

南四湖沼泽化现状及其驱动因素分析*

兰书斌^{1,2}, 吴丽^{1,2}, 张德禄^{1,3}, 胡春香^{1**}

(1: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 武汉理工大学生物科学与技术系, 武汉 430070)

摘要: 为了解南四湖近几年沼泽化加剧的现状及其根源, 2008年8月, 2009年6月, 2009年8月, 2010年6月和2010年8月先后多次对南四湖全湖, 及21条主要入湖河道河口区进行调查和采样分析. 结果表明: 调查的25个样点中除微山岛保护区附近和船舶密集的界河口附近4个样点无沼泽化表征, 运输繁忙的老万福河入湖口和南阳湖敞水区2个样点为轻度沼泽化外, 其它样点中6个中度沼泽化, 12个重度沼泽化, 1个极重度沼泽化; 沼泽化程度与植被类型、淤泥深度和淤泥有机质含量呈显著正相关, 与pH和溶解氧呈显著负相关; 而植被丰度与水深、pH和溶解氧呈显著负相关; 淤积程度与TN、TP、淤泥有机质呈显著正相关, 与COD呈显著负相关. 因此, 局部表征上是外源污染物的输入和湖泊营养水平的提高导致了沼泽化, 但整体上是流域水资源的不合理利用进一步加剧了沼泽化的进程.

关键词: 南四湖; 沼泽化现状; 驱动因素

On the terrestrialization situation and its driving factors in Lake Nansi

LAN Shubin^{1,2}, WU Li^{1,2}, ZHANG Delu^{1,3} & HU Chunxiang¹

(1: *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

(2: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Department of Biological Science and Biotechnology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China*)

Abstract: In order to comprehend the terrestrialization situation and its driving factors in Lake Nansi, the whole Lake Nansi and 21 inlets of the rivers entering the lake were sampled and investigated in August 2008, June 2009, August 2009, June 2010 and August 2010. The results showed that only 4 sites located in the Natural Reserve of Weishan Island and the inlet of Jiehe River with dense shipping belonged to no terrestrialization, 2 sites lying the inlet of Laowanfu River with busy transport and the open water region of Nanyang Lake to slight terrestrialization, other 6 sites were moderate terrestrialization, 12 sites severe terrestrialization and 1 site heavy severe terrestrialization among the 25 sampling sites. The degree of terrestrialization was significantly positively correlated to vegetation types, depth and organic matter content of silt, negatively correlated to pH and dissolved oxygen; the abundance of vegetation was close negatively correlated to depth of water, pH and dissolved oxygen; the silting level was positively to total nitrogen, total phosphorus, organic matter of sediment, negatively to chemical oxygen demand. So apparently the import of exogenous contamination and increase of trophic level promoted the terrestrialization speed, and the unreasonable development in the whole drainage area further accelerated this progress.

Keywords: Lake Nansi; terrestrialization situation; driving factor

南四湖是南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖由北向南相连而成的湖泊总称, 位于淮河流域北部. 全湖北长126km, 东西宽5-25km, 中部最窄, 湖面面积1266km², 流域面积31700km², 年平均入湖径流量29160 × 10⁸m³, 年平均出湖径流量19120 × 10⁸m³. 在行政区划上隶属山东省济宁市微山县, 湖区内有农田和鱼塘300

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07210-009)资助. 2010-09-08 收稿; 2010-12-07 收修改稿. 兰书斌, 男, 1984年生, 博士研究生; E-mail: shblan@163.com.

** 通讯作者; E-mail: cxhu@ihb.ac.cn.

余平方千米,居住着 10 余万农民和渔民,是山东省最大的湖泊,也是我国第六大淡水湖泊.京杭运河南北纵贯全湖,把南北江河水系交汇沟通.1958 年在此建成了拦湖大坝,坝上修建船闸和节水闸,将湖一分为二.坝北为上级湖,面积 602km²,坝南为下级湖,面积 664km².

