 年的 26.9%和 2003—2024 年的 9.2%；1956—1975 年非汛期的泥沙补给率为 27.8%，此后至 1976—2002 年减小为 20.2%，至 2003—2024 年大幅度增加至 58.1%。

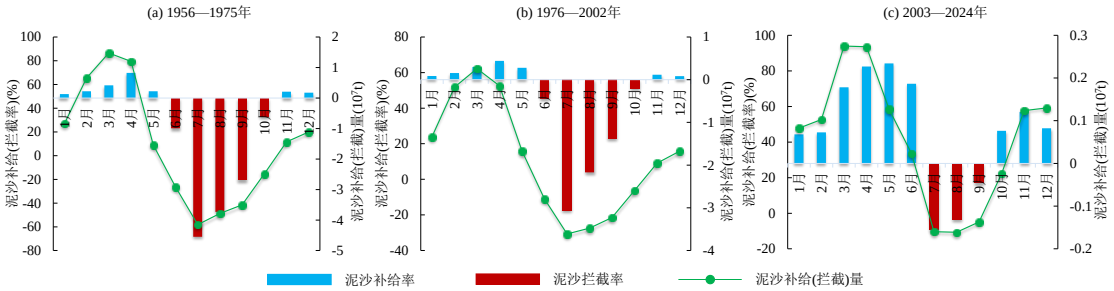


图 4　1956—2024 年不同时期年内各月洞庭湖泥沙拦截(补给)率和量的对比

Fig.4 Comparison of monthly sediment interception (replenishment) rates and quantities in Lake Dongting during different periods,1956- 2024

洞庭湖区年内拦沙时期缩短，同期拦沙量与拦沙率明显减小，而补沙时期延长，补沙率增大。逐月对比来看(图 4)，前两个时期年内各月泥沙拦截(补给)率的规律基本一致。汛前 1～5 月和汛后的 11～12 月，洞庭湖处于泥沙补给状态，且最大补给率和补给量均出现在 4 月，4 月洞庭湖水系进入初汛期，此时长江干流尚处于枯水期，经由荆江三口分入洞庭湖区的水量和沙量均较小，同时干流对出湖水流的顶托作用较弱，湖区有一定水动力条件，可以挟带泥沙出湖，5 月长江干流进入涨水期，荆江三口分流分沙量增大，且干流对出湖水流顶托作用增强，因而其泥沙补给量和补给率弱于 4 月，其他月份湖区来流量较小、水动力条件弱，泥沙补给量和补给率均较小。汛期的 6～10 月，长江干流和洞庭湖区水沙量均较大，尤其是主汛期 7 月和 8 月，是荆江三口分流分沙的主要时期，同时干流对湖泊形成强顶托作用，湖泊水动力强度不足以输送入湖的泥沙，湖区处于泥沙拦截状态，且 7 月拦沙量和拦截率最大。2003—2024 年，尽管年内“汛拦枯补”的规律依然保持，但湖区拦截泥沙的时段明显收窄缩短，从之前的 6～10 月收窄至主汛期 7～9 月，且泥沙的拦截率与拦截量也显著下降，与 1976—2002 年同期相比，7 月泥沙拦截量减少 94.9%，拦截率下降 16.5 个百分点。反之，湖区补沙时期延长，年内 5 月、6 月、10 月由拦沙转为补沙，且 5 月补沙量和补沙率最大，但由于同期入湖水流含沙量明显偏小，因而 5 月的补沙量略有下降。因此，6 月、10 月由拦转补是 2003—2024 年洞庭湖区呈现泥沙补给状态的核心原因。

2.3 空间分布特征

依据水文控制站分布与洞庭湖区平面形态整体特征，可以将洞庭湖区划分为西洞庭与南、东洞庭，其中，西洞庭湖区的泥沙主要来源于荆江三口、澧水和沅江，其出口的泥沙量由湖区的南咀站和小河咀站控制，其泥沙沉积或补给量为出湖与入湖输沙量的差，南洞庭湖、东洞庭的泥沙来源于西洞庭、资水和湘江，出口的泥沙量由城陵矶七里山站控制，其泥沙沉积或补给量为出湖输沙量与入湖输沙量的差，据此得到洞庭湖区不同区域的泥沙沉积与补给分布如表 3。

表 3　洞庭湖区泥沙沉积与补给量的分区统计

Tab. 3 Sediment deposition and replenishment in different regions of Lake Dongting area

统计时段	西洞庭湖出口						资水	湘江	城陵矶七里山	南、东洞庭湖区沉积(补给)量	湖区沉积(补给)量
	荆江三口	澧水	沅江	南咀	小河咀	西洞庭湖区沉积(补给)量					
1956—1975 年	17100	633	1460	4190	843	-14160*	243	1030	5430	-876	-15036*
1976—2002 年	8810	527	807	3630	456	-6058	153	939	2980	-2198	-8256
2003—2024 年	754	144	145	615	202	-226	52.8	431	1670	369	142

注：统计数据单位为“万 t”；*值为负表示沉积量，为正表示补给量。

在洞庭湖区的泥沙拦截期内，湖区的泥沙沉积自西向东发展。1956—1975 年湖区年均沉积泥沙约 1.5 亿 t，其中 94.2%的泥沙沉积在西洞庭湖区，西洞庭湖区泥沙沉积比为 73.8%，仅不足 6%的泥沙沉积在南洞庭湖和东洞庭湖区，这个区域内的泥沙沉积仅比为 13.9%；其后，入湖沙量大幅减少，1976—2002 年湖区年均沉积泥沙约 8256 万 t，同时泥沙沉积自西向东发展，西洞庭湖区泥沙年均沉积量下降 57.2%，沉积量占湖区总沉积量的比例下降至 73.4%，泥沙沉积比减小为 59.7%，而南洞庭、东洞庭湖区泥沙年均沉积量增大 150.9%，沉积量占比增大至 26.6%，泥沙沉积比增大至 42.4%。

在洞庭湖区的泥沙补给期内，湖区的泥沙补给自东向西发展。2003—2024 年，湖区年均补给泥沙约 142 万 t，其中，西洞庭湖区年均沉积泥沙约 226 万 t，沉积量和沉积比均显著减小，入、出湖泥沙

