

山东南四湖摇蚊幼虫群落结构及其对富营养化过程的指示*

舒凤月** 孔亮 王赛迪 訾芳芳

(曲阜师范大学山东省南四湖湿地生态与环境保护重点实验室 曲阜 273165)

摘要 2010年7月至2011年4月对南四湖摇蚊幼虫群落结构进行了季度调查. 共采集到12种摇蚊幼虫, 平均密度和生物量分别为 (861 ± 701) ind/m²和 (6.39 ± 5.12) g/m². 优势种红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*) 和羽摇蚊 (*Chironomus plumosus*) 的密度以及生物量分别占总密度和总生物量的97.1%和99.1%, 但红裸须摇蚊的密度和生物量显著高于羽摇蚊, 分别是羽摇蚊的18.5倍和10.7倍. 从水平分布看, 红裸须摇蚊在上级湖的密度明显高于下级湖, 羽摇蚊则呈全湖性分布, 但密度较低. 与历史资料相比, 南四湖摇蚊幼虫群落发生了显著变化, 摇蚊幼虫的平均密度由20世纪80年代初期的88 ind/m²增加到目前的861 ind/m², 优势种由20世纪80年代的羽摇蚊演变为当前的红裸须摇蚊, 并且红裸须摇蚊的密度显著升高, 这表明南四湖的富营养化趋势加剧. 图3 表5 参27

关键词 摇蚊幼虫; 红裸须摇蚊; 羽摇蚊; 群落结构; 富营养化; 南四湖

CLC Q178.51⁺3 : X824

Chironomid Larva Community and Indication to Eutrophication Progress in Lake Nansi, Shandong, China*

SHU Fengyue**, KONG Liang, WANG Saidi & ZI Fangfang

(Shandong Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment Conservation of Lake Nansi, Qufu Normal University, Qufu 273165, Shandong, China)

Abstract Seasonal variance of community structures of chironomid larvae was studied in the shallow eutrophic Lake Nansi from July 2010 to April 2011. A total of 12 taxa of chironomid larvae were captured in this survey. The larval density and biomass for the entire lake were (861 ± 701) ind/m² and (6.39 ± 5.12) g/m², respectively. The dominant species were *Prosilocerus akamusi* and *Chironomus plumosus*, which constituted 97.1% and 99.1% of total chironomid density and biomass, but the larval density and biomass of *P. akamusi* were 18.5 times and 10.7 times those of *C. plumosus*. Furthermore, *P. akamusi* distributed in the Upper Lakes were with high densities, while *C. plumosus* larvae showed very low densities at all stations. The present and previous data of the density and species composition of chironomid larvae in Lake Nansi were compared, and it was found that the larval density had gradually increased from 88 ind/m² in 1980's to 861 ind/m² in 2010-2011; the predominant species in this lake seemed to have changed from *C. plumosus* in 1980's to *P. akamusi* in 2010-2011, in particularly, larval density of *P. akamusi* has greatly increased, which indicated that eutrophic conditions were aggravated in the lake. Fig 3, Tab 5, Ref 27

Keywords chironomid larva; *Prosilocerus akamusi*; *Chironomus plumosus*; community structure; eutrophication; Lake Nansi

CLC Q178.51⁺3 : X824

摇蚊幼虫是湖泊底栖动物的重要组成部分, 目前已知种类约4 147种^[1], 其数量往往占湖泊底栖动物密度的50%以

上, 而且分布广泛, 几乎遍及所有淡水水体, 在淡水生态系统的物质循环和能量流动中起重要作用^[2]. 大量研究表明, 摇蚊幼虫的物种组成、数量和分布与水体的理化因子(如水深、温度、pH、溶解氧、底质类型、重金属和营养盐等)密切相关^[3-5], 因此, 摇蚊幼虫在欧美和日本被广泛用于水质评价^[6-7]、湖泊分类^[8]和古湖沼学研究^[9]. 目前国内在摇蚊幼虫生态学方面的研究主要结合在底栖动物中, 单独涉及该类群的研究较少^[10-12].

