

滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别^{*}

王 琦, 高晓奇, 肖能文, 刘高慧, 吕凤春, 韩 煒, 史娜娜, 全占军^{**}

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 研究滇池沉水植物的分布及其与水环境因子的关系, 对于滇池沉水植物的恢复具有重要的指导意义。2016年4—11月对滇池24个典型点位沉水植物群落特征进行调查, 共发现16个调查区存在9种沉水植物, 以篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、微齿眼子菜(*P. maackianus*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、马来眼子菜(*P. wrightii*)等为主, 沉水植物主要分布在近岸3 m以内水域, 盖度在10%左右。主成分分析结果表明, 总氮、总磷、悬浮物、化学需氧量和叶绿素a浓度是影响沉水植物种类和生物量的主要因素, 透明度是影响沉水植物盖度的主要因素; 典范对应分析结果显示, 滇池沉水植物的分布主要受水体中营养盐含量和化学需氧量的影响, 穗花狐尾藻和轮叶黑藻对有机物和藻类的耐受能力较强, 马来眼子菜和篦齿眼子菜适于生长在高营养盐的环境。滇池沉水植物恢复初级阶段的关键是降低水体中化学需氧量、抑制藻类的生长, 其次是控制水体营养盐浓度。按照“一区一策”的原则, 草海东风坝内和外海南部适于进行沉水植物恢复, 外海北部实行控藻治理, 外海东部需改善水体有机物浓度和营养盐条件, 外海西部以沉水植物自然保育为主。

关键词: 滇池; 草海; 沉水植物; 群落分布; 主成分分析; 典范对应分析; 生态修复; 影响因子

Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi

WANG Qi, GAO Xiaoqi, XIAO Nengwen, LIU Gaohui, LÜ Fengchun, HAN Yu, SHI Nana & QUAN Zhanjun^{**}

(Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

Abstract: Studying the distribution of submerged macrophytes and the influencing factors of water environment is of significance for the recovery of submerged macrophytes in Lake Dianchi. Field surveys for characteristics of submerged macrophytes were carried out at 24 typical regions in Lake Dianchi from April to November, 2016. A total of 9 submerged macrophytes species were recorded in the 16 study regions. *Potamogeton pectinatus*, *P. maackianus*, *Myriophyllum spicatum*, *Hydrilla verticillata* and *P. wrightii* were the main submerged macrophytes species in Lake Dianchi. The depth of submerged macrophytes was less than 3 m, which was 10% of the whole lake area. Principal component analysis showed that total nitrogen, total phosphorus, suspended solids, chemical oxygen demand, transparency and chlorophyll-a were the main influencing factors for the distribution and biomass of submerged macrophytes, whereas transparency was the main influencing factor for the coverage of submerged macrophytes. Canonical correspondence analysis indicated that the distribution of submerged macrophytes was mainly influenced by nutrient concentrations and chemical oxygen demand. *M. spicatum* and *H. verticillata* are tolerant species of organic matter concentration, and algae. *P. wrightii* and *S. pectinata* are adaptive to high nutrients concentration. Reducing chemical oxygen demand and algae biomass will be crucial to submerged macrophytes restoration, with controlling the nutrients level in water as the second. According to the principle of “one district one policy”, the inside of Dongfeng dam and the southern lake should be the prior place to be restored, while the northern lake should be the place to control algae at first. The eastern lake should cut down the organic matter and nutrients concentrations. The western lake should be under natural protection.

Keywords: Lake Dianchi; Lake Caohai; submerged macrophytes; community distribution; principal component analysis; canoni-

* 云南省环境保护厅生物多样性保护专项资助. 2017-02-17 收稿; 2017-04-24 收修改稿. 王琦(1987~), 女, 工程师, 硕士; E-mail: wangqi312@126.com.

** 通信作者; E-mail: quanzj@caes.org.cn.

cal correspondence analysis; ecological restoration; influencing factors

在富营养化湖泊中,沉水植物恢复是水生态系统重建的关键指示要素^[1-2]。但是,由于沉水植物恢复难度较大,也是湖泊生态系统恢复的重点和难点^[3]。沉水植物作为主要的初级生产者,可以指示湖泊水体状况^[4-6],维持水生态系统健康^[7]。同时,在富营养化水体中,沉水植物还可以富集水体中的污染物,起到净化水质的作用^[8]。因此,沉水植物的恢复也成为水环境治理的方法之一^[9]。国内外学者在沉水植物生长恢复方面进行了大量的研究,光照强度^[10]、营养盐^[11-12]、底质^[13]、浊度^[14]、温度^[15-16]等均与沉水植物生长相关,共同影响沉水植物的群落组成及其分布^[3]。因此,识别环境因子对于沉水植物分布格局的影响具有重要意义。

滇池是云南省九大高原湖泊之一,1990s以前,由于人类活动的干扰^[17],滇池水体富营养化严重^[18],沉水植物严重退化,原有的海菜花、轮藻群落几乎绝迹,被耐污性较强的沉水植物取代,沉水植物分布面积由1960s的90%以上下降到1.8%,分布水深退缩到2 m浅水域^[19-23]。国家和地方对滇池生态问题高度重视,实施了一系列恢复工程,滇池水污染得到了一定控制^[24],在此基础上,也对滇池沉水植物进行了恢复尝试,大量研究表明,光补偿深度、水温、营养盐浓度等^[25-27]均对滇池沉水植物分布产生影响。滇池湖岸线较长,水文条件比较复杂,各个湖区水体理化条件、气象因素、沉水植物分布等都存在差异,若采用单一的生态修复技术,难以在各个湖区推广,将影响滇池沉水植物的恢复成效。结合各个湖区水环境特征,解析环境因子对沉水植物空间分布的影响,评估不同区域的沉水植物恢复潜力,可以有效促进滇池沉水植物恢复工作的开展。

本文以滇池土著沉水植物为调查对象,对现有沉水植物分布和生物量进行空间模拟,并采用主成分分析法和典范对应分析法对影响沉水植物分布的水环境因子进行解析,识别影响滇池沉水植物分布的关键性因子。采用GIS空间分析方法,对滇池沉水植物分布、生物量和水环境因子进行叠加分析,尝试划分沉水植物恢复分区,提出滇池沉水植物分区恢复策略,以期为滇池沉水植物的恢复和水质的改善提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样点选择与布设