量接近平衡；南洞庭、东洞庭湖区年均补给泥沙 369 万 t，是洞庭湖区泥沙补给的核心来源区。

2.2 粒径组成变化

泥沙既是塑造河湖形态的物质条件，同时也是水环境因子的重要载体，不同粒径组泥沙对于河床塑造的效应和水环境因子的吸附能力存在着较大差别。对于补给的泥沙粒径，若颗粒较粗，参与河道造床作用，则可以缓解入汇口以下长江干流河段的河床冲刷，进而减缓干流河道中低水位下降的速度，若颗粒较细，则基本不参与造床作用，但可以一定程度补给长江干流的生源物质。因此洞庭湖区沉积或补给的泥沙颗粒大小不仅关系河湖的塑造能力，还会对湖区及长江干流的水环境、水生态造成一定影响。受观测资料的限制，关于洞庭湖入、出湖及湖区控制站泥沙粒径的分析主要针对 1991—2024 年(表 4)，缺少湖南四水入湖泥沙的粒径组成资料，但从《长江泥沙公报》近 10 年公布的数据来看，湖南四水入湖的泥沙颗粒也较细，一般中数粒径不超过 0.05mm，湖区的泥沙颗粒变化主要通过南咀、小河咀和七里山站反应。

表 4　1991—2024 年洞庭湖入、出湖及湖区控制站分组泥沙输移量(单位: 万 t)

Tab.4　Sediment transport volume of different particle size groups at the control stations of Lake Dongting,1991-2024

区域	水文控制站	d<0.008mm		0.008mm≤d<0.062mm		d≥0.062mm		全沙	
		1991—2002	2003—2024	1991—2002	2003—2024	1991—2002	2003—2024	1991—2002	2003—2024
荆江洪道	新江口、沙道观、弥陀寺、藕池	2820	342	2290	316	1860	97	6970	755
洞庭湖区	南咀	1660	356	992	232	101	27	2750	615
	小河咀	257	106	119	89	13	7	389	202
	七里山	1570	861	712	706	142	99	2420	1670
长江干流	监利	15300	1590	11100	1670	5100	2810	31500	6070
	螺山	13900	3060	10500	2630	7660	2020	32100	7710
	汉口	14000	3360	11200	2960	5950	2450	31200	8770

洞庭湖区输送运移的主要是粒径小于 0.062mm 的细颗粒泥沙，相反地，对于粒径 d≥0.062mm 的粗颗粒泥沙，进入湖区后，沉积比例明显偏大。1991—2002 年，年均荆江三口输入洞庭湖区 d<0.008mm 的泥沙总量为 2820 万 t，至城陵矶七里山站下降为 1570 万 t，占长江干流螺山站该组泥沙输移量的 10.3%；年均荆江三口输入洞庭湖区 0.008mm≤d<0.062mm 的泥沙总量为 2290 万 t，至城陵矶七里山站减少为 712 万 t，占螺山站该组泥沙输移量的 6.8%，表明这一时期内年均湖区有超过 2200 万 t 的细颗粒泥沙随水流运动；对于 d≥0.062mm，湖区的拦截效应明显，年均荆江三口输入洞庭湖区泥沙总量为 1860 万 t，至西洞庭出口下降为 114 万 t，城陵矶七里山站为 142 万 t，仅占螺山站的 1.9%。期间长江干流进入减沙阶段[24]，但监利至汉口段站与站之间 d<0.062mm 的泥沙输移比接近 1，符合冲泻质的输移特征，因此湖区入湖的细颗粒泥沙基本不参与造床作用。

对比 2003 年前后，荆江三口输入洞庭湖区的 d<0.062mm 与 d≥0.062mm 泥沙减幅分别达 87%、95%，在湖区及湖南四水的补充作用下，至西洞庭湖出口，细颗粒和粗颗粒泥沙减幅分别下降至 74%和 70%，至洞庭湖出口七里山站，两组泥沙的恢复水平均接近 70%。1991—2002 年，长江干流分流入洞庭湖的细颗粒泥沙量明显大于洞庭湖汇入量，年均差异约 2830 万 t，而 2003—2024 年，形势发生明显变化，洞庭湖区及水系年均反补长江干流细颗粒泥沙约 909 万 t，且以东、南洞庭湖区和水系补给为主。可见，长江上游干流梯级水库运行后，经由荆江三口分流入洞庭湖的泥沙粗细颗粒均大幅减少，在东、南洞庭湖及水系的补给作用下，出湖的粗、细颗粒泥沙输移量均恢复近 70%，出湖泥沙粒径组成变化较小，仍以 d<0.062mm 细颗粒为主，d≥0.062mm 粗颗粒泥沙占比不足 6%，湖区补给长江干流的泥沙对缓解其河床冲刷的作用较小。

3 泥沙沉积与补给的转化机制

3.1 泥沙沉积机理

挟沙水流进入某一水域时，一般呈三种状态，一是入口水流含沙水平较高，水流运动过程中因能量耗散，泥沙逐渐落淤；二是入口水流含沙水平适中，泥沙在较长时间尺度或较大空间尺度内呈现不冲不淤或微冲微淤状态；三是入口水流含沙水平较低，水流能量有较多的富余，会从河床冲起一部分泥沙挟带输移。因此，洞庭湖区泥沙沉积或是补给的本质取决于湖区水流挟沙力与入湖水流的含沙水

平。

自然状态下，洞庭湖区的水动力条件较弱，入湖泥沙含沙量偏大是泥沙在湖区沉积的主要原因。依据长江干流宜昌、沙市、监利、螺山站，荆江三口的新江口、沙道观、弥陀寺、康家岗、管家铺站，及洞庭湖区南咀、小河咀、七里山站断面实测流速、水深数据，计算出 1981—2002 年各站点的水流挟沙力指标如图 5。其中，挟沙力指标计算所依据的流速、水位均为水文站的实测断面平均流速和平均水深，每年一般约 90 个测次，覆盖洪、中、枯，单个站点的实测数据条数接近 1000 组。

整体上，年内各月份基本遵循自长江干流至洞庭湖区水流动力逐渐减弱的特征；相反地，三口洪道与长江干流相比，各月平均含沙量基本相当，因而水流进入湖区之后，水动力强度减弱，不足以挟带既有的泥沙，致使泥沙在湖区落淤，泥沙迅速落淤，使得湖区控制站的含沙量水平相较于三口洪道和长江干流显著偏低。因此，湖区水动力条件较弱是入湖泥沙大量沉积的根本原因。