表 1 南四湖调查样点设置

Tab. 1 Characteristics of sampling sites in Lake Nansi

样点	地点特征	主要植被
1	微山岛湿地公园周围	荷花、芦苇、荇菜
2	微山湖敞水区	无
3	蒋集河入湖口	芦苇、荇菜、空心莲子草
4	十字河入湖口	荷花、狐尾藻、苦草
5	薛河入湖口(艾湖村附近)	荷花、芦苇、空心莲子草
6	鹿口河入湖口	荇菜、芦苇、马莱眼子菜
7	沿河入湖口(赵庙港附近)	芦苇、荇菜、苦草
8	纸厂河入湖口(西港附近)	无
9	二级坝下游	荇菜、马莱眼子菜
10	西支河入湖口	荇菜
11	东鱼河入湖口, 2005 年清过淤泥	荷花、菱、狐尾藻
12	复兴河入湖口	浮萍
13	大沙河入湖口	浮萍
14	独山湖湖区围网周围	无
15	界河入湖口	无
16	北沙河入湖口	芦苇、荷花、香蒲
17	郭河入湖口(郭城港附近)	芦苇、荷花、空心莲子草
18	惠河入湖口	水鳖、空心莲子草
19	老万福河入湖口	苦草、水鳖
20	新万福河入湖口	芦苇
21	洙赵新河入湖口	芦苇、荇菜
22	梁济运河入湖区	芦苇
23	泗河入湖口	芦苇
24	白马河入湖口	芦苇、空心莲子草、荇菜
25	南阳镇周围敞水区	马莱眼子菜、苦草

南四湖是我国著名的大型淡水湖泊之一.它既是供百万亩稻田灌溉的淡水水源,也是重要水产品的生产基地;同时又是沿湖工农业发展、城镇居民生活及航运的重要水资源;还是南水北调东线调水工程中重要的调蓄库.综合效益显著.然而近十几年来,由于沿湖地区工、农、渔业的迅速发展,湖区资源的过度开发利用,水环境状况日趋恶化,主要表现在水污染加重,湖底淤积加剧,富营养化程度加重^[1].加上 2002 年从黄河和长江的几次调水,大量泥沙的入湖使淤泥的沉积和沼泽化进一步加重,调蓄能力明显下降^[2].湖泊的沼泽化是指在历史沉积、水文变动、地质变迁等过程中,湖泊沉积物增厚,水深变浅,水草增长的现象.沼泽化的后果不仅直接影响水资源的利用,还影响湖区及周边的生态环境和社会经济发展,更可能导致湖泊的消亡.目前国内对湖泊沼泽化的重视程度很不够,对沼泽化的量化研究还处于探索阶段^[3].因此,开展即将承担国家调水工程调蓄任务的南四湖的沼泽化调查意义重大.

1 材料与方法

2008 年 6 月,2009 年 6 月,2009 年 8 月,2010 年 6 月及 2010 年 8 月先后对全湖 25 处样点进行调查(表 1,图 1).由于调查结果的相似性,为反映最近南四湖的沼泽化状况,本文主要采用 2010 年 8 月 12-14 日期间水草最丰富的数据,样点采用 GPS 精确定位.对各样点的主要湖沼学特征进行了现场测定.其中水深、透明度用透明度盘测定;淤泥深度用竹竿测定;植被类型目测;水温、总溶解固体、pH 值、盐度、电导率和

溶解氧用 YSI-Proplus 型多参数水质分析仪进行测定.同时对各样点的水体和泥样进行采集,测定叶绿素 a、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})、悬浮物、淤泥有机质、淤泥 TN 和 TP 含量.水样采集用采水器在水面下 50cm 处采集,泥样用采泥器采集,水样和泥样装入聚乙烯塑料瓶中运回实验室测定,相关指标的测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[4]和《湖泊富营养化调查规范》^[5].

沼泽化程度的植被指标 V_{zh} 按照吴庆龙等^[3]的方法分为四个基本级别,并且 $V_{zh} = \{0, 1, 2, 3\}$,其中 0 代表无大型植物;1,2,3 分别代表沉水植物、浮叶植物和挺水植物占优势.淤积指标 $D_{zh} = (h - h_1) / (h_2 - h_1)$,其中 h_1, h_2 为最小和最大淤泥深度; h 为调查样点某一点的淤泥深度.沼泽化程度的综合指标 $S_{zh} = V_{zh} + D_{zh}$.