滇池($24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02'N, 102^{\circ}36' \sim 102^{\circ}47'E$)位于云南省昆明市主城区下游,湖面南北长约40 km,东西平均宽约7 km,湖面面积 298.4 km^2 ,湖体北部的海埂将滇池分为草海和外海两部分。滇池属于半封闭湖泊,承接上游昆明主城区的污水,水体富营养化严重,随着滇池治理和保护工作的开展,近年来滇池水质逐渐改善。

在对滇池沉水植物进行全面调查的基础上,分别在草海、外海北部、东部、西部和南部布点。草海原来是昆明主城区主要污染物的承接区域,近几年由于水体置换工程的开展,水质有了很大改善;外海北部仍是滇池重污染区;滇池沉水植物恢复工程主要集中在外海西部;外海东部为昆明新区呈贡所在地;外海南部沉水植物较丰富,主要人类干扰为渔业活动。每个区域选择若干个典型湖区进行布点,点位分布情况见图1。

1.2 样品采集

考虑到滇池水生植被分布的不均匀性,2016年4、7、11月分别在草海东风坝外(C1)、草海东风坝内(C2)、盘龙江(N1)、福保湾(N2)、宝丰村(N3)、宝丰湿地公园(N4)、回龙村(N5)、江尾村(N6)、乌龙湾(E1)、大河村(E2)、海晏村(E3)、腰湾村(E4)、晖湾(W1)、西华湾(W2)、观音山(W3)、浪泥湾(W4)、海口镇(S1)、白沙湾(S2)、马鱼滩(S3)、弯子塘(S4)、东大河河口(S5)、鸽子窝(S6)、小渔村(S7)、梁王村(S8)24个典型点位进行调查并采样(图1)。每个点位视水深(1 m, 2 m, 3 m……)由岸边垂直向湖中布设样点,直至水生植物群落分布边界。

每定一个样点,停船进行沉水植物调查,采用自制采草器(完全开口面积 0.25 m^2)在同一水深范围进行10次沉水植物的随机采集,先辨认种类,再将采集到的沉水植物按种类分开,称其鲜重,现场记录沉水植物的盖度、水体透明度(SD)和水深(D),每个样点的经纬度采用GARMIN手持式GPS记录。

每一个典型点位在水深1.5 m的样点处,用水质采样器采集水下0.5 m处水样,每个样点重复采样3次,混均后装入水样瓶中,带回室内测定悬浮颗粒物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{cr})和叶绿素a(Chl.a)浓度。

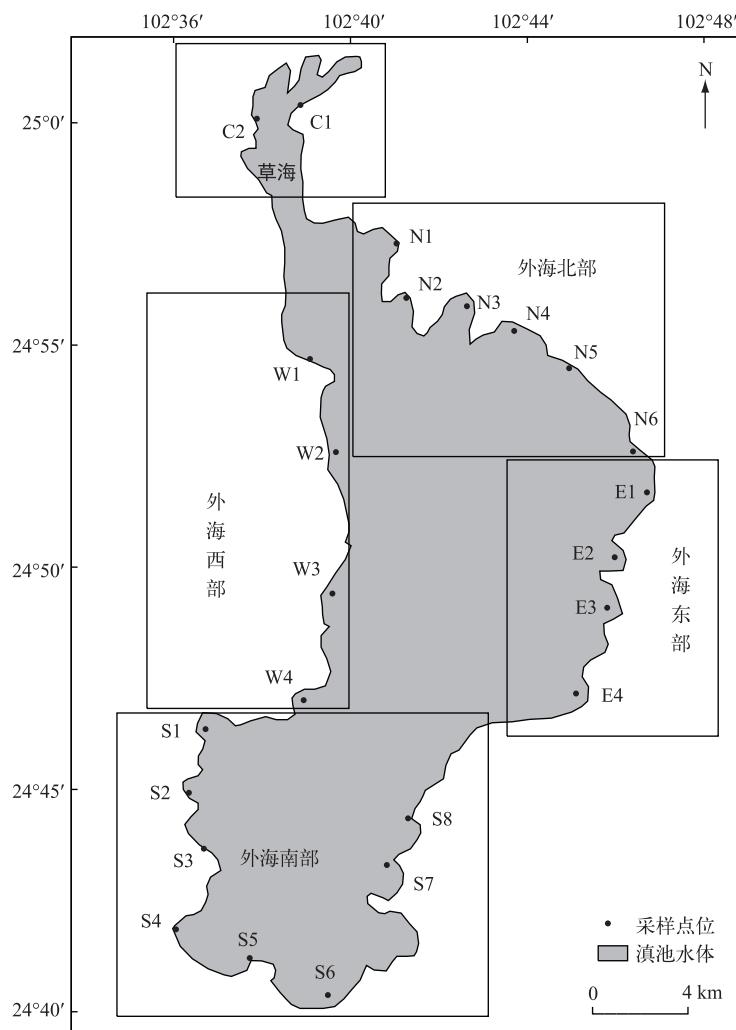


图 1 滇池调查点位分布
Fig.1 Distribution of research sites in Lake Dianchi

1.3 样品监测

现场进行水深、透明度的测定,其中水深用测深锤测定,透明度用透明度盘测定。采集的水样各项参数按照文献[28]测定:SS 浓度采用离心+滤纸过滤法;TN 浓度采用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法;TP 浓度采用钼酸铵分光光度法;COD_{Cr}浓度采用重铬酸钾法;Chl.a 浓度采用乙醇+分光光度法。

1.4 数据分析

1.4.1 沉水植物 GIS 空间数据库的建立 对研究区的水域底图进行数字化处理,然后将采集到的沉水植物种类和生物量数据进行整理,构建滇池沉水植物数据库。运用 ArcGIS 软件,将采样时记录的沉水植物点位 GPS 坐标信息进行处理,导入 GIS 平台,建立滇池沉水植物坐标点位、种类和生物量的数据组合,制作沉水植物分布专题地图。

1.4.2 SPSS 主成分分析法 采用 SPSS 17.0 软件对滇池各采样点位水深、透明度、SS、TN、TP、COD_{Cr}、Chl.a 进行主成分分析,研究不同水质指标之间的相关性,筛选出对沉水植物种类、分布和生物量影响较大的因子。

1.4.3 CCA 典范对应分析 将滇池不同点位环境因子(水深、透明度、SS、TN、TP、COD_{Cr}、Chl.a)和物种因子

(种类、盖度、生物量等)进行整理,采用 CANOCO for WINDOWS 4.5 软件进行典范对应分析,并采用 CANO-DRAW 软件制图.

