

南太湖浮游植物特征及其富营养化评价*

原居林 尹文林 沈锦玉 张爱菊 赵汉取 叶金云**

(浙江省淡水水产研究所,浙江湖州 313001)

摘要 2008年8—9月对南太湖的浮游植物进行了调查,并对9个采样点水样进行了分析。结果表明:共有浮游植物47种,隶属于7门28属,其中蓝藻门6属9种,绿藻门10属13种,硅藻门7属18种,裸藻门2属3种,隐藻门1属2种,金藻门1种,甲藻门1种;南太湖浮游植物的密度为 $3.56 \times 10^6 \sim 7.99 \times 10^6$ cells · L⁻¹;浮游植物的Shannon-Weaver多样性指数为0.29~2.27,均匀度指数在多数位点<0.5,卡尔森营养状态指数(TSIM)均大于64,根据浮游植物的优势种组成、密度、多样性指数及富营养状态指数的评价结果说明南太湖处于富营养化阶段。

关键词 浮游植物;多样性指数;营养状态指数;富营养化评价

中图分类号 Q145 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)11-2197-05

Phytoplankton and its relations with eutrophication of southern Taihu Lake. YUAN Ju-lin, YIN Wen-lin, SHEN Jin-yu, ZHANG Ai-ju, ZHAO Han-qu, YE Jin-yun (Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, Zhejiang, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(11) 2197-2201.

Abstract: In August-September 2008, an investigation was made on the phytoplankton in southern Taihu Lake, and the water quality at nine sampling sites was analyzed. A total of 47 phytoplankton species belonging to 28 genera and 7 phylums were collected, with 9 species of Cyanophyta, 13 species of Chlorophyta, 18 species of Diatoms, 3 species of Euglenophyta, 2 species of Cryptophyta, 1 specie of Chrysophyta, and 1 specie of Dinophyta. The phytoplankton density was $3.56 \times 10^6 - 7.99 \times 10^6$ cells · L⁻¹, Shannon-Weaver index was 0.29-2.77, evenness was lower than 0.5, and trophic state index (TSIM) was higher than 64. Based on the evaluation of the dominant species composition, density, and Shannon-Weaver index of phytoplankton, and of the TSIM, the southern Taihu Lake was considered at the stage of eutrophication.

Key words: phytoplankton; Shannon-Weaver index; trophic state index; eutrophication evaluation.

太湖是中国的第三大淡水湖,是长江下游重要的淡水水资源地。近年来,由于太湖流域在经济发展的同时对水域生态环境的保护不够重视,加之长期工业污染、农业面源污染和居民生活污染导致太湖流域生态系统结构迅速恶化(程波等 2005;许朋柱等 2006),1990年太湖第一次发生了大面积蓝藻爆发现象,造成了无锡地区工厂停产、饮用水取水口管道被蓝藻堵塞、水厂被迫关闭,给当地生活、生产等造成了重大影响(路云霞等 2007)。1990年后,太湖几乎每年发生不同程度的蓝藻爆发,造成了巨大的经济损失和社会负面影响。太湖流域分属江

苏、浙江和上海两省一市,位于浙江的部分称之为南太湖。相对于北太湖,南太湖被污染程度较轻(朱广伟 2008)。由于南太湖是浙江省湖州市著名的风景旅游区和水源地,近年来越来越受到各级政府和人们的重视。

浮游植物是湖泊生态系统的重要初级生产者,环境的变化可影响其种类组成、结构、现存生物量等指标。因此,浮游植物是评价水体质量的一项重要生物指标(王朝晖等 2005)。目前国内外不少学者利用浮游植物作为指示生物来评价海洋、湖泊和河流的生态环境变化(Villegas & Giller, 1973;高玉荣 1992;况琪军和夏宜铮, 1992),而南太湖水域未见此类报道。本研究以浮游植物为指示生物,通过研究

* 湖州重大科技专项资助项目(2007ZDN01)。

** 通讯作者 E-mail: zifl2006@163.com

收稿日期:2009-03-04 接受日期:2009-07-08

其种类组成、结构、现存生物量和生物多样性指数，分析了南太湖水质的富营养化情况，以期对南太湖的生态保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样点的设置

