

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.016

鄱阳湖枯水期水位变化及应对措施

吴培军¹, 万晓明², 徐继铭², 吴瑶², 熊冲玮²

(1. 鄱阳湖生态环境专项整治工作领导小组办公室, 江西 南昌 330009;

2. 江西省鄱阳湖水利枢纽建设办公室, 江西 南昌 330009)

摘要:针对2003年以来连续出现的鄱阳湖低水位对湖区民生、水生态、水环境产生的显著影响,通过实测系列水文数据,从流域降雨、长江上游干支流水库群蓄水、长江干流及鄱阳湖入江水道冲刷等方面,对枯水期水位变化的原因及趋势进行分析。结果表明,鄱阳湖枯水期低水位将长期存在,对鄱阳湖的影响将持续恶化。提出兴建鄱阳湖水利枢纽工程是解决枯水期低水位问题的最佳方案。

关键词:鄱阳湖; 枯水期水位; 水利枢纽工程; 长江

中图分类号:TV61;P333.3

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2019)06-0104-05

Changes of water levels in low-water season in Poyang Lake and its countermeasures // WU Peijun¹, WAN Xiaoming², XU Jiming², WU Yao², XIONG Chongwei² (1. Office of Leading Group for Special Improvement of Poyang Lake Ecological Environment, Nanchang 330009, China; 2. Jiangxi Poyang Lake Water Conservancy Project Construction Office, Nanchang 330009, China)

Abstract: The continuous low water level of Poyang Lake has had a significant impact on people's life, water ecology and water environment in the lake area since 2003. Based on a series of measured hydrological data, the causes and trends of the variation of water level in low-water season are analyzed in terms of rainfall in the basin, reservoir storage in the main and tributary reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River, scouring in waterway of Poyang Lake to Yangtze river and its main stream. The results show that the low water level of Poyang Lake will exist for a long time in low-water season, and the impact on Poyang Lake will continue to deteriorate. It is proposed that the construction of Poyang Lake Water Conservancy Project is the best measure to solve the problem of low water level in low-water season.

Key words: Poyang Lake; water level in dry season; water conservancy project; Yangtze River

鄱阳湖是长江流域最大的通江湖泊,也是长江中下游重要的水源地和调洪场所。鄱阳湖流域面积16.22万km²,占江西省面积的97%,约占长江流域面积的9%;鄱阳湖多年平均注入长江水量1480亿m³,约占长江干流多年平均径流量的15.5%,对支撑江西省乃至长江流域经济社会可持续发展具有重要意义^[1]。

由于长江来水来沙情势发生变化,鄱阳湖湖口、湖区及五河尾间水文情势会相应发生变化,其对鄱阳湖的影响已初步显现^[2]。中国水利水电科学研究院研究成果^[3]显示,长江上游水库汛后蓄水,鄱阳湖枯水期提前并将进一步发展,长江干流和入江水道冲刷是主要原因;刘志刚等^[4]认为,近年来鄱阳湖面临着江湖关系、河湖关系和人湖关系的改变

所带来的重大影响;欧阳千林等^[5]认为鄱阳湖入江水道主槽总体表现为冲刷;董增川等^[2,6-9]分别从不同角度分析了三峡工程运行对鄱阳湖枯水形式、防洪冲淤变化、水生态、水环境、湖口水位变化等方面的影响;胡春宏等^[10]认为鄱阳湖水利枢纽工程建设可基本解决鄱阳湖区枯水期缺水问题,采用合理的运行调度方式,对长江下游水资源利用没有明显影响,并在一定程度上可补偿三峡及以上水库蓄水期对长江下游的影响;唐昌新等^[11-14]分析了鄱阳湖水利枢纽对水龄、水文水动力、自然保护区候鸟栖息地、生态环境影响评价等不同方面的影响。

鄱阳湖枯水如任其继续发展,生态环境一旦破坏,将带来难以逆转的影响。在已有研究的基础上,本文以长江和“五河”系列水文数据为依据,系统梳理了

基金项目:江西省水利厅科技项目(KT201638)