富营养化程度选取叶绿素 a、TN、TP、COD_{Cr}和透明度五个指标,用综合营养状态指数 TSI 进行评价, $TSI = W_{Chl.a} \times TSI_{Chl.a} + W_{TN} \times TSI_{TN} + W_{TP} \times TSI_{TP} + W_{COD} \times TSI_{COD} + W_{SD} \times TSI_{SD}$,其中 $W_{Chl.a}$ 、 W_{TN} 、 W_{TP} 、 W_{COD} 和 W_{SD} 分别为叶绿素 a、TN、TP、COD_{Cr}和透明度的相关权重; $TSI_{Chl.a}$ 、 TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 、 TSI_{COD} 和 TSI_{SD} 分别为叶绿素 a、TN、TP、

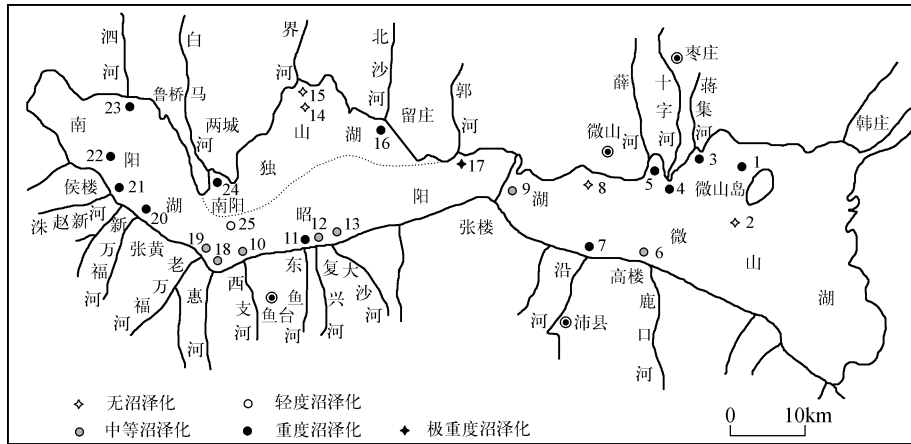


图 1 各样点沼泽化及分布情况

Fig. 1 The terrestrialization situation and distribution of each site

COD_{Cr}和透明度的营养状态指数.以叶绿素 a 作为基准, $W_i = r_i^2/R$, 其中 W_i 为指标 i 的相关权重, r_i 为指标 i 与叶绿素 a 之间的相关系数; R 为 5 个指标与叶绿素 a 之间相关系数的平方和; 每个指标的营养状态指数计算参照 Carlson^[6] 及《湖泊富营养化调查规范》^[5] 所描述的方法.

对沼泽化指标的聚类用 Hierarchical Cluster Analysis 进行分析; 沼泽化指标与环境因子之间的相关性用 Bivariate Correlations 进行分析. 所有分析在 SPSS 13.0 软件上进行.

2 结果

2.1 南四湖沼泽化以及分布情况

调查结果显示, 沉水植物主要有: 马菜眼子菜 (*Potamogeton malaianus*)、苦草 (*Vallisneria natans*)、狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum*); 浮叶植物主要有: 荷花 (*Nelumbo nucifera*)、菱 (*Trapa bispinosa*)、荇菜 (*Nymphoides peltatum*); 漂浮植物主要是浮萍 (*Lemna minor* L.)、水鳖 (*Hydrocharis dubia*); 挺水植物主要有: 芦苇 (*Phragmites australis*)、空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*)、香蒲 (*Typha orientalis*).

所有调查样点中, 淤泥深度在 20-220cm 之间, 平均为 55.4cm. 微山岛湿地公园、十字河 (老运河口)、郭河、东鱼河、老万福河、新万福河、泗河 (运煤) 等 28% 的区域中淤泥深度在 70cm 以上. 全湖沼泽化淤积指标在 0-1 之间, 综合指标在 0-4 之间 (表 2). 通过对 25 个样点的沼泽化指标进行聚类发现, 微山岛保护区附近和船舶密集的界河口附近四个样点 (样点 2, 8, 14, 15) 属一类, 沼泽化综合指标在 0.07-0.10 之间, 为无沼泽化区域; 老万福河入湖口和南阳镇周围敞水区 (样点 19, 25) 属一类, 沼泽化综合指标在 1.15-1.25 之间, 为轻度沼泽化区域; 鹿口河、西支河、复兴河、大沙河、惠河入湖口和二

表 2 南四湖沼泽化情况

Tab. 2 Terrestrialization situation in Lake Nansi

样点	植被指标	淤积指标	综合指标
1	3	0.250	3.250
2	0	0.075	0.075
3	3	0.115	3.115
4	3	0.250	3.250
5	3	0.175	3.175
6	2	0.125	2.125
7	3	0.125	3.125
8	0	0.100	0.100
9	2	0.125	2.125
10	2	0.025	2.025
11	3	0.300	3.300
12	2	0.000	2.000
13	2	0.035	2.035
14	0	0.100	0.100
15	0	0.075	0.075
16	3	0.110	3.110
17	3	1.000	4.000
18	2	0.140	2.140
19	1	0.250	1.250
20	3	0.300	3.300
21	3	0.050	3.050
22	3	0.150	3.150
23	3	0.300	3.300
24	3	0.100	3.100
25	1	0.150	1.150