根据《湖泊富营养化调查规范》(金相灿和屠清瑛,1995),2008年8—9月对南太湖水域浮游植物进行了调查。共设立9个点(图1,表1),每个点分别采上、中、下各一份水样。

1.2 样品的采集

2.5 L的采水器采集水样,经鲁哥氏碘液固定后,沉淀浓缩至10 ml,然后进行定性、定量分析。

1.3 数据分析

Shannon-Weaver 多样性指数(刘蔚秋等,2002):

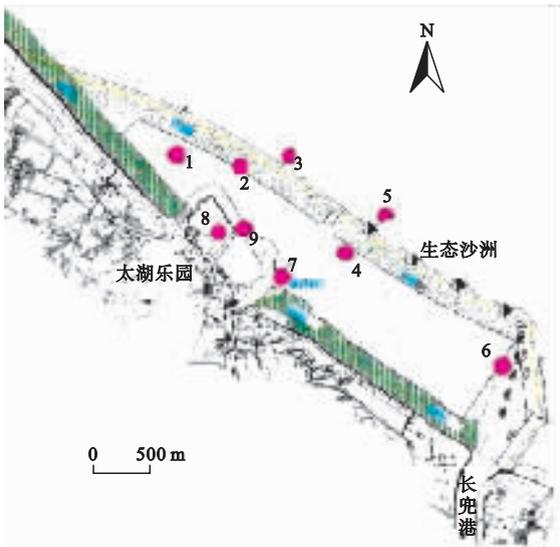


图 1 南太湖采样点示意图
Fig.1 Map of sampling site of southern area of the Taihu Lake

表 1 南太湖采样点地理位置
Tab.1 Location of the sampling site of southern area of the Taihu Lake

站号	站点名称	东经	北纬
1	长兴图影村水厂外 500 m	120°05'52.0"	30°58'18.2"
2	太湖乐园北大门外 800 m(西堤坝内)	120°06'14.9"	30°58'17.1"
3	西堤坝外 20 m	120°06'36.5"	30°58'19.7"
4	东堤坝内	120°06'55.6"	30°57'39.2"
5	东堤坝外	120°07'14.6"	30°57'53.0"
6	长兜港口外	120°07'43.0"	30°57'09.7"
7	小梅口外	120°06'35.6"	30°57'33.8"
8	太湖乐园内(飞机户出口内)	120°06'08.1"	30°57'53.1"
9	太湖乐园外(飞机户出口外)	120°06'16.9"	30°57'57.3"

表 2 密度、多样性指数、均匀度指数、卡尔森营养状态指数与水体营养水平的关系

Tab.2 Relationship between density, Shannon-Weaver index, evenness, TSIM and trophic status

营养水平	密度 (万个·L ⁻¹)	多样性指数	均匀度指数	卡尔森营养状态指数
贫营养型	<30	>3	0.5~0.8	<37
中营养型	30~100	1~3	0.3~0.5	37~53
富营养型	>100	<1	0~0.3	>54

$$H' = - \sum P_i \times \log_2 P_i$$

式中 P_i 为 i 种个体数占总个体数的比例。

均匀度指数:

$$J = H'/H_{max} \quad H_{max} = \log_2 S$$

式中 S 为种类数。

修正的卡尔森营养状态指数(Carlson,1997; Ceballos,1998):

$$TSI = [TSI_M(Chla) + TSI_M(SD) + TSI_M(TP)]/3$$

$$TSI_M(Chla) = 10 \times (2.46 + \ln Chla / \ln 2.5)$$

$$TSI_M(SD) = 10 \times [2.46 + (3.69 - 1.53 \ln SD / \ln 2.5)]$$

$$TSI_M(TP) = 10 \times [2.46 + (6.71 + 1.15 \ln TP / \ln 2.5)]$$

式中 $TSI_M(Chla)$ 、 $TSI_M(SD)$ 、 $TSI_M(TP)$ 分别是以叶绿素 a、透明度、总 P 为基准的营养状态指数, TSI 指数在 37 以下为贫营养, 38~53 为中营养, 54 以上为富营养。