收稿日期 Received: 2012-02-08 接受日期 Accepted: 2012-03-20

*国家林业局“948”项目(2012-4-73)、山东省教育厅项目和曲阜师范大学项目(XJ200920)资助 Supported by the “948” Program of the State Forestry Administration of China (No. 2012-4-73), the Program of Shandong Provincial Education Department and the Program of Qufu Normal University (No. XJ200920)

** 通讯作者 Corresponding author (E-mail: shfyue01@163.com)

南四湖是我国北方最大的淡水湖,同时亦是南水北调东线工程重要的调蓄湖泊和输水通道,其水质状况不仅与湖区水生生态系统的健康密切相关,而且关系到输水水质安全^[13]。但自上世纪80年代以来,南四湖水质逐年恶化,富营养化程度不断加重^[14],而水环境的改变必将对底栖动物产生深刻的影响,尤其对摇蚊幼虫的优势种^[7]。本文报道了南四湖摇蚊幼虫群落结构的时空变化特点研究,并通过与以往研究相比较,讨论了南四湖摇蚊幼虫随着湖泊环境变化的演替趋势,以为南四湖水环境的监测与评价提供基础资料。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

南四湖由南阳湖、昭阳湖、独山湖和微山湖自北向南相连而成湖泊的总称,位于山东省西南部(116°34′-117°21′E, 34°27′-35°20′N),面积约1 266 km²,南北长126 km,东西宽5-10 km,平均水深1.5 m。1960年在湖腰建成二级坝枢纽,坝北为上级湖,坝南为下级湖。南四湖有直接入湖河道53条,其中30条注入上级湖,23条注入下级湖,总流域面积31 700 km²。

1.2 样点设置

于2010年7月、10月和12月以及2011年4月对南四湖底栖动物进行了季度调查。全湖共设置18个采样点,其中南阳湖、昭

阳湖和独山湖各设置4个样点,微山湖设置6个样点(图1)。

1.3 研究方法

1.3.1 理化因子测定 水深采用常规的测深锤测量,水温 and 溶解氧用溶解氧仪(810A)测定, pH用酸度计(410A)测定, 电导率用电导率仪(HI 933301)测定,透明度(SD)用透明度盘测定,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法,叶绿素a采用丙酮萃取法^[15]。综合营养状态指数(TSI)的计算和评价标准参照《中国湖泊富营养化》^[16]。

1.3.2 样品采集 摇蚊幼虫的采集使用1/16 m²的彼得生式采泥器,泥样经60目/英寸的铜筛筛洗后在解剖盘中将标本检出,用10%福尔马林固定后在实验室进行鉴定、计数和称重,然后换算成摇蚊幼虫的密度和生物量。称量湿重之前先用滤纸吸干动物体表水份,然后用电子天平(精度为0.0001 g)称量。摇蚊幼虫的种类鉴定参照相关文献^[17-18]。

2 结果

2.1 湖泊环境

表1给出了研究湖区各种环境参数的年均值。按照综合营养状态指数(TSI)的评价标准^[18],从表1可以看出,南四湖整体上处于富营养化状态,其中,南阳湖营养盐的含量显著高于其它湖区,处于中度富营养化状态,昭阳湖虽然处于轻度富营养化,但其TSI值已接近中度富营养化的临界值,独山

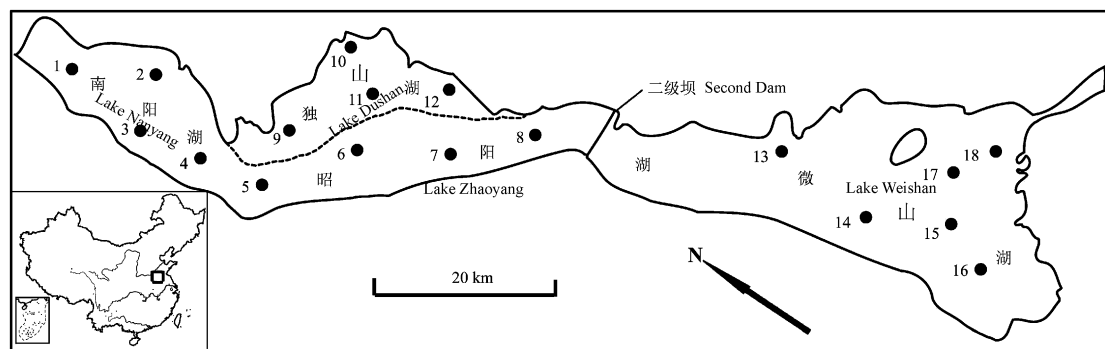


图1 南四湖采样点的分布

Fig. 1 Sampling stations in Lake Nansi

表1 研究湖区理化参数的年平均值($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Annual means ($\bar{x} \pm s$) of physico-chemical parameters in research regions