2 结果与分析

2.1 滇池沉水植物现状调查

本次调查在滇池 24 个典型点位布设 328 个调查样点,共发现沉水植物 9 种(表 1). 滇池沉水植物以篦齿眼子菜、微齿眼子菜、穗花狐尾藻、轮叶黑藻、马来眼子菜等为主,仅有少部分点位发现穿叶眼子菜、光叶眼子菜、金鱼藻和苦草.

24 个点位中有沉水植物分布的点位共有 16 个,盘龙江至江尾村近岸无沉水植物分布. 其中,篦齿眼子菜在 15 个点位分布,草海和外海东南部区域分布较多,生物量也较大;微齿眼子菜在 9 个点位分布,主要集中在外海南部区域;穗花狐尾藻在 9 个点位分布,外海东部和南部区域分布较多;轮叶黑藻在 8 个点位分布,但仅分布于草海和外海西南部沿岸区域;马来眼子菜在 8 个点位分布,外海东南部区域分布最多;穿叶眼子菜、苦草、光叶眼子菜和金鱼藻等分布较少,其中苦草分布最少,仅在外海东大河河口发现.

同时被调查的湖泊中挺水植物以菰群落、芦苇群落、香蒲群落和菖蒲群落为主,主要分布在湖滨人工湿地. 浮叶、漂浮植物以睡莲、野菱、大薸群落为主,主要分布在草海和外海西南部区域.

表 1 滇池沉水植物种类和出现频度

Tab.1 Species and frequency of submerged macrophytes in Lake Dianchi

物种名(拉丁名)	出现点位	频度
篦齿眼子菜(<i>Potamogeton pectinatus</i>)	C1、C2、E3、E4、W1、W2、W3、S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8	18.60%
微齿眼子菜(<i>Potamogeton maackianus</i>)	E2、E3、W2、S1、S2、S3、S4、S5、S6	15.85%
穗花狐尾藻(<i>Myriophyllum spicatum</i>)	C2、E1、E4、W2、S2、S4、S5、S6、S8	11.89%
轮叶黑藻(<i>Hydrilla verticillata</i>)	C2、W1、W2、S2、S3、S4、S5、S8	7.62%
马来眼子菜(<i>Potamogeton wrightii</i>)	E3、E4、W2、W3、S2、S3、S5、S8	5.79%
穿叶眼子菜(<i>Potamogeton perfoliatus</i>)	W3、S5、S6、S8	3.35%
金鱼藻(<i>Ceratophyllum demersum</i>)	C2、E4、W1	0.91%
光叶眼子菜(<i>Potamogeton lucens</i>)	S2	1.52%
苦草(<i>Vallisneria natans</i>)	S5	0.30%

2.2 滇池沉水植物群落分类

依据沉水植物种类、生物量以及盖度等确定沉水植物群落优势种,选择区域生物量最大、盖度最高的一种或几种沉水植物作为优势群落. 滇池沉水植物主要群落类型有 6 种:

1) 篦齿眼子菜群落:该群落以篦齿眼子菜为优势种,伴生种主要有穗花狐尾藻、马来眼子菜和微齿眼子菜. 该群落主要分布于草海东风坝外和小渔村,生物量最大的是草海东风坝外,是滇池分布最广泛的耐污群落类型.

2) 轮叶黑藻群落:该群落以轮叶黑藻为优势种,无伴生种,主要分布于草海东风坝内、晖湾和东大河河口等区域,近岸分布生物量较大.

3) 穗花狐尾藻群落:该群落以穗花狐尾藻群落为优势种,常见伴生种为篦齿眼子菜,主要分布于乌龙湾,是滇池典型的耐污群落类型.

4) 马来眼子菜+穗花狐尾藻群落:该群落以马来眼子菜和穗花狐尾藻群落为优势种,常见伴生种为微齿眼子菜和篦齿眼子菜,主要分布于西华湾.

5) 微齿眼子菜+蓖齿眼子菜群落:该群落以微齿眼子菜和蓖齿眼子菜群落为优势种,常见伴生种为马来眼子菜和穗花狐尾藻,主要分布于鸽子窝、白沙湾、海口镇、海晏村,在滇池外海南部分分布最广.

6) 马来眼子菜+篦齿眼子菜群落:该群落以马来眼子菜和篦齿眼子菜群落为优势种,常见伴生种为穗花狐尾藻,主要分布于观音山、腰湾村、梁王村等滇池外海中部区域.

2.3 滇池沉水植物分布及生物量

滇池有沉水植物分布的区域中,草海沉水植物以篦齿眼子菜和轮叶黑藻为主,伴有少量的穗花狐尾藻,草海东风坝内的沉水植物种类、生物量以及分布面积显著高于草海东风坝外;外海北部主要承接昆明市生活点源和农业面源污染,同时处于流域下风向,受污染物富集影响,区域无沉水植物分布;外海西部沉水植物以穗花狐尾藻、篦齿眼子菜和轮叶黑藻为主,伴有少量的马来眼子菜群落,近岸沉水植物分布较多,群落盖度在5%~10%之间;外海东部以篦齿眼子菜、穗花狐尾藻、马来眼子菜群落为主,伴有少量的微齿眼子菜,沉水植物分布较少,群落盖度在5%~10%之间;外海南部处于流域上风向,区域水流速度较缓,同时流域周边污染源较少,较利于沉水植物的生长,因此南部区域沉水植物种类最多,分布面积最大,以篦齿眼子菜、穗花狐尾藻、轮叶黑藻和微齿眼子菜为主,伴有少量的马来眼子菜群落,沉水植物群落盖度在5%~40%之间(表2)。