1.4 评价标准

总结不同的学者在研究富营养化时提出的营养等级标准(黄邦钦等,1995; 劳期团,1995)。本文采用如下划分富营养化等级标准(表 2)。

2 结果与分析

2.1 浮游植物的种类

通过对 9 个采样点水样的分析,共检出浮游植物 47 种,隶属于 7 门 28 属,其中蓝藻门 6 属 9 种,绿藻门 10 属 13 种,硅藻门 7 属 18 种,裸藻门 2 属 3 种,隐藻门 1 个属 2 种,金藻门 1 种,甲藻门 1 种,其中铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、水花微囊藻(*M. flosaquae*)、盘星藻(*Pediastrum simplex*)、扁裸藻(*Phacus pleuronestes*)、舟形藻(*Navicula viridula*)、针杆藻(*Synedra ulna*)、直链硅藻分布较广,几乎出现在每个采样点,其中尤其以铜绿微囊藻、舟形藻、针杆藻分布最为广泛,频率达 100%。各采样点浮游植物种类组成见表 3。

表3 南太湖各采样位点的浮游植物种类数
Tab.3 Species of phytoplankton at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

采样点	水层	蓝藻	绿藻	裸藻	硅藻	隐藻	金藻	甲藻	合计
1#	上	2	5	0	3	1	0	0	11
	中	3	6	1	3	1	0	1	15
	下	4	4	0	1	0	0	0	9
2#	上	3	4	0	2	1	0	0	10
	中	3	6	0	3	0	0	0	12
	下	2	7	1	3	1	1	0	15
3#	上	3	6	1	3	1	1	0	15
	中	2	4	1	4	1	0	0	12
	下	3	5	0	4	1	1	0	14
4#	上	2	5	1	5	1	1	0	15
	中	3	8	2	4	1	1	0	19
	下	3	9	2	6	1	1	0	22
5#	上	4	6	2	4	1	1	0	18
	中	3	8	1	3	1	1	0	17
	下	4	7	2	4	1	1	1	20
6#	上	3	6	1	5	1	1	0	17
	中	3	11	2	5	1	1	0	23
	下	2	7	2	5	1	1	1	19
7#	上	4	10	2	5	1	1	1	24
	中	4	12	2	7	1	1	1	28
	下	2	9	2	8	1	1	0	22
8#	上	4	12	2	8	1	1	1	27
	中	3	12	2	9	1	1	0	28
	下	4	14	2	11	1	0	1	33
9#	上	3	14	2	9	1	1	0	30
	中	4	11	2	8	1	0	1	27
	下	4	10	2	9	1	0	1	27

南太湖浮游植物优势种中舟形藻、直链藻、扁裸藻、针杆藻均是污水种(胡鸿钧和魏印心, 2006), 其中分布最为广泛的舟形藻、针杆藻是典型的污水种类。

2.2 浮游植物的密度

从表4可知9个采样点浮游植物密度均较大, 其中2号点浮游植物最少(3.56×10^6 cells · L⁻¹) 8号点浮游植物密度最大(7.99×10^6 cells · L⁻¹), 平均 5.27×10^6 cells · L⁻¹。从藻类种类而言, 蓝藻最多(2.71×10^6 cells · L⁻¹), 绿藻(0.93×10^6 cells · L⁻¹), 硅藻(0.79×10^6 cells · L⁻¹)次之, 甲藻最少(0.011×10^6 cells · L⁻¹)。根据国内有关湖泊富营养化评价标准(表2)浮游植物密度 < 30 万 cells · L⁻¹ 为贫营养水平, 30 万 ~ 100 万 cells · L⁻¹ 为中营养水平, > 100 万 cells · L⁻¹ 为富营养水平。南太湖浮游植物的密度为 356 ~ 799 万 cells · L⁻¹, 远高于 100 万 cells · L⁻¹ 的水平, 可见南太湖处于富营养水平。