级坝下游(样点 6, 9, 10, 12, 13, 18)属一类, 沼泽化综合指标在 2.00 - 2.14 之间, 为中度沼泽化区域; 微山岛湿地公园周围、蒋集河、十字河、薛河、沿河、东鱼河、北沙河、新万福河、洙赵新河、泗河、白马河入湖口和梁济运河入湖区(样点 1, 3, 4, 5, 7, 11, 16, 20, 21, 22, 23, 24)属一类, 沼泽化综合指标在 3.05 - 3.30 之间, 为重度沼泽化区域; 郭河入湖口(样点 17)单独为一类, 沼泽化综合指标为 4, 为极重度沼泽化区域(图 1).

2.2 富营养化

各样点的叶绿素 a、TN、TP、COD 和透明度值见表 3, 其中叶绿素 a 范围为 0.009 - 0.070mg/L, 平均值为 0.031mg/L; TN 范围为 0.043 - 7.294mg/L, 平均值为 1.065mg/L; TP 范围为 0.015 - 0.200mg/L, 平均值为 0.048mg/L; COD 范围为 9.101 - 29.577mg/L, 平均值为 18.110mg/L; SD 范围为 0.2 - 0.7m, 平均值为 0.4m. 利用上述 5 个指标计算出各样点 *TSI*, 其中综合营养状态指数在 50 - 60 之间为中-富营养, 包括微山岛湿地公园周围、二级坝下游、十字河、鹿河口、沿河、东鱼河、北沙河、郭河、老万福河入湖口和独山湖湖区围网周围(样点 1, 4, 6, 7, 9, 11, 14, 16, 17, 19, 24 和 25); 综合营养状态指数在 60 - 70 之间为富营养, 包括微山湖敞水区、蒋集河、薛河、纸厂河、西支河、大沙河、界河、惠河、新万福河、洙赵新河、泗河入湖口和梁济运河入湖区(样点 2, 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 21, 22 和 23); 综合营养状态指数 > 70 为重富营养, 包括复兴河入湖口(样点 12)(表 3).

表 3 各样点富营养化程度
Tab. 3 The trophic state of each site

样点	叶绿素 a (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD (mg/L)	SD (m)	<i>TSI</i>	富营养化程度
1	0.012	0.595	0.029	22.752	0.23	56.091	中-富营养
2	0.038	0.073	0.023	15.926	0.40	60.066	富营养
3	0.067	0.199	0.057	27.302	0.32	68.420	富营养
4	0.011	0.253	0.061	20.476	0.50	53.309	中-富营养
5	0.032	1.166	0.033	15.926	0.50	63.611	富营养
6	0.012	0.839	0.035	9.101	0.40	53.213	中-富营养
7	0.013	0.131	0.019	25.027	0.37	54.252	中-富营养
8	0.024	1.283	0.053	18.201	0.30	62.110	富营养
9	0.012	0.873	0.019	11.376	0.33	54.140	中-富营养
10	0.056	0.419	0.031	15.926	0.20	66.447	富营养
11	0.028	0.077	0.023	15.926	0.55	57.656	中-富营养
12	0.070	0.707	0.045	22.752	0.20	70.475	重富营养
13	0.055	0.097	0.047	29.577	0.43	65.785	富营养
14	0.032	0.058	0.029	20.476	0.37	59.231	中-富营养
15	0.043	0.351	0.033	20.476	0.50	64.737	富营养
16	0.011	1.980	0.015	15.926	0.50	56.049	中-富营养
17	0.013	6.040	0.200	9.101	0.45	57.381	中-富营养
18	0.021	0.717	0.047	22.752	0.20	60.918	富营养
19	0.020	0.658	0.063	15.926	0.20	59.070	中-富营养
20	0.033	1.214	0.055	15.926	0.30	64.055	富营养
21	0.064	0.082	0.063	18.201	0.50	64.875	富营养
22	0.052	0.043	0.053	15.926	0.50	61.574	富营养
23	0.043	0.995	0.061	18.201	0.30	66.298	富营养
24	0.010	7.294	0.051	18.201	0.37	58.203	中-富营养
25	0.009	0.482	0.043	11.376	0.70	50.623	中-富营养