表 2 滇池沉水植物群落特征
Tab.2 Community characteristics of submerged macrophytes in Lake Dianchi

区域	点位	分布水深/m	沉水植物种类数	平均生物量/(g/m ²)	群落总盖度/%	优势种群	优势种群占生物量比例
草海	草海东风坝内	1.5~2.3	4	1630	<20	轮叶黑藻	75%
	草海东风坝外	2.5	1	550	<2	篦齿眼子菜	100%
外海西部	晖湾	1.6~2.1	3	3120	<5	轮叶黑藻	95%
	西华湾	0.8~1.7	5	880	<10	穗花狐尾藻	61%
	观音山	0.7~1.8	3	2520	<10	篦齿眼子菜	51%
外海东部	乌龙湾	0.8~1.3	1	740	<5	穗花狐尾藻	100%
	海晏村	1.4~2.6	3	810	<5	篦齿眼子菜	53%
	腰湾村	0.5~2.9	5	1140	<10	马来眼子菜	51%
外海南部	梁王村	0.3~2.2	5	360	<10	篦齿眼子菜	62%
	小渔村	2.5	1	200	<2	篦齿眼子菜	100%
	鸽子窝	1.0~2.6	5	2700	20~30	微齿眼子菜	57%
	东大河口	0.3~1.5	6	14	<5	穗花狐尾藻	55%
	湾子湾	1.0~2.2	4	229	5~10	篦齿眼子菜	61%
	马鱼滩	1.0~2.0	4	280	<1	轮叶黑藻	48%
	白沙湾	0.5~2.0	6	1410	20~30	微齿眼子菜	52%
	海口镇	1.0~3.0	2	1200	20~40	微齿眼子菜	57%

采用GIS空间高程数据,导入各调查点位主要沉水植物种类以及生物量信息,得到各点位沉水植物分布及生物量分布(图2),滇池沉水植物主要分布在近岸3 m以内水域,沉水植物受风向影响,主要分布在西岸和南岸,沉水植物种类以外海南部最多,生物量以外海西部最高,该区域的平均生物量可达1.63 kg/m²,其次是外海南部和草海东风坝内,该区域的平均生物量可达1.22 kg/m²,外海东部沉水植物生物量较低,沉水植物生物量最大的采样点位于晖湾,以轮叶黑藻为优势种。

2.4 影响滇池沉水植物分布的主要水环境因子

为分析影响滇池沉水植物分布的主要水环境因子,选取水深、透明度、SS、TN、TP、COD_{Cr}、Chl.a 7个指标,采用主成分分析方法对指标进行综合分析。结果显示,主成分分析相关性检验KMO值为0.531,Bartlett's为显著性相关,说明因子分析结果可行。根据主成分分析结果,第1主成分特征值为2.913,贡献率为41.616%,第2主成分特征值为1.763,贡献率为25.192%,前2个主成分累积贡献率达到66.809%(表3)。主成分分析结果提取的2个成分能够表征滇池水环境状况。TN、TP和SS在第1主成分上有较高载荷,COD_{Cr}、透明度和Chl.a在第2主成分上有较高载荷。根据水环境因子载荷矩阵(表4),通过转化得到2个主成分的表达式:

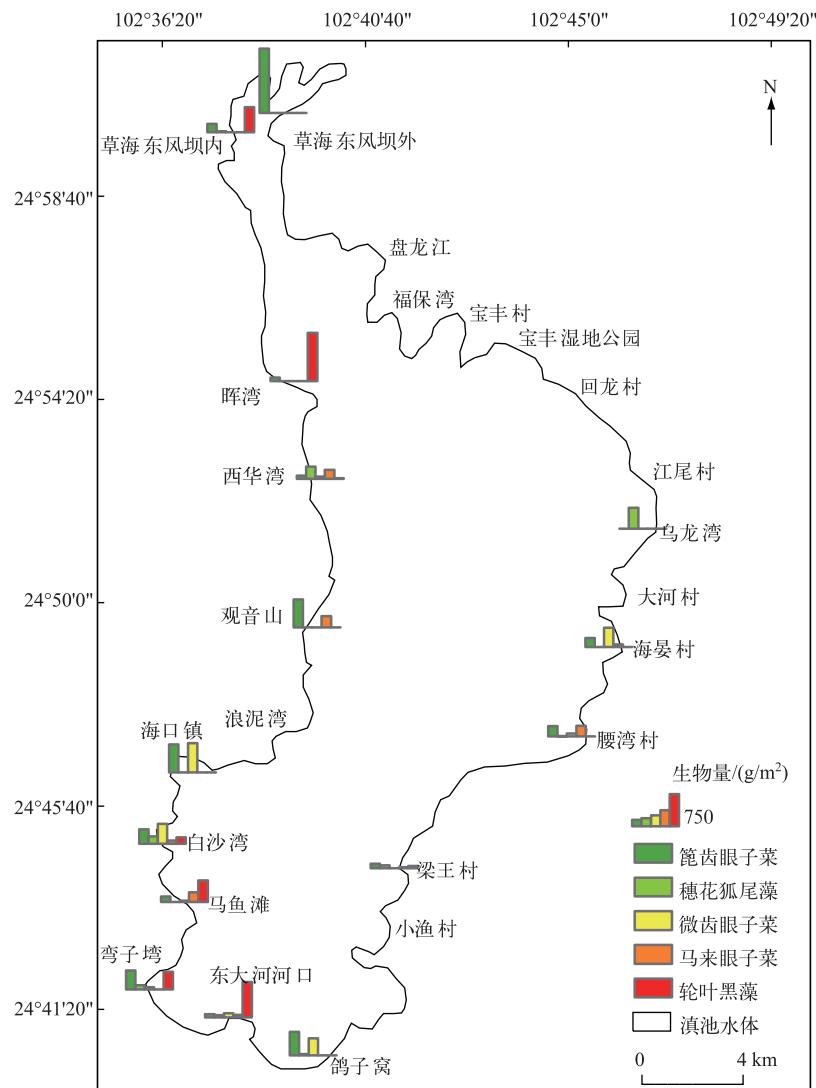


图 2 滇池典型沉水植物生物量分布

Fig.2 Biomass distribution of typical submerged macrophytes in Lake Dianchi

表 3 主成分分析特征值及贡献率

Tab.3 Eigenvalues and contribution rates of the principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.913	41.616	41.616
2	1.763	25.192	66.809
3	0.967	13.819	80.628
4	0.695	9.935	90.563
5	0.347	4.957	95.521
6	0.298	4.262	99.783
7	0.015	0.217	100.000