2.3 浮游植物的生态特征

2.3.1 浮游植物在各采样点的种类、密度分布 由表3和表4可知, 各采样点的浮游植物种类具有较大差异, 其中1#采样点种类最少(35种) 8#采样点种类最多88种; 从浮游植物密度角度来看, 2#点最少(3.56×10^6 cells · L⁻¹) 8#点浮游植物密度最大(7.99×10^6 cells · L⁻¹); 从垂直分布来看, 1#和9#采样点上层浮游植物最多, 3#、6#和7#采样点中层浮游植物最多, 而2#、4#、5#、8#采样点下层浮游植物最多, 这主要与采样时的天气有关。

2.3.2 生物多样性指数 Shannon-Weaver 指数。由表5可见南太湖9个采样点中的Shannon-Weaver指数均 < 3, 均匀度指数全部 < 0.8。水体浮游植物的生物多样性越低, 说明南太湖浮游植物的密度在各个采样点的分布越不均匀, 从一个方面反映南太湖水体的生态系统的稳定性较差, 处于较差的状态。

表4 南太湖各位点浮游植物的密度(×10⁴)
Tab.4 Density of phytoplankton at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

采样点	水层	蓝藻	绿藻	裸藻	硅藻	隐藻	金藻	甲藻	合计
1#	上	127	10	0	8	3	0	0	148
	中	84	14	1	6	2	0	1	107
	下	139	3	0	3	0	0	0	145
2#	上	75	28	0	5	2	0	0	110
	中	79	22	0	5	0	0	0	106
	下	98	21	2	3	10	6	0	140
3#	上	79	14	1	7	3	15	0	119
	中	105	7	1	14	1	0	0	128
	下	83	10	0	9	1	13	0	116
4#	上	49	30	2	16	34	42	0	173
	中	52	27	6	14	12	40	0	151
	下	112	27	8	58	16	13	0	234
5#	上	114	32	4	59	8	17	0	234
	中	87	33	3	52	5	10	0	190
	下	97	16	5	55	6	6	1	196
6#	上	74	27	5	27	11	20	0	164
	中	92	61	11	37	7	12	0	220
	下	103	19	6	16	12	5	2	163
7#	上	41	24	7	29	4	3	1	109
	中	65	58	11	34	10	2	1	181
	下	80	23	6	19	7	2	0	137
8#	上	96	53	26	28	5	1	1	210
	中	95	72	60	46	10	6	0	289
	下	154	64	59	7	15	0	1	300
9#	上	78	62	44	55	17	10	0	266
	中	51	41	31	51	13	3	1	191
	下	34	40	59	58	20	3	1	215
合计	上	733	280	89	234	87	108	2	
	中	710	335	124	259	60	73	3	
	下	900	223	145	228	87	48	5	

表 5 南太湖各采样位点的 Shannon-Weaver 指数和均匀度指数

Tab. 5 Shannon-Weaver index and evenness index at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

采样点	水层	H'	J
1#	上	0.79	0.23
	中	1.12	0.29
	下	0.29	0.09
2#	上	1.19	0.36
	中	0.99	0.28
	下	1.44	0.37
3#	上	1.56	0.40
	中	0.92	0.26
	下	1.35	0.35
4#	上	2.30	0.59
	中	2.27	0.54
	下	2.03	0.46
5#	上	1.94	0.47
	中	1.92	0.47
	下	1.79	0.41
6#	上	2.16	0.53
	中	2.07	0.46
	下	1.79	0.42
7#	上	2.15	0.47
	中	2.10	0.44
	下	1.79	0.40
8#	上	1.98	0.42
	中	2.20	0.46
	下	1.80	0.36
9#	上	2.34	0.48
	中	2.32	0.49
	下	2.33	0.49

中。目前国内多使用信息多样性指数(Shannon-Weaver)来评价水体的营养状态。根据比较通用的标准(沈韞芬等,1990), $H' > 3$ 时为清洁, $3 > H' > 2$ 时轻污染, $2 > H' > 1$ 时中等污染, $1 > H' > 0$ 时为重污染。南太湖大多数采样位点的 Shannon-Weaver 指数位于 1~2, 结合表 2 可判断其水体是属于中营养水平, 环境受到中度污染。均匀度指数也可用于判断水体的营养状态, 目前国内采用的标准(表 1), 南太湖水域 9 个采样点大多数的 J 在 0.3~0.5, 说明其属于中营养水平, 环境受到中度污染。