参数 Parameter	南阳湖 Lake Nanyang	昭阳湖 Lake Zhaoyang	独山湖 Lake Dushan	微山湖 Lake Weishan	全湖平均 Mean
水深 Water depth ($\bar{d}/m$)	1.9±0.7	2.3±0.7	2.3±1.0	1.9±0.3	2.1±0.7
透明度 Transparency (T/m)	0.8±0.6	0.7±0.5	1.0±0.8	0.8±0.3	0.8±0.5
水温 Water temperature ($\theta/^\circ C$)	15.6±10.7	15.1±9.6	15.6±10.0	16.2±9.7	15.7±9.8
泥温 Mud temperature ($\theta/^\circ C$)	15.1±9.2	15.0±9.2	15.1±8.9	15.4±8.1	15.2±8.6
溶解氧 Dissolved oxygen ($\rho/mg L^{-1}$)	11.9±2.4	10.3±2.1	10.6±3.3	10.6±2.4	10.8±2.6
pH (25 $^\circ C$)	8.4±0.5	8.4±0.5	8.4±0.6	8.6±0.5	8.4±0.5
电导率 Electrical conductivity ($\kappa/\mu S cm^{-2}$)	1415.2±373.1	1257.8±186.3	1158.3±157.5	1093.4±71.3	1215.8±242.5
总氮 TN ($\rho/mg L^{-1}$)	3.830±1.030	2.160±0.903	2.106±0.821	2.453±1.107	2.617±1.176
总磷 TP ($\rho/mg L^{-1}$)	0.192±0.141	0.121±0.084	0.081±0.056	0.067±0.042	0.110±0.096
叶绿素 Chlorophyll ($\rho/mg L^{-1}$)	0.073±0.069	0.049±0.057	0.031±0.037	0.019±0.013	0.041±0.050
TSI	65.3±11.9	59.7±11.1	54.9±10.7	53.8±7.0	57.9±10.8

湖和微山湖均处于轻度富营养化状态。

2.2 物种组成

共采集到12种摇蚊幼虫(表2), 其中, 摇蚊亚科种类最多(8种), 长足摇蚊亚科和直突摇蚊亚科各2种。从各湖区来看, 微山湖种类最多, 有9种, 其它3个湖区各6种。羽摇蚊、红裸须摇蚊和长足摇蚊属一种是各湖区的共有种, 其它种类在各湖区间存在一定差异。

表2 南四湖各湖区摇蚊幼虫的种类组成
Table 2 Taxonomic composition of larval chironomids in research regions

种类 Taxa	南阳湖 Lake Nanyang	昭阳湖 Lake Zhaoyang	独山湖 Lake Dushan	微山湖 Lake Weishan
摇蚊亚科 Chironominae				
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	+	+	+	+
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp.		+	+	+
小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.	+			+
异腹鳃摇蚊 <i>Einfeldia</i> sp.				+
内摇蚊 <i>Endochironomus</i> sp.	+			
雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes</i> sp.		+	+	
格莱德摇蚊 <i>Goeldichironomus</i> sp.			+	+
二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes</i> sp.		+		
长足摇蚊亚科 Tanypodinae				
长足摇蚊 <i>Tanypus</i> sp.	+	+	+	+
前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.				+
直突摇蚊亚科 Othocladiinae				
红裸须摇蚊 <i>Prosilocerusi akamusi</i>	+	+	+	+
环足摇蚊 <i>Cricotopus</i> sp.	+			+

2.3 现存量

南四湖摇蚊幼虫的年平均密度为(861±701) ind/m², 年平均生物量为(6.39±5.12) g/m²。微山湖摇蚊幼虫的密度和生物量显著低于南阳湖、昭阳湖和独山湖(表3; $P<0.01$), 而三者之间密度和生物量的差异不显著(表3; $P>0.05$)。