作者简介:吴培军(1983—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程建设管理工作。E-mail:283565948@qq.com

鄱阳湖枯水期水位变化特征、原因,并提出解决措施。

1 鄱阳湖枯水期水位变化特征

2003 年以来,随着长江上游水文情势变化,鄱阳湖连续出现枯水时间提前、枯水期延长、枯水期水位超低等现象,枯水成常态化,打乱了鄱阳湖原有的水文节律。

a. 枯水期提前和枯水期延长明显。根据鄱阳湖代表性水文站星子站实测资料,1956—2002 年与 2003—2016 年相比,鄱阳湖枯水期各特征水位日期提前,枯水期延长(表 1)。

表 1 鄱阳湖星子站特征枯水位平均出现时间和持续时间

时 段	不同特征水位出现时间			
	≤12 m	≤10 m	≤8 m	≤6 m
1956—2002 年	10 月 19 日	11 月 11 日	12 月 6 日	1 月 6 日
2003—2016 年	9 月 24 日	10 月 11 日	11 月 16 日	12 月 28 日
时 段	不同特征水位平均持续时间/d			
	≤12 m	≤10 m	≤8 m	≤6 m
1956—2002 年	160	119	71	11
2003—2016 年	185	171	97	22

注:表中水位为黄海高程;鄱阳湖水位在 12 m 左右呈现为“河相”,基本认为开始进入枯水期。

b. 枯水位降幅显著。对湖区各站 1956—2002 年、2003—2016 年枯水期 9 月至次年 3 月各月平均水位(表 2)分析可知,鄱阳湖区各站除湖口 1—3 月日均水位抬高以外,其余各站水位均降低,最大降幅出现在 10 月,降幅 1.28~2.33 m。

表 2 鄱阳湖区各站日水位月平均值变化 单位:m

测站	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
湖口	-1.05	-2.20	-1.51	-0.27	0.31	0.34	0.61
星子	-1.23	-2.33	-1.51	-0.47	-0.18	-0.55	-0.24
都昌	-1.25	-2.30	-1.59	-0.95	-0.99	-1.28	-0.71
荣荫	-1.19	-1.90	-0.96	-0.44	-0.46	-0.41	-0.03
康山	-0.88	-1.28	-0.50	-0.16	-0.23	-0.34	-0.04

注:表中数值为 2003—2016 年系列日水位月平均值减去 1956—2002 年系列月平均值。

对星子站 1959—2002 年和 2003—2016 年的枯水期水位过程线进一步比较分析(图 1),发现 2003 年后鄱阳湖枯水期水位变化特征明显。

2 枯水期水位变化带来的问题

2.1 民生影响

a. 城乡供水困难。湖区城镇水厂枯水期抽水扬程增加,供水保证率下降,湖区乡村地下水位降低,水井干枯,直接影响鄱阳湖周边 400 多万城乡居民的饮水安全。

b. 灌溉水源不足。湖区 17.53 万 km² 晚稻生长关键期取水困难,造成减产。

c. 航运受阻。湖区及尾闾河段枯期水位持续下降,通航能力明显降低。

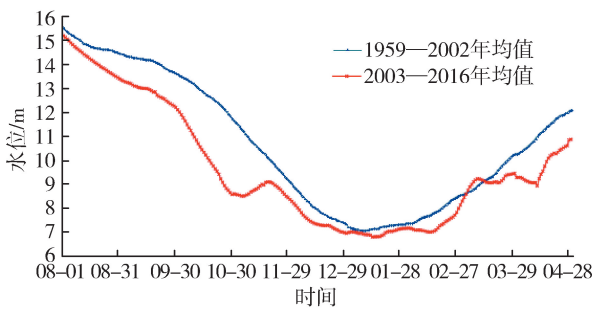


图 1 星子站两个时段枯水期水位过程比较

d. 渔民生计困难。枯水期提前、延长,水位低,渔民无鱼可捕则可能竭泽而渔。

2.2 水生态影响

a. 湿地植被发生显著变化。水位快速下降,水体面积和容积减小,洲滩提前出露,物种中生化、旱生化趋势显现。过去常见的马来眼子菜优势种现仅零星出现,而菰侵占沉水植物空间并扩张至湖心。湿地植物群落面积与分布高程由高水位区域向湖底低水位区域延伸,沉水、浮叶植被的分布高程上限降低。