卡尔森营养状态指数。由表 6 可知, 9 个采样点卡尔森营养状态指数(TSI_M)均大于 64, 其中 3# TSI_M 最小(64.28), 8# TSI_M 最大(77.31), 按照目前国内采用的标准(表 1), 南太湖 9 个采样点均属于富营养化水平, 其水质的化学指标见表 7, 底泥中的总磷、总氮见表 8。

表 6 南太湖各采样位点的卡尔森营养状态指数

Tab. 6 TSIM at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

	$TSI_M(\text{Chla})$	$TSI_M(\text{SD})$	$TSI_M(\text{TP})$	TSI
1#	64.58	76.80	65.09	68.82
2#	58.33	73.07	62.80	64.74
3#	56.73	72.10	64.00	64.28
4#	61.72	79.03	65.09	68.61
5#	59.73	75.59	61.48	65.60
6#	61.72	81.60	67.02	70.12
7#	59.28	73.07	62.80	65.05
8#	74.86	82.76	74.30	77.31
9#	60.57	76.80	64.00	67.12

表 7 南太湖各采样位点的水质状况

Tab. 7 Water quality at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

	叶绿素 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1#	378	1.45	0.116
2#	234	1.88	0.103
3#	170	0.95	0.110
4#	330	1.40	0.116
5#	273	1.06	0.097
6#	282	1.62	0.131
7#	244	1.38	0.100
8#	1085	2.63	0.244
9#	219	1.48	0.098
富营养化标准	26	1.20	0.110

表 8 南太湖各采样位点底泥中营养物质水平

Tab. 8 Nutrient level of sediment at each sampling sites of southern area of the Taihu Lake

	总 N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 P ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	溶解性 P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1#	1.161	72.423	3.345	0.591	39.923
2#	1.280	92.967	4.878	0.653	41.857
3#	0.985	70.323	2.819	0.618	40.192
4#	1.079	72.494	4.350	0.574	33.329
5#	1.106	70.035	5.202	0.533	24.544
6#	1.145	76.687	5.601	0.574	33.782
7#	1.322	101.74	4.104	0.636	40.374
8#	1.463	134.346	5.561	0.708	45.057
9#	0.997	68.071	3.984	0.542	29.204
平均值	1.171	84.342	4.427	0.603	36.474

3 讨论

3.1 利用浮游植物群落特征评价湖泊富营养化的可行性

浮游植物是湖泊生态系统的重要初级生产者, 环境的变化可影响其种类组成、结构、现存生物量等指标。浮游植物的群落特征能否准确评价水体的富

营养化水平一直以来为人们怀疑。本文分析了南太湖浮游植物的组成、结构和生物多样性指标,发现南太湖已处于富营养化状态,这与所测9个点水质的化学指标一致(表7),说明该方法可行。

3.2 南太湖富营养化现状分析

南太湖富营养化的发生、发展是一个长期的过程,影响因子众多,概括起来主要有以下几个方面:1)湖底淤泥的长期积累。湖底的大量淤泥成为南太湖营养盐分的补给来源(毛新伟等,2009),根据表8可知,南太湖湖底泥中的总磷、总氮分别为 1.171 和 $0.603 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,加快了南太湖的富营养化进程;2)湖泊形态和水文特性。太湖属于平原性浅水湖泊,是一个四周高、中间低的碟形洼地,这使地表径流携带大量营养物质汇入太湖,造成营养物质积累(范成新等,1997)。而南太湖平均水深 2.1 m ,表层和底层水的极易交换,从而促进藻类的生长;3)大量生活污水入湖。南太湖流域工业较少,但随着城镇化进程的不断推进,大量的生活污水被排放到南太湖所在流域及其入湖河流中,造成湖水营养负荷上升,蓝藻大量爆发,水质环境恶化;4)化肥农药的大量使用。南太湖入湖河流基本流经湖州市农业生产主要区域,农业生产使用的农药化肥大部分随着灌溉和降雨流入河流中,导致氮磷升高,加速了南太湖的富营养化进程。