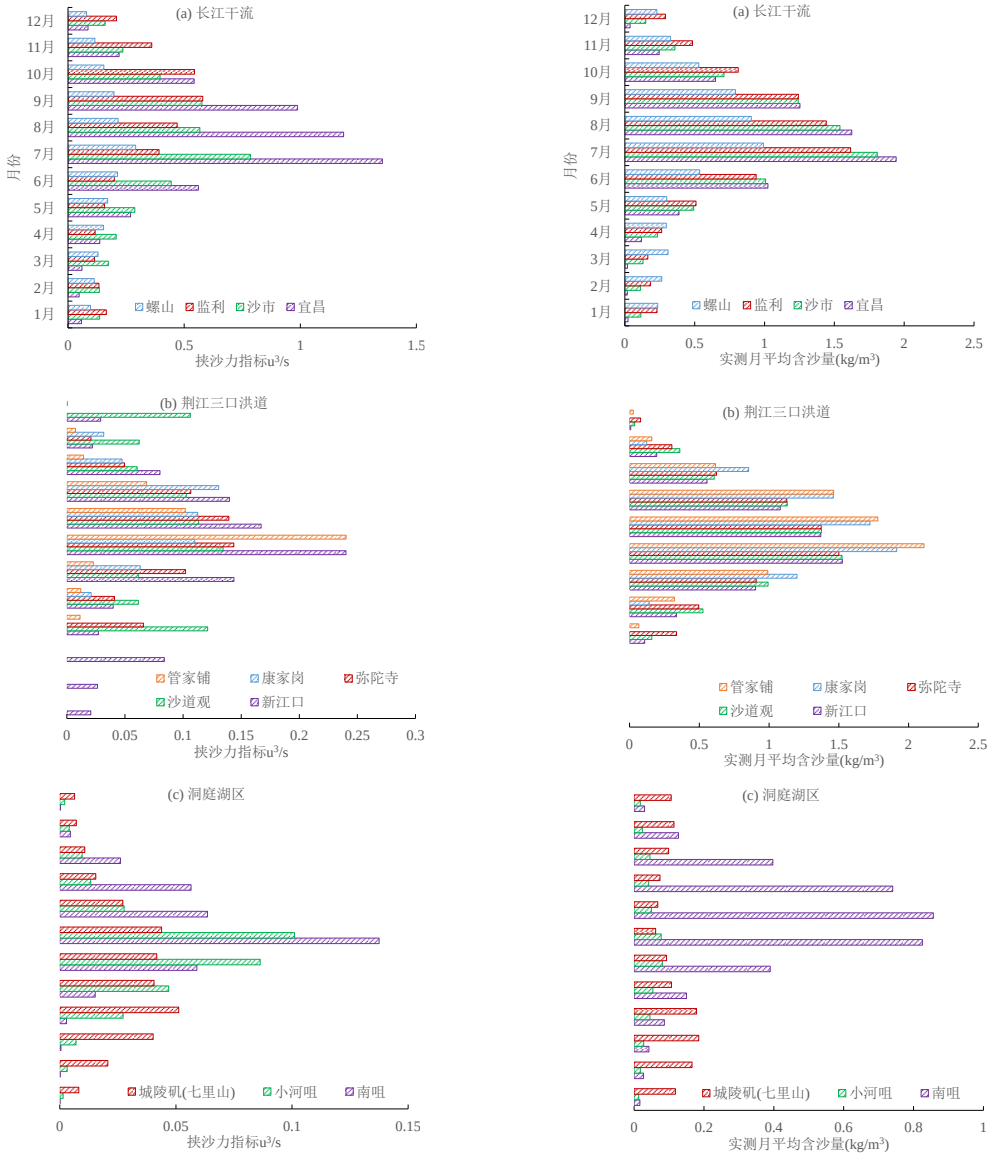


图 5　1981—2002 年长江-洞庭湖水系水文控制站断面实测挟沙力指标与月平均含沙量对比图

Fig.5　Comparison chart of measured sediment carrying capacity index and monthly average sediment concentration at hydrological control stations in the Yangtze River Lake Dongting river network area from 1981 to 2002

3.2 湖区补沙机制

关于湖区泥沙补给能力，从整体考虑，受制于荆江—洞庭湖江湖关系的调整方向，但以往诸多研究也表明，在长江上游以三峡为核心的梯级水库群蓄水运用的相当长时期内，江洞关系不会出现明显的趋势性调整[25]，加之荆江四口水系综合整治工程通过可研论证，荆江三口分流入洞庭湖的格局将长期维持[26]。从局部来看，影响湖区泥沙补给能力的因素主要有两个方面，一是泥沙是否有充足的来源，二是水动力条件能否持续冲起泥沙挟带输移。

3.2.1 水动力条件 从 1985—2024 年洞庭湖区南咀站、小河咀站和荷叶湖站的断面挟沙力指标变化来看(图 6)，1985—1995 年南咀站水流挟沙能力有所降，1995 年以来则以小幅度波动变化为主，1985—2005 年小河咀站水流挟沙能力基本稳定，2005—2015 年有所下降，在断面流量为 6000m³/s 时，挟沙力指标下降约 56%，之后至 2024 年保持稳定；荷叶湖站位于南洞庭出口，断面挟沙力指标呈现波动变化，调整趋势不明显。可见，2003 年之后，洞庭湖区水动力条件整体较为稳定。

2003—2024 年，除主汛期 7、8、9 月以外，其他月份湖区泥沙呈现补给状态，且 4、5、6 月的泥沙补给幅度最大，从水动力条件来看(图 8)，湖区南咀站、小河咀站断面平均流速以 6 月最大，5 月或 10 月次之，4 月则明显大于 12 月～3 月，且各月断面流速均值均不超过 1m/s，大多月份不超过 0.6m/s。对比 1981—2002 年的水动力条件变化，2003—2024 年，泥沙补给幅度最大的 4～6 月，断面平均流速有增有减，但变幅基本在±10%以内，且年内均以 10 月的断面平均流速减幅最大，其主要原因在于长江上游以三峡为核心的梯级水库群集中在 9、10 月蓄水，同期宜昌站 10 月平均流量减小 4160m³/s，太平口、藕池口逐渐进入断流状态，荆江三口的月分流总流量减小 1390m³/s，使得湖区流速减幅偏大。整体上，在泥沙主要补给期内，洞庭湖区水动力条件较弱且基本稳定，加之南咀和小河咀是西洞庭湖出口河宽相对较小的断面，主湖区的水流流速可能更小。

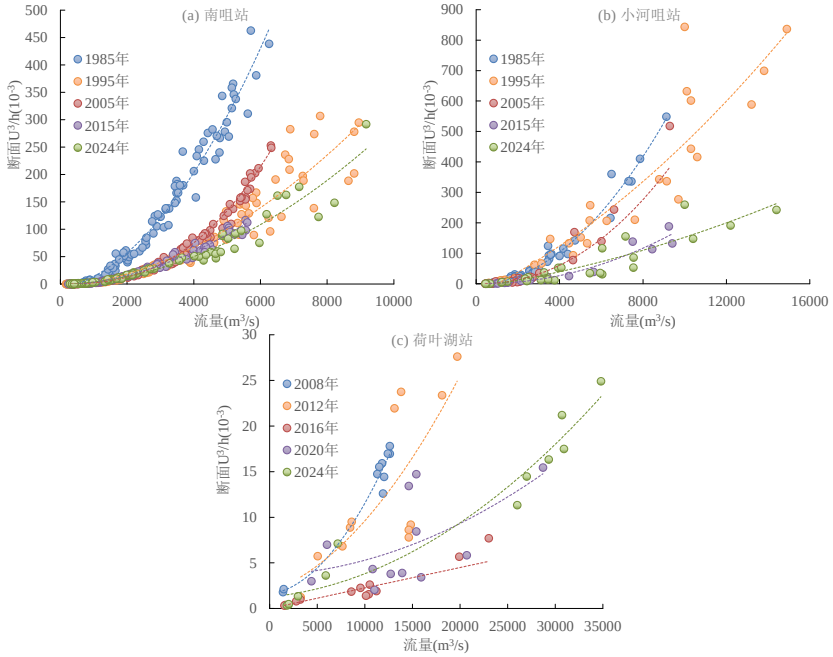


图 6 1985—2024 年洞庭湖区水文控制站断面挟沙力指标变化

Fig. 6 Changes in sediment carrying capacity indicators of hydrological control stations in Lake Dongting area, 1985- 2024