b. 越冬候鸟种群和栖息地发生变化。近年来的监测结果表明,鄱阳湖区候鸟的科、属、种下降明显。多数以小型鱼类和底栖动物为食的黑鹳、苍鹭等种群下降明显,以苔草嫩芽为主食的雁类(如越冬豆雁和鸿雁)种群有所增加。部分对栖息地质量变化较为敏感的种群(如鹤类)的觅食栖息地发生了转移。

c. 渔业资源衰退,江豚生存环境恶化。持续枯水使得一些鱼类产卵场裸露,草洲干涸,产卵场和索饵场面积呈现下降趋势,而江豚与鱼类资源的分布呈显著正相关:水位下降,江豚栖息空间缩小;鱼类减少,江豚食物来源缺乏;快速退水,江豚易困于浅水洼滩。

2.3 水环境质量下降

根据水文部门和环保部门近年的监测数据,鄱阳湖近年来水质呈下降趋势^[15]。1986—2016 年鄱阳湖水质变化见图 2。

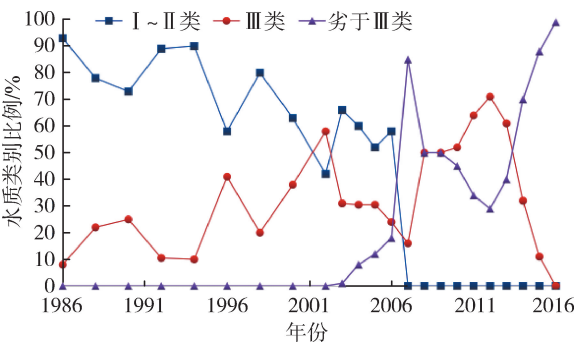


图 2 1986—2016 年鄱阳湖水质变化

从图2可见,2000年湖区Ⅲ类水比例超过Ⅰ~Ⅱ类水,水质呈逐渐下降趋势,但Ⅲ类水比例波动比较大;劣于Ⅲ类水在2003年出现且比例呈上升趋势,后虽有波动但仍占比较高;2006年后湖区Ⅰ~Ⅱ类水比例基本消失,鄱阳湖水维持Ⅲ类或劣于Ⅲ类,至2016年全湖水质几乎均下降为劣于Ⅲ类水。

3 枯水期水位变化的原因

鄱阳湖枯水期水位变化,既与鄱阳湖和长江上中游天然降雨有关,又与长江干流控制性水库蓄水所带来的长江来水量变化、区域内河道冲淤变化以及水库清水下泄致使河道下切等因素相关。由于影响因子多且繁杂,各因子的影响程度难于精准量化,故主要从流域降雨、三峡水库及上游水库蓄水、入江水道冲刷等3方面作简要分析,估算它们对鄱阳湖枯水期水位的影响权重。

3.1 鄱阳湖流域和长江上中游流域降雨减少

对长江流域湖口以上(不含鄱阳湖流域)和鄱阳湖流域降水量资料统计分析发现,2003—2016年属水文长系列中的一个枯水时段。将2003—2016年与1956—2002年系列进行比较(表3),发现鄱阳湖和长江湖口以上流域的年降水量分别减少5.15%和3.62%,9月至次年3月降水量分别减少3.02%和5.98%。因降雨减少,长江宜昌站、汉口站、大通站、鄱阳湖五河七口控制站和湖口站实测径流量分别减少8.1%、5.3%、6.1%、7.8%和6.6%。