图2显示了南四湖摇蚊幼虫密度和生物量的季节变化。可以看出, 南四湖摇蚊幼虫密度和生物量的季节变化趋势一致, 均是冬季最高(密度和生物量分别为2 312 ind/m²和14.72 g/m²), 其次为春季和秋季, 夏季最低(密度和生物量分别为52 ind/m²和0.36 g/m²)。

2.4 优势种

南四湖全年摇蚊幼虫群落的优势种为红裸须摇蚊和羽摇蚊, 红裸须摇蚊为第一优势种, 年平均密度和生物量分别为795 ind/m²和5.79 g/m², 分别占总密度和总生物量的92.3%和90.5%; 羽摇蚊的年平均密度和生物量分别为43 ind/m²和0.54 g/m², 分别占总密度和总生物量的5.0%和8.5%。红裸须摇蚊密度和生物量分别是羽摇蚊的18.5倍和10.7倍。

各湖区的优势种与南四湖一致, 均为红裸须摇蚊和羽

摇蚊, 但两者的密度和生物量在各湖区之间存在差异(表3)。南阳湖红裸须摇蚊的密度和生物量最高(所占比例分别为97.5%和97.3%), 其次分别为独山湖(所占比例分别为95.1%和95.7%)和昭阳湖(所占比例分别为96.9%和98.2%), 微山湖的显著低于上述3个湖区($P<0.01$), 红裸须摇蚊的密度和生物量所占比例也明显偏小, 分别为45.3%和43.9%, 而微山湖羽摇蚊的密度和生物量高于其它3个湖区, 但差异不显著($P>0.05$)。

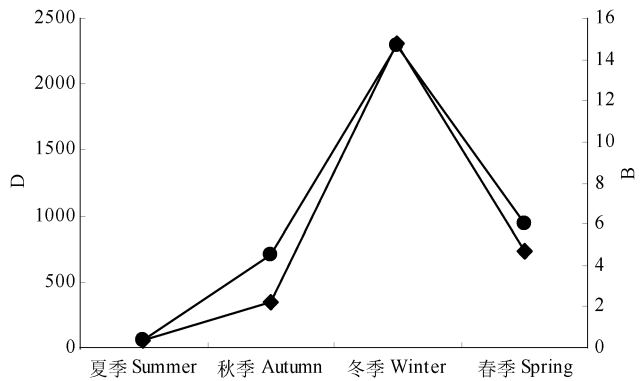


图2 南四湖摇蚊幼虫密度(D, n/ind m⁻², ◆)和生物量(B, g/g m⁻², ●)的季节变化

Fig. 2 Seasonal change in density (D, n/ind m⁻², ◆) and biomass (B, g/g m⁻², ●) of chironomids in Lake Nansi

图3显示了南四湖红裸须摇蚊和羽摇蚊密度的水平分布。可以看出, 红裸须摇蚊的分布不均匀, 上级湖(南阳湖、昭阳湖和独山湖)的丰度明显高于下级湖($P<0.01$), 密度的最大值出现在2号样点, 为1 932 ind/m²; 相比较而言, 羽摇蚊的分布则比较均匀, 其密度的最大值出现在17号样点, 为464 ind/m², 其它样点的密度在0-62 ind/m²之间。

表4给出了南四湖各季节优势种的密度和生物量。可以看出, 春季、秋季和冬季的优势种各有2种, 夏季的优势种有5种, 其中红裸须摇蚊和羽摇蚊为共有的优势种。红裸须摇蚊的密度和生物量在冬季最高, 其次分别为春季和秋季, 夏季最低, 其密度和生物量分别为8 ind/m²和0.08 g/m²。羽摇蚊的密度和生物量在冬季最高, 其次分别为春季和夏季, 秋季最低。

2.5 群落演替

与20世纪80年代初期相比, 记载的南四湖摇蚊幼虫种类存在较大差异(表5)。1983-1984年记录摇蚊幼虫6种, 到了1987-1988年和2010-2011年, 种类数分别增加了5种和6种; 从密度来看, 20世纪80年代后期摇蚊幼虫的密度比80年代初期增加了2.9倍, 到了2010-2011年, 密度增加了8.8倍, 达到了861 ind/m², 生物量也相应增加了8.1倍; 摇蚊幼虫的优势种亦发生显著变化, 20世纪80年代, 羽摇蚊为第一优势种, 到了2010-2011年, 羽摇蚊成为第二优势种, 红裸须摇蚊在前两次调查中未采集到, 但目前已成为南四湖摇蚊幼虫群落的绝对