与水动力条件相对稳定不同，湖区入湖水流含沙量急剧下降，入湖“清水”从湖区冲起泥沙挟带输移，是驱动湖区补沙的核心因素。对比 1981—2002 年与 2003—2024 年入湖荆江三口、湖南四水控制站的逐月平均含沙量(图 7)，松滋口、太平口、藕池口月平均含沙量减幅均超过 90%，且大部分月份含沙量均值减幅超过 95%，湘江湘潭站月均含沙量减幅略小，除个别月份以外，大多月份减幅超过 85%，其他三条支流资水桃江站、沅江桃源站和澧水石门站月均含沙量减幅也基本接近或超过 90%。入湖水流含沙量锐减，水流动力挟带既有的泥沙仍有富余，便从湖区冲起泥沙，但由于湖区水动力较弱，因而冲起挟带并输送出湖的泥沙量有限，且颗粒粒径也没有出现类似荆江干流河道沿程粗化[27]的现象，仍然是以细颗粒泥沙输移为主。

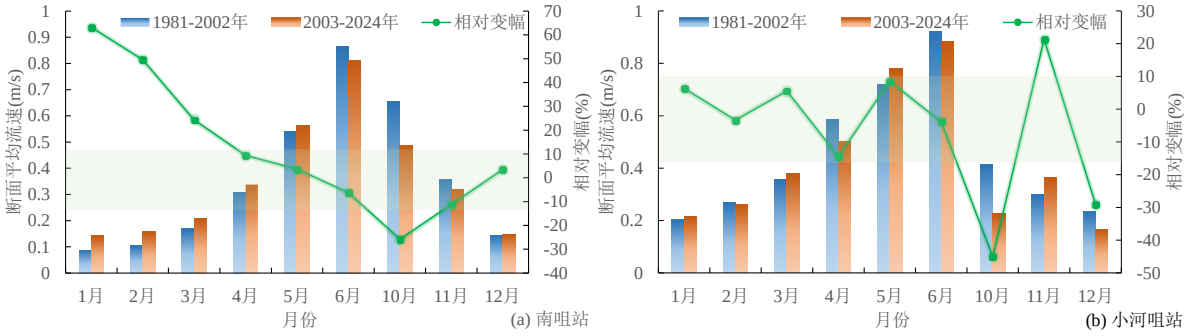
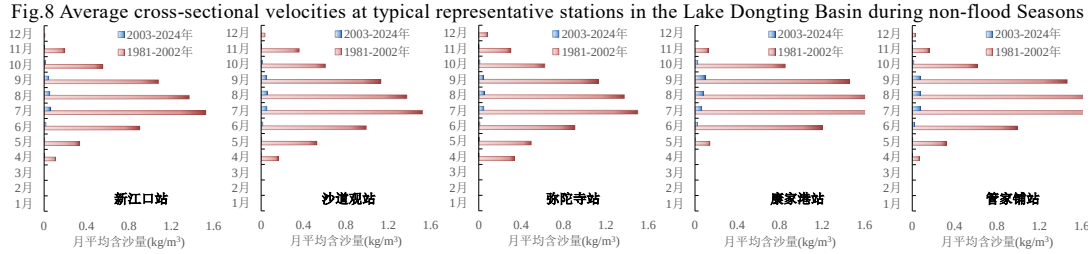
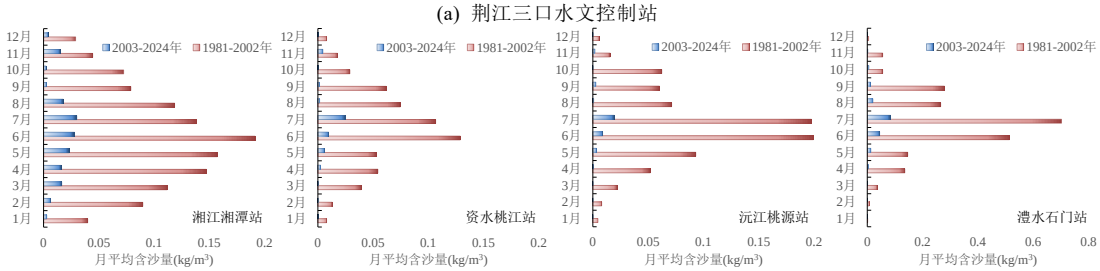


图 8　洞庭湖区典型代表站非主汛期断面平均流速对比

Fig.8 Average cross-sectional velocities at typical representative stations in the Lake Dongting Basin during non-flood Seasons



(a) 荆江三口水文控制站



(b) 湖南湘江、资水、沅江、澧水入洞庭湖区水文控制站

图 7　2003 年前后洞庭湖入湖控制站逐月平均含沙量对比图

Fig.7 Comparison of monthly average sediment concentration at Lake Dongting inflow control stations before and after 2003

3.2.2 **泥沙补给源**　自有观测资料以来至 2002 年，洞庭湖长期处于泥沙沉积拦截状态，累计沉积的泥沙超过 50 亿 t，取泥沙 0.95t/m^3 的干容重，按照期间湖区平均水域面积 3038km^2 进行平铺计算，湖区泥沙平均沉积厚度约 1.73m，因此湖区前期较大的泥沙存储量。前文分析表明，湖区冲起挟带的泥沙主要是 d<0.062mm 的细颗粒，粗颗粒泥沙的挟带能力较弱。为此，基于 2019 年汛后 10 月湖区 53 个固定断面床沙取样成果(表 5)。53 个观测断面中，有 50 个断面的 d<0.062mm 颗粒沙量百分数超过 50%，有 45 个断面的 d<0.008mm 颗粒沙量百分数超过 20%，可见对于 d<0.062mm 的细颗粒泥沙，洞庭湖区的存储量较为充足，可以提供持续的泥沙补给源。