表3 长江流域湖口以上和鄱阳湖流域降水量统计

时 段	长江流域湖口以上		鄱阳湖流域	
	单位:mm			
	多年 平均值	9月至 次年3月	多年 平均值	9月至 次年3月
1956—2002年	999.2	324.3	1651.5	609.7
2003—2016年	963.1	304.9	1566.5	591.3

3.2 长江上游干支流控制性水库蓄水

2008年三峡水库开始试验性蓄水,三峡水库和上游水库蓄水量增大,表4为2003年以来三峡水库蓄放水还原前后的各月径流量情况。

三峡水库蓄水期为9—11月,下泄流量明显减小,尤以10月最严重,而2003—2016年系列湖口站10月径流量占大通站的比例比1956—2002年系列增加了1.7%(绝对值),因此,三峡水库蓄水期长江干流流量减少,湖口水位降低,鄱阳湖出流加快,拉低了湖区水位。根据《长江流域综合规划(2012—2030年)》,长江上游干支流规划的控制性水库调节总库容约1000亿 m^3 ,未来随着长江上游水库群逐渐建成,其蓄水对上下游的影响会进一步加重,鄱阳湖枯水形势将更趋严峻。

表4 三峡水库运行前后各月径流量变化

月份	平均流量变化值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		径流量变化值/亿 m^3	
	2003—2016年	2008—2016年	2003—2016年	2008—2016年
1	545	922	14.6	24.7
2	932	1510	22.7	36.8
3	601	915	16.1	24.5
4	220	340	5.7	8.8
5	1344	2042	36.0	54.7
6	177	752	4.6	19.5
7	-691	-1176	-18.5	-31.5
8	37	67	1.0	1.8
9	-1969	-3148	-50.8	-81.6
10	-2319	-3062	-62.1	-82.0
11	-150	-228	-3.9	-5.9
12	239	385	6.4	10.3

注:表中数据为相应时段实测系列特征值减去2003—2016年还原后系列特征值。

3.3 长江中下游河道冲淤变化

长江上游干支流水库群蓄水,水库调节后的“清水”下泄将导致中下游河道发生大范围的冲淤变化。

a. 冲淤变化使得中下游河道同流量水位降低。根据1998—2012年实测水文资料,结合三峡水库蓄水和实验性蓄水等不同阶段资料,按照1998—2002年、2003—2007年、2008—2012年3个时段来拟合水位流量关系,结果见图3和图4。从图3和图4可见,与20世纪90年代综合线相比,2008—2012年九江站流量为1万 m^3/s 和2.6万 m^3/s 时,水位分别降低0.96m和0.31m;大通站流量为1万 m^3/s 和4万 m^3/s 时,水位分别降低0.33m和0.14m。

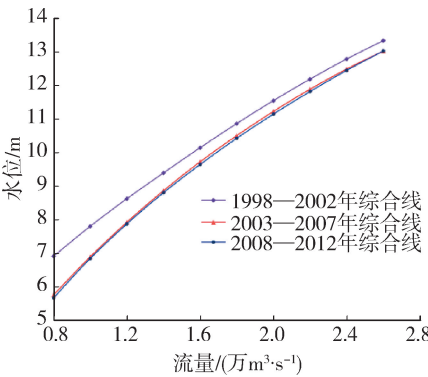


图3 九江站分时段综合水位流量关系

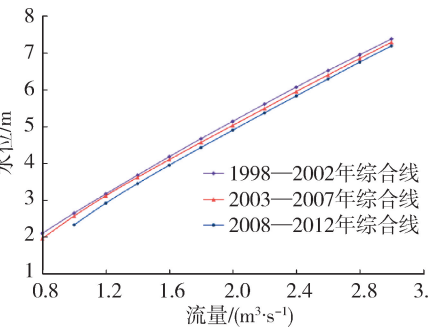


图4 大通站分时段综合水位流量关系

b. 湖口站水位将大幅度降低。根据有关研究^[16],采用丰、平、枯及特枯 4 个代表性典型年份和 4 个代表性典型枯水时段,考虑长江上游 24 座控制性水库和南水北调中线一期工程的影响,可得出三峡水库等上游干支流水库蓄水期对湖口站水位影响,见表 5。