表 4 水环境因子载荷矩阵
Tab.4 Components matrix of water environment factors

水环境因子	SS	TN	TP	COD _{Cr}	Chl.a	SD	D
F1	0.739	0.901	0.837	-0.285	0.537	-0.562	0.411
F2	-0.179	0.280	0.318	0.862	0.587	0.640	-0.234

$$F1 = 0.4330 \text{ SS} + 0.5279 \text{ TN} + 0.4904 \text{ TP} - 0.1670 \text{ COD}_{Cr} + 0.3146 \text{ Chl.a} - 0.3293 \text{ SD} + 0.2408 \text{ D} \quad (1)$$

$$F2 = -0.1348 \text{ SS} + 0.2109 \text{ TN} + 0.2395 \text{ TP} + 0.6492 \text{ COD}_{Cr} + 0.4421 \text{ Chl.a} + 0.4820 \text{ SD} - 0.1762 \text{ D} \quad (2)$$

根据主成分系数确定 TN、TP、SS、COD_{Cr}、透明度和 Chl.a 是影响沉水植物分布的主要水环境因子。通过相关性分析发现, TN 与 TP 在 0.01 水平上呈显著正相关, 相关系数达到 0.970; SS 与 TN、Chl.a 在 0.01 水平上显著相关, 与 TP、透明度在 0.05 水平上显著相关; TN 与 Chl.a 在 0.01 水平上显著相关, TP 与 Chl.a 在 0.05 水平上显著相关。研究发现, 沉水植物盖度与透明度在 0.05 水平上显著相关, 说明透明度对沉水植物的分布有一定影响。

2.5 沉水植物与水环境因子的 CCA 分析

为反映滇池沉水植物与水环境因子的关系以及点位与水环境因子的关系, 选取滇池沉水植物(篦齿眼子菜、微齿眼子菜、穗花狐尾藻、轮叶黑藻、马来眼子菜、穿叶眼子菜、苦草、金鱼藻、光叶眼子菜), 采用 Canoco 4.5 软件进行除趋势对应分析(DCA), 第 1 轴长度介于 3~4 之间, 选择 CCA 单峰模型排序, CCA 分析统计信息见表 5。第 1 排序轴沉水植物与环境因子的相关性达到 0.900, 第 2 排序轴沉水植物与环境因子的相关性达到 0.867, 第 3 排序轴沉水植物与环境因子的相关性达到 0.682, 第 4 排序轴沉水植物与环境因子的相关性达到 0.539, 同时 4 个排序轴物种与环境变量的累计百分数达到 93.7%。

表 5 滇池沉水植物 CCA 分析统计信息
Tab.5 CCA analysis of statistical information of submerged macrophytes in Lake Dianchi

轴	特征值	沉水植物与环境因子相关性	物种变量累计百分数	物种与环境变量累计百分数
1	0.265	0.900	23.5	46.5
2	0.150	0.867	36.9	72.9
3	0.078	0.682	43.8	86.6
4	0.040	0.539	47.4	93.7

从图 3a 可以看出, 第 1 排序轴与 COD_{Cr}、Chl.a、SS 浓度和透明度呈显著正相关, 第 2 排序轴与 TP 浓度呈正相关, 与 TN 浓度呈显著负相关。滇池外海南部沉水植物丰富, 其主要影响因子为 TN、TP 浓度和水深。第 1 排序轴从左至右, 随着自南向北滇池水体中藻类和有机物的增加, 沉水植物分布逐渐减少。

从图 3b 可以看出, 滇池主要沉水植物中马来眼子菜和篦齿眼子菜生物量与 TP 浓度呈显著正相关; 穗花狐尾藻、轮叶黑藻生物量主要受 COD_{Cr} 浓度的影响, 同时也受到 SS 浓度的影响; 微齿眼子菜生物量受水深影响最大, 同时也受到水体 TN 的影响。滇池出现频度较低的金鱼藻生物量主要与 Chl.a 浓度相关; 苦草和光叶眼子菜生物量主要受水深影响; 穿叶眼子菜生物量主要与 TP 相关。沉水植物种类数量主要受 TP 浓度影响, 沉水植物盖度与水深相关。目前滇池沉水植物以耐污种为主, 虽然典型沉水植物适应区间存在差异, 但水体营养盐浓度仍是决定性因子。

2.6 滇池沉水植物群落演变

根据黎尚豪等^[19]、李恒^[20]、曲仲湘等^[21]、戴全裕^[22]、余国营等^[23]、杨赵平等^[29]的研究结果, 得到滇池主要沉水植物各个时期的分布情况(表 6)。1960s 滇池沉水植物以海菜花、马来眼子菜和穗花狐尾藻群落为主; 1970s 以穗花狐尾藻和篦齿眼子菜群落为主; 1980s 以穗花狐尾藻、马来眼子菜和篦齿眼子菜群落为主; 1990s 以后以篦齿眼子菜群落和穗花狐尾藻为主, 沉水植物种类、分布面积和生物量总体呈现明显减少的趋势。

表 6 滇池主要沉水植物的分布演变
Tab.6 Changes of distribution of submerged macrophytes in Lake Dianchi