综上，在入湖沙量持续百年维持较低水平[28]的背景下，洞庭湖区在今后相当长的时间内将处于泥沙补给状态，补给以细颗粒泥沙为主。湖区床面细颗粒泥沙有充足的存储量，但泥沙补给期内湖区的水动力条件较弱，且大多维持相对稳定状态，因此在入湖水流条件不发生较大人工干预的条件下，洞庭湖区的泥沙补给水平很难超过当前。

表 5　2019 年 10 月洞庭湖区床面细颗粒泥沙分布特征统计表

Tab.5　Distribution characteristics of fine sediment particles on the bed surface of Lake Dongting in October 2019

区域	固定断面总数量(个)	d<0.062mm 泥沙颗粒沙量百分数				d<0.008mm 泥沙颗粒沙量百分数			
		≥50%(个)	≥70%(个)	≥90%(个)	平均值(%)	≥20%(个)	≥30%(个)	≥40%(个)	平均值(%)
西洞庭湖	16	15	12	2	79.3	12	4	2	27.4
南洞庭湖	20	18	15	2	78.3	16	6	1	27.4
东洞庭湖	17	17	17	0	80.2	17	7	0	28.0
洞庭湖	53	50	44	4	79.2	45	17	3	27.6

4 泥沙沉积与补给的洪枯效应

洞庭湖泥沙沉积与补给所产生的宏观效应是多方面的，包括防洪、水资源利用、水生态环境、航运等。本次研究仅针对与湖区冲淤调整关系最密切、影响最直观的水文情势，重点关注洪水和枯水情势，并以特征洪、枯水位及其持续时间，特征洪、枯流量等作为洪枯水情的表征指标。

4.1 对洪水情势的影响

洞庭湖洪水情势的外部影响因素主要有湖南四水来流、荆江三口分洪和长江干流顶托，内部因素主要是湖区面积和容积变化，泥沙沉积主要侵占湖泊容积与面积，外部因素可以通过湖区的特征流量变化反映，且来流和泥沙沉积最终将综合作用于湖区特征水位变化。计算 1950s 以来洞庭湖区及长江干流螺山站的特征流量、特征水位的 MK 检验值(P、Z)如表 6、表 7。

4.1.1 特征水位变化 除 2003—2024 年七里山站年平均流量趋势性减小以外，2002 年前后，湖区南咀、小河咀、七里山站以及长江干流螺山站年最大流量、年平均流量均无明显趋势性变化；相反地，2002 年前，这些站点以及湖区杨柳潭、营田和鹿角站年最高水位都趋势性升高(图 9)，且杨柳潭、鹿角、七里山、螺山站年平均水位也趋于升高。可见，2002 年前，来流条件对湖区高水位抬升贡献较小，湖区高水位上升的主要因素是湖泊容积、面积的减小以及汇流段长江干流高水位的抬升。其中，1954—1995 年洞庭湖湖泊容积和水域面积分别减小 101 亿 m^3、1290km^2，减幅分别达到 62.3%和 67.0%，期间湖泊累计沉积泥沙 48.7 亿 t，按照泥沙的干容重 0.95t/m^3 折算，泥沙淤积体积约占湖容减幅的 50.8%，与湖泊围垦及其他因素的综合影响相当。与此同时，下荆江裁弯及葛洲坝枢纽运行后，荆江河段先后发生溯源和沿程冲刷[6]，且荆江三口分入洞庭湖的水沙量明显下降，更多的水沙经由长江干流河道下泄，1980s 至本世纪初，城陵矶至螺山河段泥沙持续沉积是其水位抬高的主要原因[29,30]。整体上，无论是洞庭湖区还是汇口以下长江干流段，泥沙淤积都是 2002 年前湖区高水位上升的主要因素。

表 6　1950s 以来洞庭湖区及长江干流控制站特征流量 MK 检验结果统计表

Tab.6　MK test results of characteristic flow in Lake Dongting area and Yangtze River main control stations since the 1950s

区域	控制站	三峡水库蓄水前(1955—2002 年)						三峡水库蓄水后(2003—2024 年)					
		年最大流量		年平均流量		年最小流量		年最大流量		年平均流量		年最小流量	
		P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z
西洞庭湖	南咀	0.488	-0.693	0.217	-1.24	0.638	-0.471	0.114	-1.58	0.693	-0.395	0.247	1.16
	小河咀	0.557	0.587	0.150	-1.44	0.011↑	2.54↑	0.382	-0.875	0.516	0.649	0.430	0.790
东洞庭湖	七里山	0.749	-0.320	0.352	0.931	0.111	1.59	0.185	1.33	0.044↓	-2.01↓	0.888	0.141
长江干流	螺山	0.046	1.99	0.364	0.907	0.007↑	2.69↑	1	0	0.215	1.25	0↑	4.29↑

注：“↑”表示上升趋势，“↓”表示下降趋势，下同。

表 7　1950s 以来洞庭湖区及长江干流控制站特征水位 MK 检验结果统计表

Tab.7 MK test results of characteristic water levels in Lake Dongting area and Yangtze River main control stations since 1950s

区域	控制站	三峡水库蓄水前(1951—2002 年)						三峡水库蓄水后(2003—2024 年)					
		年最高水位		年平均水位		年最低水位		年最高水位		年平均水位		年最低水位	
		P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	Z
西洞庭湖	南咀	0.005↑	2.81↑	0.670	-0.427	0.276	-1.09	0.955	0.056	0.185	-1.32	0.009↓	-2.60↓
	小河咀	0.006↑	2.74↑	1	0	0.160	-1.41	0.194	-1.30	0.194	1.30	0↓	-3.53↓
南洞庭湖	杨柳潭	0↑	3.34↑	0.007↑	2.69↑	0.056	1.91	0.933	0.085	0.397	-0.847	0.004↓	-2.85↓
	营田	0.002↑	3.11↑	0.152	1.43	0.398	0.845	0.843	0.197	0.058	-1.89	0↓	-4.77↓
东洞庭湖	鹿角	0.016↑	2.42↑	0.012↑	2.53↑	0↑	4.63↑	0.652	0.452	0.463	-0.733	0.011↓	-2.54↓
	七里山	0.010↑	2.59↑	0↑	3.85↑	0↑	6.02↑	0.693	0.395	0.632	-0.480	0.096	-1.66
长江干流	螺山	0.018↑	2.36↑	0↑	3.84↑	0↑	6.09↑	0.888	0.141	0.554	-0.592	0.080	-1.74