表 5 典型年和代表性典型枯水时段湖口站水位

时 间	降低情况		单位:m	
	典型年 水位降低 最大值的 平均值	典型年 水位降低 平均值	考虑各种因素的 2042 年干流河道 冲刷下切的 影响	考虑各种因素的 2042 年干流河道 水位降低 平均值
9 月上旬	0.63	0.52	1.06	0.97
9 月中旬	1.68	1.04	2.23	1.52
9 月下旬	2.23	2.15	2.85	2.75
10 月上旬	2.76	2.40	3.56	3.13
10 月中旬	2.77	2.25	3.59	2.99
10 月下旬	1.56	1.34	2.07	1.89
11 月上旬	1.09	0.89	1.69	1.53
11 月中旬	0.62	0.46	1.25	1.05
11 月下旬	0.36	0.30	0.96	0.36

c. 长江干流水库群枯水期补水难以影响湖区。三峡水库等上游干支流控制性水库运行后,每年 1—3 月补水对湖口站水位有一定的抬升作用,在不考虑干流河道冲刷情况下 1—3 月各月平均水位分别抬高 0.35 m、0.77 m 和 0.76 m,但长江干流水位的抬升仅可影响鄱阳湖入江水道,减缓鄱阳湖水出湖,对湖区水位的抬升作用很小。

3.4 鄱阳湖入江水道冲刷

a. 鄱阳湖入出湖沙量变化。根据“五河”入湖和湖口出湖实测泥沙资料统计,1956—2002 年年均入湖沙量 1 465 万 t,年均出湖沙量 938 万 t;2003—2015 年年均入湖沙量 592 万 t,年均出湖沙量 1 222 万 t。由此可知,2003 年以后年均入湖沙量减少了 873 万 t,出湖沙量增加了 284 万 t,可以近似地认为 2003—2015 年年均冲刷了 1 157 万 t。

b. 长江干流倒灌沙量减少。三峡水库运行后,特别是实行中小洪水调度后,减少了干流洪水的上涨幅度,使洪水倒灌入湖的机会减小,且长江干流含沙量减小,干流倒灌入湖的沙量更少,2003 年以前、三峡水库运行后的 2003—2008 年和中小洪水调度后的 2009—2015 年年均倒灌沙量分别为 157 万 t、81 万 t 和 2 万 t。

c. 鄱阳湖冲刷主要在入江水道。鄱阳湖入江水道的河床下切和枯水过流断面的增大,导致相同水位时湖口至星子段的水面比降明显减小,平均水位落差从 1956—2002 年的 0.57 m 减小至 2003—2016 年的 0.28 m,湖口站 12 m 以下水位时的平均落差相应从 0.85 m 减小至 0.35 m。

4 应对鄱阳湖枯水期水位变化的对策

鄱阳湖枯水期水位变化引起了各方的重视,并开展了一系列研究工作。为应对低枯水位常态化带来的影响,从工程措施和非工程措施两个方面出发,提出了“零方案(现状)、分散引提水方案、优化水库调度方案、鄱阳湖水利枢纽方案以及分控方案”等措施^[17]。经深入研究,在入江水道建设鄱阳湖水利枢纽工程,充分利用汛末洪水资源,采用闸门控制,整体调节湖区水位,是综合解决枯水期水位变化的最佳方案。