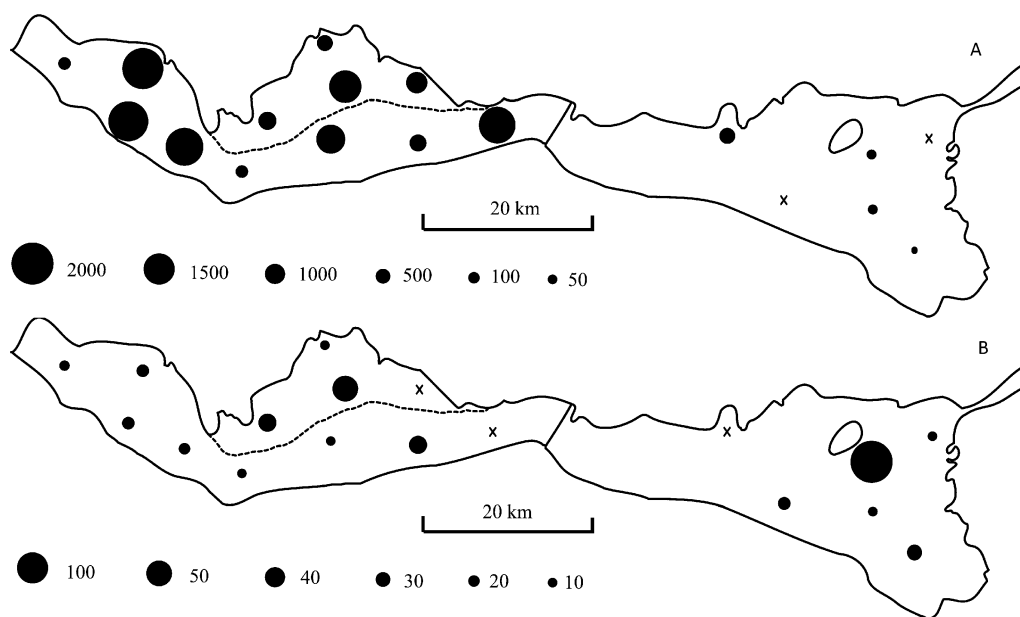
图3 南四湖红裸须摇蚊和羽摇蚊密度 ($n/\text{ind m}^{-2}$) 的水平分布

Fig. 3 Horizontal distribution of the densities ($n/\text{ind m}^{-2}$) of *Propsilocerusi akamusi* (A) and *Chironomus plumosus* (B) in Lake Nansi
“x”表示单位面积内零个体 “x” indicate zero individuals per square meter

表3 南四湖及各湖区摇蚊幼虫密度 (D) 和生物量 (B) 的平均值 ($\bar{x} \pm s$)Table 3 Mean densities (D, $\bar{x} \pm s$) and mean biomasses (B, $\bar{x} \pm s$) of larval chironomids in research regions

种类 Taxa	南阳湖 Lake Nanyang		昭阳湖 Lake Zhaoyang		独山湖 Lake Dushan		微山湖 Lake Wishan	
	D	B	D	B	D	B	D	B
摇蚊幼虫 Chironomidae (total)	1468±826	9.39±4.32	1024±630	8.52±4.94	1061±421	7.30±6.20	215±259	2.38±3.08
红裸须 <i>Propsilocerusi akamusi</i>	1431±834	9.13±4.43	992±651	8.36±5.06	1010±416	6.98±6.04	97±202	1.04±2.04
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	21±4	0.23±0.10	11±17	0.11±0.21	26±27	0.23±0.26	91±183	1.26±2.66
长足摇蚊亚科 Tanypodinae	6±8	0.02±0.03	16±27	0.04±0.07	10±20	0.03±0.07	6±7	0.01±0.01
其它摇蚊 Others	10±10	0.01±0.01	5±5	0.01±0.01	16±18	0.06±0.07	21±17	0.07±0.10