物种名(拉丁名)	1960s	1970s	1980s	2001 年	2016 年
海菜花 (<i>Otelia acuminata</i>)	C1、C2、N1、N2、N3、N4、N5、N6、E1、E2、E3、E4、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8				
篦齿眼子菜 (<i>Potamogeton pectinatus</i>)	C2、W1、W2、W3、W4、S1、S2	C2、N1、N4、W4、S1、S2、S4、S6	C2、N6、E1、S2	C2、N3、N6、W1、W2、W3、W4、S1、S2、S3、S4、S5、S6	C1、C2、E3、F4、W1、W2、W3、W4、S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8
轮藻 (<i>Charophyceae</i>)	C1、C2	C2、S2、S4		S5	
苦草 (<i>Vallisneria natans</i>)	S1、S2			W1	
穗花狐尾藻 (<i>Myriophyllum spicatum</i>)	W1、W2、W3、W4、S1、S2、S3、S5、S6、S7、S8	C1、C2、N1、N2、N3、N4、N5、N6、E1、E2、E3、E4、W1、W2、W3、W4、S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8	C1、C2、E3、W1、W2、W3、W4、S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8	E1、E2、E3、E4、C2、E1、E4、W2、S2、S4、S5、S6、S8	
马来眼子菜 (<i>Potamogeton malaianus</i>)	N2、N3、N4、N5、N6、E1、E2、E3、E4、W1、W2、W3、S2、S3、S7、S8	N1		N6、E1、E3、W2、W3	E3、E4、W2、W3、S2、S3、S5、S8
茨藻 (<i>Nejus marina</i>)				W1	
微齿眼子菜 (<i>Potamogeton naackianus</i>)				W4	E2、E3、W2、S1、S2、S3、S4、S5、S6
轮叶黑藻 (<i>Hydrilla verticillata</i>)					C2、W1、W2、S2、S3、S4、S5、S8

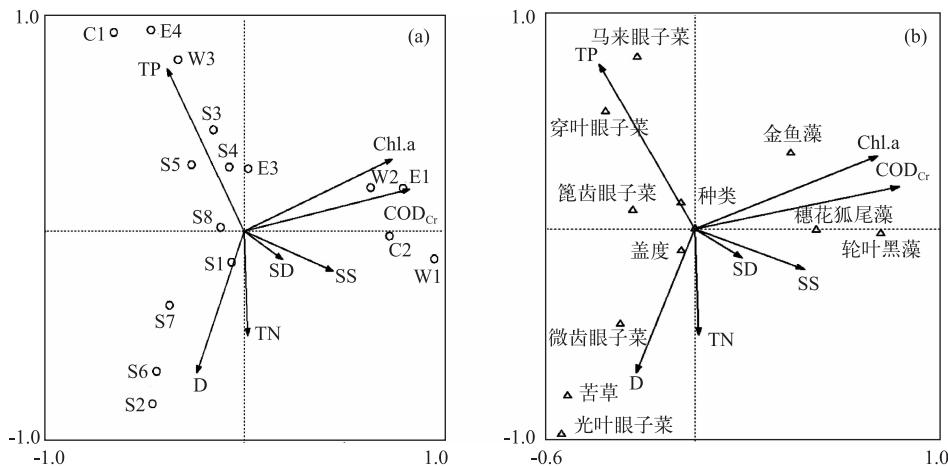


图 3 滇池不同点位(a)、不同沉水植物(b)与环境因子的 CCA 排序图

Fig.3 CCA ordination diagrams of samples-environmental factors (a) and species-environmental factors (b) in Lake Dianchi

对比 2016 年现状调查结果,海菜花、轮藻在 1970s 就已经消失;茨藻在 1990s 后消失;苦草分布区域和生物量大幅度减少,现有的多为人工恢复;穗花狐尾藻在 1970s—1990s 成为分布面积最大的物种,后逐渐被篦齿眼子菜取代;马来眼子菜在 1970s 显著减少,现有分布面积明显提升;微齿眼子菜在 1980s 后开始增加,现已成为外海南部的优势种;轮叶黑藻近 10 年明显增多,在草海和滇池外海西南部均有分布。

结合沉水植物区域调查来看,相较 1980s,滇池外海北部(N 区)沉水植物已经退化消失;C1、W3、E3、S3、S4 点位沉水植物群落处于退化过程中;W1 点位近岸沉水植物生物量明显增大;E4、S8 点位出现 1980s 失去的物种,但是生物量较低;S2、S6 点位沉水植物种类无明显变化,但生物量和分布面积显著提升。E4、S8、S2、S6 4 个点位沉水植物存在恢复趋势。

2.7 滇池沉水植物恢复分区研究

将滇池各点位沉水植物生物量数据导入 GIS 空间数据平台,进行插值分析,得到滇池沉水植物生物量的空间分布(图 4a)。滇池沉水植物恢复分区划分不仅要考虑现有沉水植物分布格局,还需要综合考虑生境特征、水质特征。根据主成分分析和 CCA 分析结果,透明度、营养盐浓度和 COD_{cr} 均对滇池沉水植物的分布和生物量产生影响,因此将近岸各点位光补偿深度(以 1.5 倍透明度代替^[26,30])、SS、TN、TP、COD_{cr}、Chl.a 浓度数据导入 GIS 空间数据平台,进行插值分析,分析结果经空间主成分分析后进行空间叠加分析,得到滇池水环境因子的空间分布(图 4b)。同时,将水环境因子空间分布图和沉水植物生物量空间分布图进行叠加分析,划分滇池沉水植物恢复一级分区(图 5a)。在一级分区的基础上,结合现场调查结果,处于下风向和风浪较大的地区降一级,有沉水植物恢复趋势的区域(E4、S8、S2、S6)升一级,最终二级分区划分为四级。划分结果见图 5b。

一类区(草海东风坝内,滇池外海南部):草海东风坝内和外海南部富营养化程度相对较小,为水生植物分布的主要区域,修复相对容易。先锋沉水植物优先考虑滇池存在的优势种,修复目标是增加沉水植物生物量和分布面积,优化群落结构,然后再考虑恢复滇池已濒临灭绝的物种。根据区域沉水植物演变过程,草海东风坝内以篦齿眼子菜、轮叶黑藻为先锋种,再考虑恢复穗花狐尾藻、苦草等物种,待水质达到清洁程度时,考虑恢复海菜花和轮藻;外海南部以穗花狐尾藻、马来眼子菜、微齿眼子菜等为先锋种,再考虑恢复苦草,最终考虑恢复海菜花。