4.1 鄱阳湖水利枢纽工程枯水期水位的调节

鄱阳湖水利枢纽工程采用调枯不调洪方式调度,总调控期为每年 9 月至次年 3 月。枢纽工程汛末蓄水时间为 9 月 1—15 日,最高调控水位 14.5 m (较 1959—2002 年多年平均水位高 0.3 m;若当年来水较少,在满足最小生态、通航流量前提下,不必达到最高调控水位);若长江来水偏枯(大通站流量小于 1.5 万 m³/s),则枢纽工程不调蓄。9 月中旬至 11 月底,按照星子站多年平均水位变化节律,恢复江湖关系,将拦蓄的水量逐步下泄,在 10 月底以前适当考虑湖区灌溉需水位。12 月至次年 2 月底,在对湿地和候鸟的影响尽可能小的前提下,适当抬高枯水期水位,调整江湖关系,改善湖区的城乡供水、航运条件,增大鱼类和江豚活动空间,增加湖区水环境容量,并为长江干流下游应急补水。次年 3 月,在满足湿地植被萌发、生长的前提下,来水直接敞泄,延缓湖区淤积速度,减缓入湖污染物在湖区的沉积。

4.2 鄱阳湖水利枢纽工程枯水期水位调节的影响

a. 民生方面。枢纽可提高环湖 79 座水厂和 60 万农村人口的供水保障率;提高现有 17.53 万 hm²、新增 2.11 万 hm² 灌溉面积的灌溉保证率;增加枯水期航道水深和宽度,恢复和改善通航条件;增加渔业资源,提高渔民收入,减小湖区渔政管理的复杂性。

b. 水生态方面。①鄱阳湖水利枢纽工程尽可能按接近三峡水利枢纽工程运行前自然的水文节律调度,使不同高程的湿地有序出露,减缓湿地植被的退化。调控水位 10 m 与同期水位 7 m 相比,全湖草洲淹没比例不足 5%,而且大部分是浅水水域,当调控水位降低,影响更小。②可增加枯水期水面面积,湿地植被和水生生物的生境得到较大改善,可拓展越冬候鸟栖息觅食空间,为候鸟提供足够的食物来源。③可增加枯水期鱼类资源和江豚的生存空间,为江豚提供更多的饵料,降低其伤亡概率。鄱阳湖水利枢纽工程采用全闸门控制,尽量减缓江湖阻隔,设置最宽 60 m 的闸门,便于江豚在江湖间游弋。对

少部分越冬鱼类洄游干流深水江段产生的影响,可通过设置鱼道、增加闸门开孔数量等减缓影响,且湖区枯水期水位抬高亦可弥补其影响。

c. 水环境方面。鄱阳湖水利枢纽工程可增加枯水期水资源量以及水环境容量,降低水中的营养盐浓度,提高水体透明度。因流速降低,可能导致部分湖湾、尾闾等水域污染物降解能力减弱,并带来污染物沉积累积性风险,也可能存在局部区域发生藻类水华的潜在风险。由于鄱阳湖湖水流动性较大,按湖口 11 月至次年 4 月多年平均径流量计算,湖区最高水位与多年平均水位的区间内水体交换频次不低于 20 次,局部水域出现水体富营养化等生态风险的可能性相对较小。

d. 对长江下游补水作用。鄱阳湖水利枢纽工程蓄水时,长江水位高,流量大,对干流影响较小。通过调控,工程可在三峡水库蓄水期增加 13.59 亿 m^3 泄量,水位降至 10 m 可为下游补水 7 亿 m^3 ,可提高湖口以下长江干流水资源安全的保证率。

5 结 语

长江上游干支流控制性水库蓄水、长江中下游河道和入江水道冲刷是造成鄱阳湖枯水期水位变化的主要原因。兴建鄱阳湖水利枢纽工程,采取科学合理的调度方式,充分利用汛末洪水资源,是有效应对鄱阳湖枯水期水位变化的最佳方案。工程全闸门控制,汛期敞泄,枯水期调控,对民生、水生态、水环境的影响利大于弊,蓄水期对长江干流流量影响小,枯水期有补水作用。通过恢复鄱阳湖的水文节律,调整江湖关系,可筑牢鄱阳湖枯水期生态屏障,其产生的可能不利影响,可在工程运行中不断完善。

参考文献:

- [1] 方春明,曹文洪,毛继新,等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响[J]. 水利学报,2012,43(2):175-181. (FANG Chunming, CAO Wenhong, MAO Jixin, et al. Relationship between Poyang Lake and Yangtze River and influence of Three Georges Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2):175-181. (in Chinese))
- [2] 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[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):13-18. (DONG Zengchuan, LIANG Zhongmin, LI Dayong, et al. Influences of Three Gorges Project on water resources and ecological effects in Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(1):13-18. (in Chinese))
- [3] 中国水利水电科学研究院. 鄱阳湖枯期水位变化研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017.