表4 南四湖摇蚊幼虫优势种密度 (D) 和生物量 (B) 的季节变化

Table 4 Seasonal changes in density (D) and biomass (B) of dominant chironomid species in Lake Nansi

种类 Taxa	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	D	B	D	B	D	B	D	B
羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>	66(9.0%)	1.08(17.9%)	24(46.6%)	0.25(70.4%)	5(1.5%)	0.03(0.8%)	76(3.3%)	0.81(5.5%)
红裸须摇蚊 <i>Propsilocerusi akamusi</i>	631(86.1%)	4.87(80.9%)	8(15.5%)	0.08(21.9%)	339(97.2%)	4.44(99.2%)	2203(95.3%)	13.76(93.5%)
长足摇蚊 <i>Tanytus</i> sp.			4(8.6%)	0.005(1.3%)				
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp.			6(12.1%)	0.02(5.1%)				
微小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.			7(13.8%)	0.003(0.8%)				

括号中数字表示该类群的密度和生物量所占的比例 The values in parenthesis show the percentage of density and biomass of the taxa

优势种, 密度和生物量所占比例均在90%以上. 另外, 从上级湖和下级湖来看, 与20世纪80年代相比, 上级湖摇蚊幼虫的密度显著增加, 增加了13.6倍, 达到了1 184 ind/m², 而下级湖摇蚊幼虫的密度减少了约60%.

3 讨论

大量研究表明, 影响湖泊摇蚊幼虫群落的主要因素是

食物和溶解氧含量, 富营养化水体中初级生产力的升高使食物增加^[6], 因而在富营养化水体中摇蚊幼虫的多样性最高, 但随着富营养化程度的加剧, 又由于夏季底层水体中溶解氧的下降使摇蚊幼虫的多样性降低^[9, 20]. 自20世纪80年代初期以来, 南四湖水体富营养化过程明显加剧, 到了80年代后期, 总氮和总磷的含量分别增加了1.9倍和10.3倍 (表5), 南四湖整体上处于中富—富营养化状态^[16]. 90年代以后, 随着

表5 南四湖环境因子和摇蚊群落的变化
Table 5 Changes in environmental factors and chironomid fauna in Lake Nansi

参数 Parameter	1983- 1984 ^[19]	1987-1988 ^[16]						2010-2011						
		上级湖	Upper Lake	下级湖	Lower Lake	平均	Mean	上级湖	Upper Lake	下级湖	Lower Lake	平均	Mean	
环境因子 Environmental factor														
总氮 TN ($\rho/\text{mg L}^{-1}$)	0.825		2.837		1.995		2.416		2.699		2.453		2.617	
总磷 TP ($\rho/\text{mg L}^{-1}$)	0.018		0.293		0.117		0.205		0.131		0.067		0.110	
叶绿素 Chlorophyll ($\rho/\mu\text{g L}^{-1}$)	-		-		-		2.8		51.0		19.0		41.0	
摇蚊幼虫 Chironomids larva														
种类数 Species number	6		-		-		11		10		9		12	
密度 Density ($n/\text{ind m}^{-2}$)	88		81		518		341		1184		215		861	
生物量 Biomass ($\rho/\text{g m}^{-2}$)	0.7		-		-		-		8.4		2.38		6.39	
优势种 Dominant species	-		羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i>						红裸须摇蚊、羽摇蚊 <i>Propsilocerusi akamusi</i> , <i>Chironomus plumosus</i>					

“-” 无记录 “-” No record

各种治理措施的不断开展,水质有了一定的改善^[21],到了2011年,水体中总磷的含量减少了46%,但总氮含量反而略有上升(表5)。较高的营养水平使南四湖摇蚊幼虫的群落多样性增加,但从物种组成来看,耐污种类的比例和丰度逐渐增高,红裸须摇蚊和羽摇蚊成为优势种,这与我国多数富营养化湖泊^[10, 22-24]一致。