2.3 沼泽化与环境因子

通过沼泽化指标与环境因子之间的相关性分析发现(表4),植被指标与水深、pH和溶解氧呈显著负相关;淤积指标与TN、TP呈显著正相关,与COD呈显著负相关;综合指标与植被类型、淤泥深度和淤泥有机质呈显著正相关,与pH和溶解氧呈显著负相关。

3 讨论

3.1 沼泽化调查的季节性

湖泊有其生成、发展和消亡的自然过程,但自然情况下生态系统的演化很漫长.一般的过程是:湖泊经过长期的物理、化学以及生物沉积,湖水逐渐变浅,在光照、温度等条件适宜处,喜水的维管植物开始生长.后来枯萎的植物枝体不断地堆积在湖底,而在湖底缺氧条件下这些残体分解缓慢,经过长期的累积,沉积底泥中的有机质含量逐渐增加.随着底泥淤积的增厚,湖水进一步变浅,挺水植物开始疯长,从而使湖泊向沼泽演变.因此,湖泊的沼泽化是一个自然演替的过程,但人类活动的不断干扰可使其生命周期迅速缩短^[7].在对南四湖的研究中发现,8月湖泊52%的样点属于重度沼泽化,而在6月的结果中只有25%的样点为重度沼泽化.其根本原因是在不同的季节植被生长状况不同,但维管植被的丰富度是衡量沼泽化的重要指标,在采用的沼泽化综合指标计算公式中^[3]植被状况占总信息量的75%($R=0.989, P<0.001$),而淤积只占25%.事实也是如此,在沼泽化的定义中,没有维管植被疯长的水域变浅不是真正的沼泽化,只需清淤或疏浚就可使其恢复原貌;而一旦植被疯长,就意味着整个水生态系统受到了严重破坏,这不是简单的机械清淤或清除植被就能够解决的,因为植被疯长与底泥淤积、水的富营养化等密切相关.因此,研究或评价湖泊沼泽化就应该在水草最丰富的季节进行调查和取样。

3.2 沼泽化的物质基础

南四湖东部的本底中就有大量随山洪、径流带入的周缘丘陵带泥沙,加上湖西平原排洪河道在引黄退水过程中也带来了大量泥沙,这样使全年入湖泥沙量达 7.8×10^6 t,年淤积量占湖泊总容量的0.13%^[1].而我们在平水期的研究中并未发现悬浮物与沼泽化之间存在显著相关性($P<0.05$),因此,这个结果进一步确定了淤积的沉积物主要是雨季或暴雨期间随山洪、地表径流及引水济湖时带入的.另外,我们发现运沙、运煤(尤其是煤泥)的船舶同样带入大量的泥沙沉积物,而且这在郭河非常明显,欢城煤矿大量的煤泥经郭城港向外运输,使该地的淤泥沉积达220cm,芦苇几乎覆盖附近的全部湖面。

另外,南四湖的入湖河流都不同程度地受到了生活污水、工业废水、农田及鱼塘排水的污染,这些水中富含氮、磷等营养物质,流入湖区加剧了水体的富营养化程度^[8-9].研究也发现沼泽化的淤积与TN、TP呈显著正相关($P<0.01$).因为水体中富集的营养物一方面沉积进入底泥,另一方面为水生植被的生长提供了充足的营养源.水生植被的生长可进一步截留更多的沉积物(包括大气尘降),加上枯枝落叶的积累,使富营养

表4 沼泽化指标与环境因子之间的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis between terrestrialization indices and environment factors

环境因子	植被指标		淤积指标		综合指标	
	R	P	R	P	R	P
植被类型	1.000	<0.001**	0.327	0.111	0.989	<0.001**
水深	-0.407	0.044*	-0.087	0.680	-0.395	0.051
水温	-0.265	0.201	0.282	0.172	-0.203	0.331
透明度	-0.102	0.627	0.111	0.599	-0.078	0.711
总溶解固体	0.239	0.249	-0.205	0.325	0.191	0.359
悬浮物	0.254	0.221	-0.161	0.441	0.212	0.310
pH	-0.586	0.002**	-0.159	0.447	-0.574	0.003**
盐度	0.247	0.234	-0.196	0.347	0.200	0.338
电导率	0.235	0.258	-0.208	0.318	0.187	0.371
溶解氧	-0.572	0.003**	-0.203	0.330	-0.568	0.003**
COD	0.053	0.802	-0.413	0.040*	-0.016	0.938
TN	0.231	0.266	0.511	0.009**	0.298	0.148
TP	0.237	0.254	0.842	<0.001**	0.356	0.081
叶绿素 a	-0.075	0.723	-0.356	0.081	-0.127	0.547
淤泥深度	0.327	0.111	1.000	<0.001**	0.466	0.019*
淤泥有机质	0.327	0.111	1.000	<0.001**	0.466	0.019*
淤泥 TN	0.195	0.351	0.152	0.467	0.206	0.322
淤泥 TP	-0.136	0.518	-0.345	0.091	-0.182	0.384

*代表相关性显著($P<0.05$); **代表相关性极显著($P<0.01$).