4.1.2 超警水位持续时间变化 洞庭湖区与江湖汇流段的防洪形势一直是流域防洪规划的重点关注内容，长江上游以三峡为核心的梯级水库群拦洪削峰，对城陵矶先后开展了多次防洪补偿调度，缩短了七里山站日均超警戒 34.4m 水位以上持续历时(表 8)，缓解了地区防洪压力。2002 年之前，湖区不仅高水位持续上升，超警戒水位历时也偏长，1998 年、1999 年七里山站日均超警戒水位分别持续 47 天和 13 天；2003 年之后，洞庭湖区及长江干流螺山站年最高水位、平均水位均无明显趋势性变化，且 2016 年、2017 年城陵矶地区连续发生超警戒洪水，2020 年发生超保证水位洪水，2017 年和 2020 年七里山站实测最大流量分别为 49400m^3/s、40500m^3/s，分别排 1950s 以来历史第 1、4 位，梯级水库拦洪削峰调度使得七里山站日均超警戒水位持续时间分别仅 2 天和 13 天。因此，2002 年之前，泥沙淤积和流域来流是影响洞庭湖防洪安全的主要因素，2002 年之后，泥沙淤积显著放缓，同时梯级水库群联合调度，对保障洞庭湖防洪安全有重要作用。

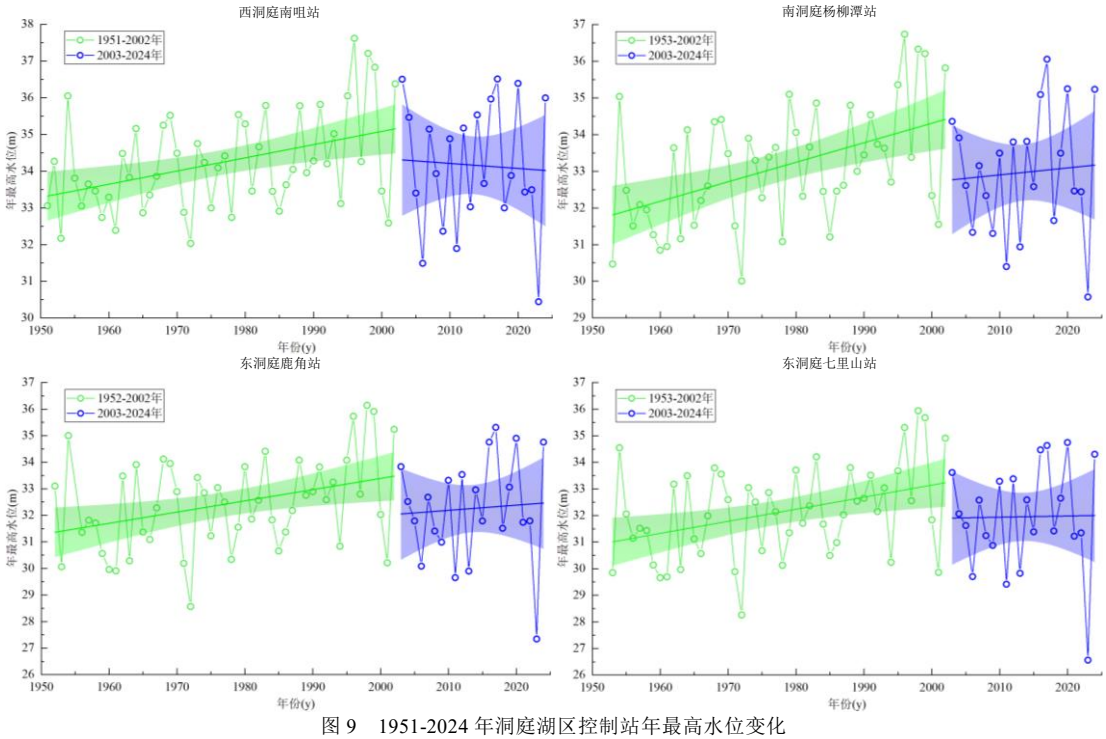


图 9　1951-2024 年洞庭湖区控制站年最高水位变化

Fig.9 Annual maximum water level variation of control stations in Lake Dongting area from 1951 to 2024

4.2 对枯水情势的影响

4.2.1 特征水位变化　2002 年之前，湖区小河咀站和干流螺山站最小流量呈显著上升趋势(表 6)，同时位于东洞庭湖区的鹿角、七里山和干流螺山站最低水位呈显著上升趋势(图 10)，而湖区其他站最低水位无明显趋势性变化，表明入湖流量对东洞庭湖区最低水位抬升贡献较小，其主要原因是入汇段干流枯水位抬升，期间荆江三口分流分沙持续减少，泥沙沉积从湖区转移至城螺河段，螺山站枯水位因来流增大和河床淤积而明显抬升，一般枯水位抬升 1.2～1.5m[29]，对东洞庭湖区枯水位的顶托作用增强。2003 年以来，洞庭湖区年最小流量均无趋势性调整，而螺山站最小流量显著增大，洞庭湖区除七里山站以外，其他区域最低水位均呈下降趋势(表 7、图 10)。尤其是 2022 年长江流域发生特大骤旱事件[31]，出现百年一遇罕见枯水[23]，并持续发展至 2023 年春。受此影响，2022 年汛后和 2003 年汛前枯期西洞庭南咀站年最低水位分别为 27.34m、27.32m，是历史第二小和最小值，南洞庭杨柳潭站年最低水位分别为 26.34m、26.39m，是历史最小和第二小值；东洞庭鹿角站年最低水位分别为 19.36m、19.35m，是 1981 年以来第二小值和最小值。

4.2.2 枯水持续时间变化　城陵矶七里山站水位低于 24.5m 是洞庭湖枯水期的重要标志。统计 1981—2002 年、2003—2024 年不同时期七里山站低于 24.5m 持续时间如表 8，后者年均持续时间较前者延长约 1 个月。其中汛前 1～4 月枯水历史变化较小，尽管三峡水库对中下游开展补水调度，但期间荆江三口基本断流，同时干流河床冲刷下切抵消了补水对于水位的抬升作用[32]。汛后退水期及枯期枯水历时均有所延长，尤其是 9、10 月，平均延长近 10d，期间长江上游及洞庭湖水系水库群集中蓄水，入湖流量减小，松滋口沙道观站、太平口弥陀寺站和藕池口管家铺站由几乎不断流或者平均断流天数不超过 2 天增加至平均断流 8 天、4 天和 9 天，藕池口康家港站断流天数由 22 天增加至 40 天。同时干流水位下降，螺山站 9 月、10 月平均水位分别偏低 2.00m、2.26m。加之同等来流条件下，长江干流因枯水河槽河床冲刷下切，中低水位普遍下降[24]，2024 年相较于 2003 年，沙市站(7000m^3/s)和螺山站(10000m^3/s)水位分别下降 3.45m、2.04m。

综上，2002 年前，干流交汇段泥沙淤积与枯水位抬升的影响，洞庭湖区枯水形势向好发展；2003 年以来，在遭遇极端干旱情势的背景下，伴随水库群汛后集中蓄水和干流河道中低水位大幅度下降，洞庭湖区年最低水位呈下降趋势，且多个站点刷新 40～70 年的历史最低记录，同时枯水期历时延长约 1 个月，三峡水库汛前补水对于湖区枯水情势的改善作用不明显。