本研究表明,南四湖摇蚊幼虫总密度具有明显的季节变化,其数量高峰出现在冬季,夏季的密度最低,总生物量的季节变化与此一致。结合优势种的季节变化分析表明,摇蚊幼虫密度和生物量的季节变化主要与红裸须摇蚊的数量有关。当底层水温大于19℃时,红裸须摇蚊发生垂直迁移,绝大多数迁移至20-40 cm深的底质中,最大迁移深度甚至达到70 cm,因而导致夏季摇蚊幼虫的数量最低^[10, 25],当底层水温在10-18℃时,摇蚊幼虫往底质表层迁移,秋末进行羽化繁殖,因而密度在冬季达到最高峰^[26-27]。同时,正是由于红裸须摇蚊的这种垂直迁移习性,所以,只有在秋末至翌年春季才能对其进行有效采集^[7]。

羽摇蚊和红裸须摇蚊是湖泊富营养化的典型指示物种^[6-7]。但相比较而言,高温和低溶解氧不利于羽摇蚊的生存,而红裸须摇蚊可通过垂直迁移来适应夏季泥水界面的低溶解氧,因此,后者比前者更能适应富营养化水平的不断升高^[25, 27]。结合南四湖摇蚊幼虫群落的演替来看,20世纪80年代未采集到红裸须摇蚊,但到了2011年,红裸须摇蚊成为第一优势种,其密度和生物量所占的比例均在90%以上,18号样点冬季的密度达到5 600 ind/m²,这表明,自20世纪80年代以来南四湖的富营养化程度明显加剧。从各湖区红裸须摇蚊和羽摇蚊的分布来看,南阳湖、昭阳湖和独山湖红裸须摇蚊的密度显著高于微山湖,而羽摇蚊的密度在各湖区之间无显著差异,表明上级湖红裸须摇蚊的年平均密度增加显著,目前已达到1 144 ind/m²,是下级湖的11.8倍,说明上级湖的富

营养化程度较高,且富营养化过程明显比下级湖快,这主要与上级湖所接纳的工业废水和城镇生活污水等入湖污染物负荷较高以及二级坝的建设使污染物的扩散和稀释减缓有关^[14, 21]。

参考文献 [References]

- Ferrington Jr LC. Global diversity of non-biting midges (Chironomidae; Insecta-Diptera) in freshwater [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **595** (1): 447-455
- Dévai G. Ecological background and importance of the change of chironomid fauna in shallow Lake Balaton [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **191** (1): 189-198
- Oliver DR. Life history of the Chironomidae [J]. *Ann Rev Ent*, 1971, **16**: 211-230
- Botts PS. Spatial pattern, patch dynamics and successional change: chironomid assemblages in a Lake Erie coastal wetland [J]. *Fresh Biol*, 1997, **37** (2): 277-286
- Helson JE, Williams DD, Turner D. Larval Chironomidae community organization in four tropical rivers: human impacts and longitudinal zonation [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **559** (1): 413-431
- Iwakuma T, Yasuno M, Sugaya Y, Sasa M. Three large species of Chironomidae (Diptera) as biological indicators of lake eutrophication [A]. In Yasuno M, Whitton BA eds. *Biological Monitoring of Environmental Pollution* [M]. Tokyo: Tokai University Press, 1988. 101-113
- Hirabayashi K, Yoshizawa K, Yoshida N, Kazama F. Progress of eutrophication and change of chironomid fauna in Lake Yamanakako, Japan [J]. *Limnology*, 2004, **5** (1): 47-53
- Saether OA. Chironomid communities as water quality indicators [J]. *Holarct Ecol*, 1979, **2** (2): 65-74
- Luoto TP. The relationship between water quality and chironomid distribution in Finland-A new assemblage-based tool for assessments of