- [4] 刘志刚,倪兆奎. 鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响[J]. 环境科学学报,2015,35(5):1265-1273. (LIU Zhigang, NI Zhaokui. The rules and the effects of varying river-lake relationship on the evolution of Poyang Lake [J], Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5):1265-1273. (in Chinese))
- [5] 欧阳千林,王婧,司武卫,等. 鄱阳湖入江水道冲淤变化特征[J]. 水资源保护,2018,34(6):60-64. (OUYANG Qianlin, WANG Jing, SI Wuwei, et al. Characteristics of scouring and deposit change in waterway of Poyang Lake to Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):60-64. (in Chinese))
- [6] 吴龙华. 长江三峡工程对鄱阳湖生态环境的影响研究[J]. 水利学报,2017(10):586-591. (WU Longhua. The study on effects of Three Gorges Project to environment of Poyang Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(10):586-591. (in Chinese))
- [7] 刘影,徐燕. 三峡工程对鄱阳湖候鸟保护区的影响及对策探讨[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),1994,18(4):375-380. (LIU Ying, XU Yan. The study of influence and countermeasure of Sanxia Project to Poyang Lake's birds reserve [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Sciences),1994,18(4):375-380. (in Chinese))
- [8] 姜家虎,黄群. 三峡工程对鄱阳湖水位影响研究[J]. 自然资源学报,1997(3):219-224. (JIANG Jiahu, HUANG Qun. A study of the impact of the Tree Gorges Project on the water level of Poyang Lake [J]. Journal of Natural Resources,1997(3):219-224. (in Chinese))
- [9] 施勇,栾振宇. 三峡工程运行后对鄱阳湖及江西五河的影响研究;对鄱阳湖水位变化的影响[R]. 南京:南京水利科学研究院,2009.
- [10] 胡春宏,阮本清. 鄱阳湖水利枢纽工程的作用及其影响研究[J]. 水利水电技术,2011(1):1-16. (HU Chunhong, RUAN Benqing. Study on roles and pacts of Poyang Lake Water Control Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(1):1-16. (in Chinese))
- [11] 唐昌新,张晓航,邹年华,等. 拟建鄱阳湖水利枢纽工程对水龄的影响模拟分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):195-206. (TANG Changxin, ZHANG Xiaohang, WU Nianhua, et al. Simulation of the impacts of the Poyang Lake hydraulic project on water age [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(3):195-206. (in Chinese))
- [12] 赖格英,王鹏,黄小兰,等. 鄱阳湖水利枢纽工程对鄱阳湖水文水动力影响的模拟[J]. 湖泊科学,2015,27(1):128-140. (LAI Geying, WANG Peng, HUANG Xiaolan, et al. A simulation research of impacts of the Lake Poyang hydraulic project on hydrology and hydrodynamics [J]. Journal of Lake Sciences,2015,27(1):128-140. (in Chinese))

(下转第 123 页)