二类区(晖湾,滇池外海东南部腰湾村区域):晖湾和外海东南部腰湾村区域水生植物生物量较大,但是种类较为单一,分布范围集中在近岸,同时区域水质条件一般。经过调查,晖湾区域沉水植物多为人工恢复,区域修复重点是降低水体有机物浓度,建立湖滨湿地缓冲带,改善水质条件。晖湾以增加沉水植物种类和生

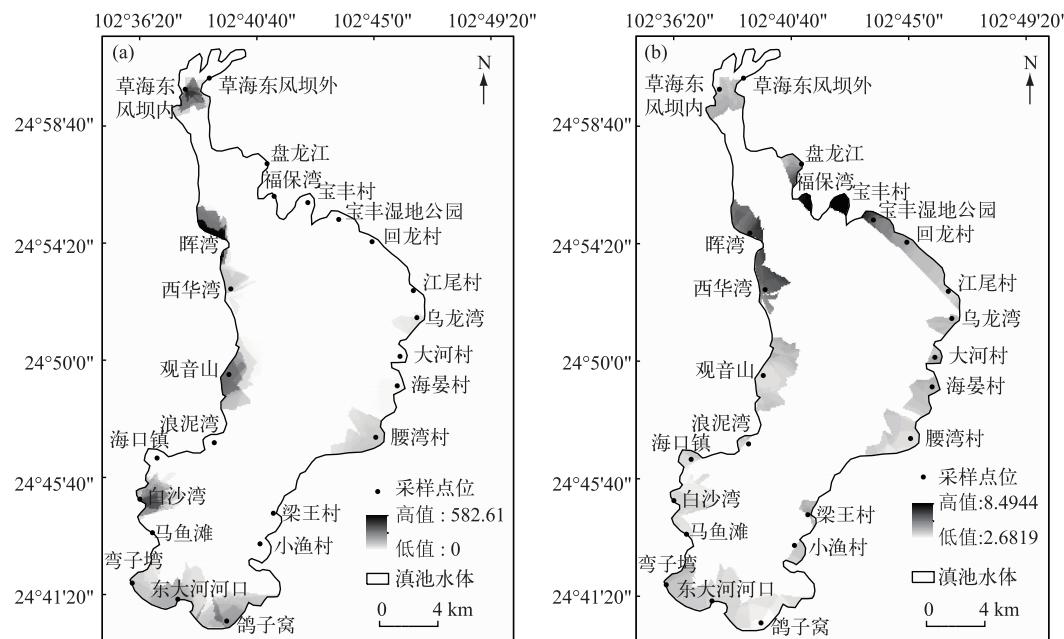


图 4 滇池沉水植物生物量(a)和近岸水环境因子(b)插值图

Fig.4 Interpolation graphs of biomass distribution of submerged macrophytes (a) and environmental factors (b) in Lake Dianchi

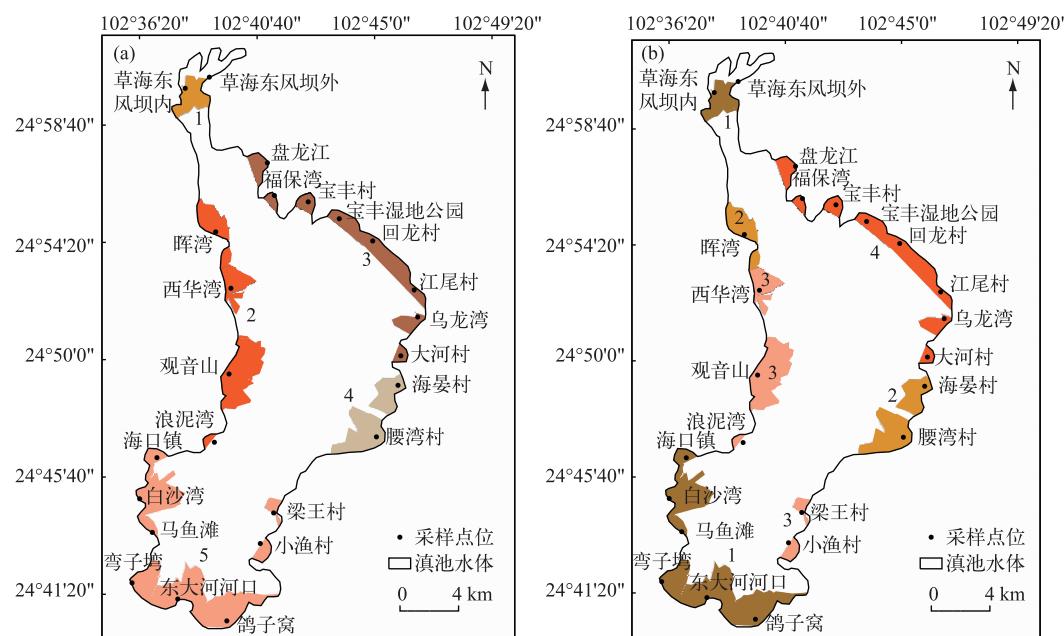


图 5 滇池沉水植物恢复一级分区(a)和二级分区(b)

Fig.5 First-class (a) and second-class (b) zoning maps of submerged macrophytes recovery in Lake Dianchi

物量为目标,如穗花狐尾藻、马来眼子菜等,腰湾村区域沉水植物修复目标是增加穗花狐尾藻生物量,恢复已濒临灭绝的物种,如金鱼藻等。

三类区(外海西部,滇池外海东南部梁王村区域):观音山和梁王村区域水质较好,风浪较大,沉水植物种类单一,分布面积较小。该区域现有风浪条件不利于沉水植物生长。因此以现有沉水植物的保育为主,增加沉水植物生物量。西华湾区域水体污染物富集程度一般,水生植物种类少,生物量较低,分布面积小。首先,应改善区域水质条件,降低水体 TN、TP 和 COD_{cr} 浓度;同时搭配一些浮叶植物如荇菜、菱和莲等,有利于水质改善。待水体污染物降到较低浓度时,增加现有穗花狐尾藻和马来眼子菜的生物量,扩展沉水植物分布面积。