- long-term nutrient dynamics [J]. *Ecol Ind*, 2011, **11** (2): 255-262
- 10 Guo XW. Studies on chironomid communities of Nanhu Lake (South Lake), Wuhan, China [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 1995, **14** (6): 578-585
 - 11 熊飞, 李文朝, 潘继征. 云南抚仙湖摇蚊幼虫的空间分布及其环境分析[J]. *应用生态学报*, 2007, **18** (1): 179-184 [Xiong F, Li WC, Pan JZ. Spatial distribution and its environmental analysis of chironomid larvae in Fuxian Lake of Yunnan Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (1): 179-184]
 - 12 胡忠军, 刘其根, 陈立婧, 彭自然. 上海崇明明珠湖摇蚊幼虫群落结构特征及其对水质的指示作用[J]. *应用生态学报*, 2009, **20** (4): 929-936 [Hu ZJ, Liu QG, Chen LQ, Peng ZR. Structural characteristics of chironomid community and the indicative significance in bio-assessment of water quality in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **20** (4): 929-936]
 - 13 罗辉, 周建仁, 郭忠. 南水北调对南四湖水环境影响分析与评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005, **33** (1): 63-67 [Luo H, Zhou JR, Guo Z. Analysis and assessment of the impact of South-to-North water diversion project on water environment of Nansihu Lake [J]. *J Hohai Univ Nat Sci*, 2005, **33** (1): 63-67]
 - 14 张祖陆, 辛良杰, 梁春玲. 近50年来南四湖湿地水文特征及其生态系统的演化过程分析[J]. *地理研究*, 2007, **26** (5): 957-966 [Zhang ZL, Xin LJ, Liang CL. The analysis of hydrological characteristics and processes of ecosystem in Lake Nansi during the past 50 years [J]. *Geogr Res*, 2007, **26** (5): 957-966]
 - 15 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002 [State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analysis Method of Water and Wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002]
 - 16 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 章宗涉, 朱萱. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 [Jin XC, Liu HL, Tu QY, Zhang ZS, Zhu X. Lake Eutrophication in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990]
 - 17 Epler JH. Identification Manual for the Larval Chironomidae of North and south Carolina [S]. America: North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality, 2001
 - 18 Morse JC, Yang LF and Tian L. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994
 - 19 济宁科学技术委员会. 南四湖自然资源调查及开发利用研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1987 [The Science and Technology Commission of Jinan, China. Research on Resources Investigation and Exploitation in Lake Nansi [M]. Jinan: Shandong Science and technology Press, 1987]
 - 20 Salonen VP, Alhonen P, Itkonen A, Olander H. The trophic history of Enäjärvi, SW Finland, with special reference to its restoration problems [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **268** (3): 147-162
 - 21 武周虎, 慕金波, 谢刚, 路成刚, 朱婕. 南四湖及入出湖河流水环境质量变化趋势分析[J]. *环境科学研究*, 2010, **23** (9): 1167-1173 [Wu ZH, Mu JB, Xie G, Lu CG, Zhu J. Analysis of water environmental quality variation trends in Nansi Lake and its joined rivers [J]. *Res Environ Sci*, 2010, **23** (9): 1167-1173]
 - 22 钟非, 刘保元, 贺锋, 梁威, 成水平, 左进城, 吴振斌. 水生态修复对莲花湖底栖动物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, **13** (1): 55-60 [Zhong F, Liu BY, He F, Liang W, Cheng SP, Zuo JC, Wu ZB. Effect of aquatic ecological restoration on zoobenthos community of Lotus Lake [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (1): 55-60]
 - 23 蔡永久, 姜加虎, 张路, 陈宇炜, 龚志军. 长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, **22** (6): 811-819 [Cai YJ, Jiang JH, Zhang L, Chen YW, Gong ZJ. Community structure and biodiversity of macrozoobenthos of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *J Lake Sci*, 2010, **22** (6): 811-819]
 - 24 高峰, 尹洪斌, 胡维平, 邓建才, 高俊峰. 巢湖流域春季大型底栖动物群落生态特征及与环境因子关系[J]. *应用生态学报*, 2010, **21** (8): 2132-2139 [Gao F, Yin HB, Hu WP, Deng JC, Gao JF. Ecological characteristics of macrobenthos communities in Chaohu basin in spring and their relationships with environmental factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (8): 2132-2139]
 - 25 Yamagishi H, Fukuhara H. Vertical migration of *Spaniotoma akamusi* larvae (Diptera: Chironomidae) through the bottom deposits of Lake Suwa [J]. *Jpn J Ecol*, 1972, **22** (5): 226-227
 - 26 Iwakuma T. Emergence of Chironomidae from the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **245** (1): 27-40
 - 27 Hirabayashi K, Hanazato T, Nakamoto N. Population dynamics of *Prosilocerus akamusi* and *Chironomus plumosus* (Diptera: Chironomidae) in Lake Suwa in relation to changes in the lake's environment [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509** (1-3): 381-388