表 8　1981—2024 年城陵矶七里山水文站超警戒水位与枯水位持续时间

Table 8　Duration of Flood and Drought Water Levels at Qilishan Hydrological Station from 1981 to 2024

统计内容	时　段	1～4 月	5～8 月	9～10 月	11～12 月	全年
超 34.4m 警戒水位持续时间(天)	1981—2002 年	0	0.8	0.1	0	3.4
	2003—2024 年	0	0.2	0	0	0.8
低于 24.5m 枯水位持续时间(天)	1981—2002 年	26.6	1.7	1.2	23.7	162.9
	2003—2024 年	26.7	2.5	10.9	27.3	193.4

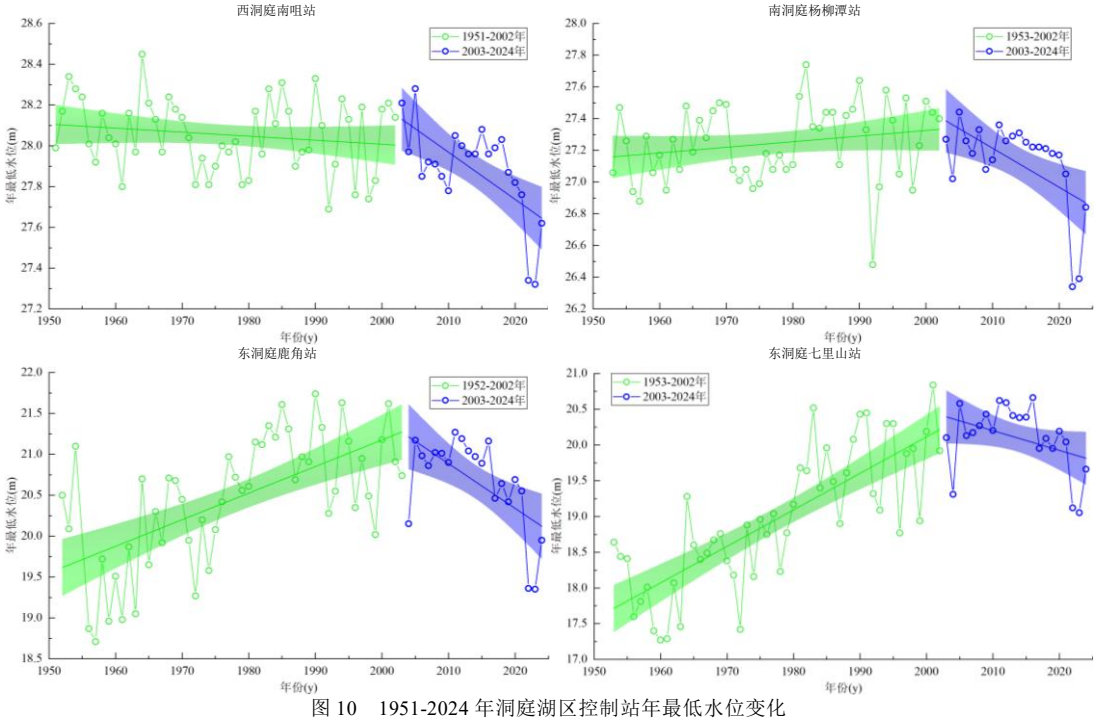


图 10　1951-2024 年洞庭湖区控制站年最低水位变化

Fig.10　Annual Minimum Water Level Changes of Control Stations in Lake Dongting Area from 1951 to 2024

5 主要认识

本文基于近 70 年全序列的水文泥沙、断面等观测数据，系统梳理了洞庭湖区泥沙沉积状态的发展阶段，泥沙沉积与补给的时空分布特征及粒径组成特点，揭示了湖区泥沙沉积与补给状态转化的主要成因，预测了泥沙补给的发展趋势，并解析了泥沙沉积和补给与洞庭湖区洪、枯水情发展的内在联系，取得主要认识如下：

(1) 近 70 年，以湖区对长江干流泥沙的补给(拦截)率作为指标，可以将洞庭湖区泥沙沉积演变过程划分为拦沙减弱期(1954—1975 年)、拦沙稳定期(1976—2002 年)和补沙增强期(2003—2024 年)。湖区的泥沙沉积自西向东发展，泥沙补给自东向西发展。年内湖区保持汛期沉积、非汛期补给的属性，但沉积时段由整个汛期缩短为主汛期，补给时段覆盖汛前汛后。洞庭湖输移及补给的泥沙均以 d<0.062mm 的极细颗粒为主，基本不参与造床作用，泥沙补给无法缓解长江干流河道的冲刷。

(2) 2002 年之前，经由荆江三口进入洞庭湖的水流含沙量与长江干流基本相当，但湖区的水动力条件较之明显偏弱，因而泥沙进入湖区后大幅落淤。2003 年以来，随着流域水土保持工程持续发挥作用，控制性水库枢纽陆续建成运行，洞庭湖入湖水流含沙量大幅持续下降，湖区水动力挟带既有的泥沙有富余，便从湖区冲起泥沙进行补给，湖区细颗粒泥沙的补给源充足，但湖区较弱的水动力条件决定了泥沙补给的水平较低且很难进一步发展。

(3) 2002 年之前，洞庭湖区泥沙沉积侵占湖容，同时荆江冲刷和三口分流分沙减少，促使干流城螺河段大幅淤积，螺山与湖区最高水位普遍抬升，防洪形势趋于紧张，枯水形势向好发展。2003 年以来，湖区补给泥沙同时干流河道冲刷，水库群拦洪削峰保障了湖区的防洪安全；受极端水情、水库群蓄水和干流河道中低水位大幅下降等影响，湖区年最低水位走低，多个站点刷新 40～70 年的历史最低记录，枯水历时延长约 1 个月，当前三峡水库汛前补水对于湖区枯水情势的改善作用不明显。