本文通过分析南太湖浮游生物的种类、数量和生物多样性指数发现,南太湖目前已处于富营养化水平,这与朱广伟(2008)报道的结果一致。其中尤以8#(太湖乐园内)点最为严重,太湖乐园作为湖州市重点旅游景点之一,周边地区的工厂较少,其富营养化可能主要是该区域内水量交换较少和大量生活污水排放造成的。

3.3 富营养化修复对策

1)生活污水源的控制。通过建立污水处理厂或者小型污水净化站等方法,减少生活污水中氮磷的含量,从而有效控制营养物质的积累。

2)农业面源控制。科学计算农药与化肥的使用量,推行科学施肥及合理灌溉技术,保肥节水,降低氮肥和磷肥流失。

3)建立沿岸植物修复带。水生植被具有抑制风浪、促进沉降、固持底泥、吸收氮磷、净化水质等功效,对藻类因竞争而有强烈的抑制作用,通过建立沿岸水生植物修复带从而有效地降低富营养化现状。

4)通过清淤、引水等水利工程降低富营养化

水平。

通过分析南太湖浮游植物的种类、优势种、现存生物量和生物多样性指数,从生物学角度综合评价了南太湖的营养化水平,得出南太湖水质已处于富营养化水平,这与化学因子评价的结果基本一致,说明采用浮游植物作为评价南太湖营养化水平的生物指标是行之有效的。同时,由于南太湖是湖州市重要的饮用水源和风景旅游区,因此目前急需采取相应的措施合理控制和治理南太湖水质,有效地保护南太湖的水利资源。

参考文献

- 程波,张泽,陈凌,等. 2005. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制. *农业环境科学学报*, **24**(增刊):118-124.
- 范成新,季江,陈荷生. 1997. 太湖富营养化现状、趋势及其综合整治对策. *上海环境科学*, **16**(8):4-7, 17.
- 高玉荣. 1992. 北京4海藻类群落结构特征与水体营养水平的研究. *生态学报*, **12**(2):173-179.
- 胡鸿钧,魏印心. 2006. 中国淡水藻类. 北京:科学出版社.
- 黄邦钦,洪华生,王海黎. 1995. 微型浮游植物在环境科学研究中的应用. *台湾海峡*, **14**(3):18-19.
- 金相灿,屠清瑛. 1995. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社.
- 况琪军,夏宜铮. 1992. 太平湖水体的浮游藻类与营养型评价. *应用生态学报*, **3**(2):165-168.
- 劳期团. 1995. 环境管理技术实用方法. 北京:中国环境科学出版社.
- 刘蔚秋,陈桂珠,李金泉. 2002. 广东省枫树坝水库浮游植物研究及其富营养化评价. *中山大学学报(自然科学版)*, **41**(1):113-115.
- 路云霞,吴长年,黄戟,等. 2007. 由“无锡太湖水华事件”论太湖富营养化的防治. *生态经济*, **14**(2):155-157.
- 毛新伟,徐枫,徐彬,等. 2009. 太湖水质及富营养化变化趋势分析. *水资源保护*, **25**(1):48-51.
- 沈韞芬,章宁涉,龚循矩,等. 1990. 微型生物监测技术. 北京:中国建筑工业出版社.
- 王朝晖,韩博平,胡韧,等. 2005. 广东省典型水库浮游植物群落特征与富营养化研究. *生态学杂志*, **24**(4):402-405.
- 许朋柱,秦伯强,Horst B,等. 2006. 太湖上游流域农业土地的氮磷及其对湖泊富营养化的影响. *湖泊科学*, **18**(4):395-400.
- 朱广伟. 2008. 太湖富营养化现状及原因分析. *湖泊科学*, **20**(1):21-26.
- Carlson RE. 1997. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**:361-369.
- Ceballos RS, Konig A, Oliverra JF. 1998. Dam reservoir eutrophication: A simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation. *Water Research*, **32**:3477-3483.
- Villegas I, Giller JD. 1973. Phytoplankton as biological indicator of water quality. *Water Research*, **7**:479-87.

作者简介 原居林,男,1982年生,硕士研究生。主要从事水域生态学方面的研究。E-mail: yuanjulian1982@163.com
责任编辑 李凤芹