- Science & Technology,2018,52:2278-2286.
- [69] WEBER A, SCHERER C, BRENNHOLT N, et al. PET microplastics do not negatively affect the survival, development, metabolism and feeding activity of the freshwater invertebrate *Gammarus pulex* [J]. Environmental Pollution,2018,234:181-189.
- [70] LEI L, WU S, LU S, et al. Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. Science of the Total Environment,2018,619-620:1-8.
- [71] KASHIWADA S. Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*) [J]. Environmental Health Perspectives,2006,114(11):1697-1702.
- [72] DING J, ZHANG S, RAZANAJATOVO R M, et al. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Environmental Pollution,2018,238:1-9.
- [73] PITT J A, KOZAL J S, JAYASUNDARA N, et al. Uptake, tissue distribution, and toxicity of polystyrene nanoparticles in developing zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Aquatic Toxicology,2018,194:185-194.
- [74] KARAMI A, GROMAN D B, WILSON S P, et al. Biomarker responses in zebrafish (*Danio rerio*) larvae exposed to pristine low-density polyethylene fragments [J]. Environmental Pollution,2017,223:466-475.
- [75] KIM S W, CHAE Y, KIM D, et al. Zebrafish can recognize microplastics as inedible materials; quantitative evidence of ingestion behavior [J]. Science of the Total Environment,2019,649:156-162.
- [76] JABEEN K, LI B, CHEN Q, et al. Effects of virgin microplastics on goldfish (*Carassius auratus*) [J]. Chemosphere,2018,213:323-332.
- [77] 陈启晴,杨守业, HENNER H, 等. 微塑料污染的水生生态毒性与载体作用[J]. 生态毒理学报,2018,13(1): 16-30. (CHEN Qiqing, YANG Shouye, HENNER H, et al. The ecotoxicity and carrier function of microplastics in the aquatic environment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2018,13(1):16-30. (in Chinese))
- [78] 周倩,章海波,李远,等. 海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展[J]. 科学通报,2015,60(33):3210-3220. (ZHOU Qian, ZHANG Haibo, LI Yuan, et al. Progress on microplastic pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2015,60(33):3210-3220. (in Chinese))
- [79] 徐擎擎,张弢,邹亚丹,等. 微塑料与有机污染物的相互作用研究进展[J]. 生态毒理学报,2018,13(1):40-49. (XU Qingqing, ZHANG Ge, ZOU Yadan, et al. Interactions between microplastics and organic pollutants: current status and knowledge gaps[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2018,13(1):40-49. (in Chinese))
- [80] LU K, QIAO R, AN H, et al. Influence of microplastics on the accumulation and chronic toxic effects of cadmium in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Chemosphere, 2018, 202: 514-520.
- [81] LI J, ZHANG K, ZHANG H. Adsorption of antibiotics on microplastics [J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 460-467.
- [82] LLORCA M, SCHIRINZI G, MARTINEZ M, et al. Adsorption of perfluoroalkyl substances on microplastics under environmental conditions [J]. Environmental Pollution,2018,235:680-691.
- [83] BATEL A, BORCHERT F, REINWALD H, et al. Microplastic accumulation patterns and transfer of benzo [a] pyrene to adult zebrafish (*Danio rerio*) gills and zebrafish embryos [J]. Environmental Pollution, 2018, 235:918-930.
- (收稿日期:2018-12-15 编辑:王 芳)

(上接第 108 页)

- [13] 郭恢财,李琴,胡斌华,等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对自然保护区候鸟栖息地的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (1): 181-186. (GUO Huicai, LI Qin, HU Binhua, et al. Influence of hydro-junction project on migratory birds habitat in natural reserves of Poyang Lake [J]. Environmental Science & Technology,2016,39(1): 181-186. (in Chinese))
- [14] 李海辉,段明,钟正. 关于鄱阳湖水利枢纽生态环境影响评价的一些思考[J]. 江西水利科技,2014,40(3): 175-177. (LI Haihui, DUAN Ming, ZHONG Zheng. Thought of ecological environment influence evaluation on Poyang Lake Water Control Project[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2014, 40 (3): 175-177. (in Chinese))
- [15] 万金保,蒋胜韬. 鄱阳湖水环境分析及综合治理[J]. 水资源保护,2006,22(3):24-27. (WAN Jinbao, JIANG Shengtao. Analysis and comprehensive treatment of aquatic environment in Poyang Lake [J]. Water Resources Protection,2006,22(3):24-27. (in Chinese))
- [16] 水利部长江水利委员会. 鄱阳湖水情变化及水利枢纽有关影响研究[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2013.
- [17] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 鄱阳湖水利枢纽工程项目建议书补充研究报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2015.
- (收稿日期:2019-01-16 编辑:彭桃英)