6 参考文献

[1] Li JB, Yin H, Lu CZ *et al*. Impact of sedimentation on Dongting Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(5): 514-523. [李景保, 尹辉, 卢承志等. 洞庭湖区的泥沙淤积效应. 地理学报, 2008, 63(5): 514-523.]
[2] Zhang M, Feng XX, Liu Z et al. Impact on Dongting Lake channel caused by the change of flow and sediment environment after Three Gorges Project impoundment. *Advance in Water Science*, 2015, 26(3): 423-431. [三峡蓄水后洞庭湖水沙环境变化对湖区航道的影响. 水科学进展, 2015, 26(3): 423-431.]
[3] Wang T, Wang K, Jiang X. Influence of rewetting process om distribution and release of phosphorus in sediments of East Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 40(4): 937-947. [王婷, 王坤, 姜霞. 东洞庭湖沉积物覆水后磷形态变化及其释放量. 湖泊科学, 2018, 40(4): 937-947.]
[4] Li YT, Sun ZH, Liu Y *et al*. Channel degradation downstream from the Three Gorges Project and its impacts on flood level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135: 718-728.
[5] 许全喜, 胡功宇, 袁晶. 近 50 年来荆江三口分流分沙变化研究. 泥沙研究, 2009, (10): 1-7.
[6] Zhu BY, XU Q, Zhu LL *et al*. Variations in water diversion at three outlets to Lake Dongting from Jingjiang River based on the identification of multiple factor contributions since 1955. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 1832-1843. [朱博渊, 徐琪, 朱玲玲等. 1955 年以来入洞庭湖的荆江三口分流变化. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1832-1843.]
[7] 覃红燕, 谢永宏, 邹冬生. 湖南四水入洞庭湖水沙演变及成因分析. 地理科学, 2012, 32(5): 609-615.
[8] 于亚文, 戴志军, 梅雪菲等. 近 60 年来洞庭湖出湖泥沙动态变化与影响机制. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018, (4): 159-170.
[9] Zhu LL, Chen JC, Yuan J *et la*. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir. *Advance in Water Science*, 2014, 25(3): 348-357. [朱玲玲, 陈剑池, 袁晶等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响. 水科学进展, 2014, 25(3): 348-357.]
[10] Zhou YQ, Li JB, Zhang YL *et al*. Silting/scouring process responses of Dongting Lake basin to the operations of TGR and thresholds of water-sediment regulation. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 409-421. [周永强, 李景保, 张运林等. 三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值. 地理学报, 2014, 69(3): 409-421.]
[11] 余姝辰, 邱罗, 贺秋华等. 基于多源遥感的洞庭湖洲滩时空演变研究. 自然资源遥感, 2025, 37(2): 228-234.
[12] Zhang YH, Wang DC, Wu XH *et al*. Driving factors of wetland evolution in Lake Dongting during 1900-2020. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(5): 1786-1795. [近百余年(1900—2020 年)洞庭湖湿地演化驱动因素分析. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1786-1795.]
[13] Zhu LL, Xu QX, Dai ML. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir. *Advance in Water Science*, 2016, 27(6): 822-831. [朱玲玲, 许全喜, 戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响. 水科学进展, 2016, 27(6): 822-831.]
[14] Zhang DD, Dai ML, Li YQ *et al*. Characteristics of runoff in the three outlets along Jingjiang River and influence of water supplement by the reservoirs during 1956-2020. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(3): 945-957. [张冬冬, 戴明龙, 李妍清等. 1956—2020 年荆江三口径流变化特征及水库补水效果. 湖泊科学, 2022, 34(3): 945-957.]
[15] Li YT, Guo XH, Tang JW *et al*. Changes of runoff diversion from Jingjiang reach of the Yangtze River to Dongting Lake after the operation of Three Gorges Reservoir. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(1): 21-31. [李义天, 郭小虎, 唐金武等. 三峡建库后荆江三口分流的变化. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 21-31.]
[16] Li YT, Guo XH, Tang JW *et al*. Estimation of flow of three diversions in the Jingjiang River after the Operation of the Three Gorges Reservoir. Journal of Tianjing University, 2008, 41(9): 1027-1043. [李义天, 郭小虎, 唐金武等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流比估算. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1027-1043.]
[17] 韩其为. 江湖关系变化的内在机理. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 104-112.
[18] Xu HW, Zhang SH, Li N *et al*. Analysis on flood control contribution of the Three Gorges Reservoir for the Lake Dongting area under basin-wide severe floods of Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(3): 935-944. [徐卫红, 张双虎, 李娜等. 长江全流域大洪水下三峡水库对洞庭湖区防洪贡献分析. 湖泊科学, 2022, 34(3): 935-944.]
[19] 冯宝飞, 许银山, 李洁. 三峡水库对城陵矶地区防洪补偿调度方式探讨. 人民长江, 2021, 52(12): 27-33.
[20] 陈桂亚. 三峡水库对城陵矶防洪补偿库容释放条件分析. 人民长江, 2020, 51(3): 1-5.
[21] 朱玲玲. 长江中下游“一江两湖”泥沙分布格局研究. 人民长江, 2017, 48(11): 27-31.
[22] Zhou BL, Luan ZY, Liu XQ et al. Study on high flood level of Qilishan waters in changing environment. *SHUILI XUEWBAO*, 2018, 49(4): 456-463. [周柏林, 栾震宇, 刘晓群等. 变化环境下七里山水域高洪水位研究. 水利学报, 2018, 49(4): 456-463.]
[23] 冯宝飞, 邱辉, 纪国良. 2022 年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探. 人民长江, 2022, 53(12): 6-15.
[24] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al*. Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Lake Sciences,* 2023, 35(2): 650-661. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, 35(2): 650-661.]
[25] Lu JY, Yao SM. Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups. *SHUILI XUEWBAO*, 2018, 49(1): 36-46. [卢金友, 姚仕明. 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制. 水利学报, 2018, 49(1): 36-46.]
[26] Zhang YC, Zhang YG, Song QL *et al*. The history and future of the relationship between the Yangtze River and connected lakes. *SHUILI XUEWBAO*, 2021, 52(10): 1183-1192. [张云昌, 张业刚, 宋秋龄等. 江湖关系的历史和未来. 水利学报, 2021, 52(10): 1183-1192.]
[27] Zhu LL, Xu QX, Chen ZH. Extraordinary scour of Jingjiang reach downstream from Three Gorges Project. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(1): 85-97. [朱玲玲, 许全喜, 陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(1): 85-97.]
[28] Yan HC, Zhang XF, Xu QX. Variation of runoff and sediment inflows to the Three Gorges Reservoir: Impact of upstream cascade reservoirs. *Journal of Hydrology*, 2021, 603:13.

[29] Duan WZ, Zheng YH, Liu JJ. Causes of water level rising in Chenglingji Luoshan reach of Changjiang River. *SHUILI XUEWBAO*, 2001, (2): 29-34. [段文忠, 郑亚慧, 刘建军. 长江城陵矶—螺山河段水位抬高及原因分析. 水利学报, 2001, (2): 29-34.]
[30] Tang JW, Li YT, Sun ZH *et al*. Preliminary study on the changes of water level at Chenglingji station after the impoundment of the Three Gorges Project(TGP). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2): 273-280. [唐金武, 李义天, 孙昭华等. 三峡蓄水后城陵矶水位变化初步研究. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 273-280.]
[31] 袁星, 王钰淼, 周诗珺等. 气候变化下 2022 年长江特大骤旱的多尺度成因分析. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(8): 2690-2702.
[32] Zhu LL, Yang X, Xu QX. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta geographica sinica*, 2017, 72(7): 1184-1194. [朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, 72(7): 1184-1194.]