化程度进一步加深. 在此次调查中发现 25 个样点中 48% 为中-富营养, 48% 为富营养, 4% 为重富营养, 南四湖总体处于中-富营养向富营养化过渡的状态. 而 1996 年时南四湖为中营养水平^[10], 2009 年是中-富营养水平^[11]. 由此看来, 南四湖的富营养化程度仍在加剧.

3.3 湖水理化性质及水资源利用对沼泽化的影响

金红华报道湖流和水深对沼泽化的影响较大^[7]. 湖流不仅影响沉积物的分布, 同时也影响沉积速率. 水深与水生植物的分布和产量有密切的关系, 一般深水区不利于大型维管植物的生长, 随着水体变浅, 沉水植物、浮叶植物、挺水植物逐渐成为优势种类, 而浅水区则更有利于挺水植物的生长^[12]. 我们也发现沼泽化植被指标、淤积指标以及综合指标都与水深呈负相关, 但与淤积指标和综合指标相关性并不显著, 因为沼泽化的本质就是湖泊变浅, 不断加剧的沼泽化自然与深度呈负相关. 另外我们还发现沼泽化植被指标以及综合指标与湖水 pH 和溶解氧呈显著负相关, 表明沼泽化过程中植被生长以及淤泥的积累导致了水体 pH 以及溶解氧的下降, 所以, 沼泽化水体中水生植被生长对水生态系统往往不利.

另一个重要的驱动因素是水资源的不合理利用. 在南四湖内围网、网箱、围堰、鱼塘占到湖面的 93% 以上, 即使在航道较宽敞的部分区域, 也因为底泥淤积和水速较缓, 生长着成片的野菱、藕、眼子菜、芦苇等, 它们的生长进一步弱化了湖水的运动. 另一方面, 饵料的投放和围堰的沙土堆积使得更多的沉积物淤积, 大大加速了沼泽化的进程.

综上所述, 南四湖已经不是真正意义上的湖泊, 而是水体基本不流动的航道, 处于中-富营养向富营养化过渡的状态, 而且富营养化趋势仍在加剧. 其沼泽化的原因既有自然因素, 又有人为因素. 外源污染物的输入和湖泊营养水平的提高导致其沼泽化, 而流域水资源的不合理利用进一步加剧了沼泽化. 这深刻反映了湖泊水资源开发利用与生态保护之间日益激烈的矛盾. 因此, 研究南四湖沼泽化的现状和驱动因素不仅是了解这一问题所必需的, 更是解决问题的前提.

4 参考文献

- [1] 张祖陆, 孙庆义, 彭利民等. 南四湖地区水环境问题探析. 湖泊科学, 1999, 11(1): 86-90.
- [2] 杨东海, 张 晴, 潘勇伟等. 山东省南四湖及其流域环境特征. 江苏环境科技, 2004, 17(增刊): 120-126.
- [3] 吴庆龙, 胡耀辉, 李文朝等. 东太湖沼泽化发展趋势及驱动因素分析. 环境科学学报, 2000, 20(3): 275-279.
- [4] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [5] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [6] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22: 361-369.
- [7] 金红华. 浅水湖泊沼泽化程度定量评价及其在东太湖的应用[学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [8] 武周虎, 乔海涛, 付莎莎等. 南水北调东线工程对南四湖环境的影响及对策. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 1-7.
- [9] Wang C, Wang Y, Wang P. Water quality modeling and pollution control for the eastern route of South to North Water Transfer Project in China. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 18(3): 253-261.
- [10] 舒金华, 黄文钰, 吴延根. 中国湖泊营养类型的分类研究. 湖泊科学, 1996, 8(3): 193-200.
- [11] 徐祖信, 姜雅萍. 湖泊营养状态的综合水质标识指数评价及检验. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 1044-1048.
- [12] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965.