四类区(外海北部和东北部区域):目前该区域水质状况较差,无沉水植物分布,不适宜进行沉水植物恢复。区域应以水质改善和控藻为主,采取工程措施全面大幅度削减滇池水体蓝藻水华,逐步消除外海北部和东北部区域蓝藻水华堆积,改善水生态系统。

3 讨论

3.1 沉水植物空间分布

Kringing 插值法是地统计学的经典插值方法之一,也适用于水生植物分布格局研究^[31]。滇池分为草海和外海,湖湾众多,水文条件复杂,周边存在很多人工湿地,因此很难对其沉水植物进行全面调查。GIS 空间技术的发展为沉水植物的调查带来了新的方法,通过对区域均匀布点采样,采用无偏内插、最小方差估算,得到区域沉水植物分布,同时还能对沉水植物生物量进行预测。

滇池沉水植物主要集中分布在近岸 3 m 水域范围内,仅有 2%~10% 的点位有沉水植物分布,传统的野外采样很难确定沉水植物群落边界,采用 GPS 辅助工具,结合现场布点调查,通过建立 GIS 空间数据库,可以准确地将采样点布设在地图上,而采用 Kringing 插值法可以将取样数据进行空间连续插值估算,从而预测沉水植物分布边界,通过现场比对,分析结果与实际调查的结果吻合度较高。

3.2 环境因子对沉水植物分布的影响

本研究表明,透明度、营养盐含量和 COD_{cr} 均是影响滇池沉水植物分布的主要因素。任久长等^[26] 研究指出,滇池水深达到 2 m 时,沉水植物生长需水体透明度达到 67 cm;水深达到 3 m 时,需水体透明度达到 98 cm,目前滇池大部分湖区难以满足水生植物对水体透明度的要求。研究发现,穗花狐尾藻和轮叶黑藻的生长能降低水体浊度、抑制藻类生长^[32-33],同时,对水体中 TN、TP 也有很好的去除效果^[34-35],通过茎的伸长克服光照不足对植物生长的抑制作用^[36]。篦齿眼子菜和马来眼子菜等耐污种能适应较高的营养盐负荷^[37-38],可作为高营养盐水体的净化植物。构建穗花狐尾藻、轮叶黑藻、篦齿眼子菜、马来眼子菜为先锋物种的组合净化系统,可以达到净化水质、促进区域水生生态系统恢复的作用。

3.3 沉水植物的衰退与恢复

本次调查结果与 1960s—1980s 滇池沉水植物调查结果对比发现,海菜花、轮藻、茨藻等物种消失,金鱼藻、苦草等上世纪出现频度较高的物种基本消失,而篦齿眼子菜、穗花狐尾藻、马来眼子菜等耐污种出现频度增加。沉水植物的衰退与滇池水质的退化有着明显的关系,随着水体中 COD_{cr} 和营养盐浓度的上升,耐污能力较强的篦齿眼子菜和穗花狐尾藻逐渐成为优势种,海菜花、轮藻、茨藻等物种对水体清洁程度要求较高,因此难以生存。

沉水植物的恢复首先需要识别主要环境因子。草海东风坝内、乌龙湾、西华湾、晖湾有机物浓度较高,穗花狐尾藻和轮叶黑藻对于有机物浓度高的水体具有良好的适应性,可作为先锋物种进行恢复;草海东风坝外、外海腰湾村、观音山以及滇池外海南部区域主要受水体营养盐浓度的影响,篦齿眼子菜和马来眼子菜等耐污种能够促进区域水生生态系统的恢复。海晏村区域的主要影响因素为 TP 和 Chl.a 浓度,可选用耐污的篦齿眼子菜、穗花狐尾藻、马来眼子菜等宽生态幅物种。

4 结论

1) 滇池沉水植物以篦齿眼子菜、微齿眼子菜、穗花狐尾藻、轮叶黑藻、马来眼子菜等耐污植物为主,沉水

植物主要分布在近岸3 m以内水域,盖度在10%左右。滇池沉水植物的生物量、种类与水体TN、TP等营养盐浓度呈显著相关,沉水植物盖度受到水深和透明度影响。随着水体中藻类和COD_{cr}的增加,滇池沉水植物种类逐渐减少。

2)恢复滇池沉水植物,首先应对主要环境因子进行控制,COD_{cr}、SS和Chl.a浓度高的水体对沉水植物的分布有很大的限制作用,因此降低水体中COD_{cr}浓度、抑制藻类的生长是沉水植物恢复初级阶段的关键,轮叶黑藻、穗花狐尾藻等可以承受较高的污染负荷。营养盐浓度也是决定沉水植物种类、盖度和生物量的重要因子,沉水植物恢复次级阶段要控制水体营养盐浓度,篦齿眼子菜、马来眼子菜等能够在较高营养盐浓度的水体中生长。

3)滇池沉水植物恢复应按照“一区一策”的原则。外海南部和草海最适宜进行沉水植物恢复,应选用先锋耐污种,增加沉水植物生物量和分布面积,优化群落结构,再考虑恢复滇池已濒临灭绝的物种;晖湾和滇池外海东南部腰湾村区域现状沉水植物人工恢复效果较好,应建立湖滨湿地缓冲带,改善水质条件,增加沉水植物种类和生物量;外海西部和东南部梁王村区域应以现有沉水植物的保育为主。

5 参考文献

- [1] Qiu DR, Wu ZB. On the decline and restoration of submerged vegetation in eutrophic shallow lakes. *J Lake Sci*, 1997, **9**(1): 82-88. DOI: 10.18307/1997.0113. [邱东茹, 吴振斌. 富营养化浅水湖泊沉水水生植被的衰退与恢复. 湖泊科学, 1997, 9(1): 82-88.]
- [2] Jin XC et al eds. Eutrophication of lakes in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [3] Wang H, Pang Y, Liu SB et al. Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed macrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3958-3968. [王华, 逢勇, 刘申宝等. 沉水植物生长影响因子研究进展. 生态学报, 2008, 28(8): 3958-3968.]
- [4] Nakamura K, Kayaba Y, Nishihiro J et al. Effects of submerged plants on water quality and biota in large-scale experimental ponds. *Landscape and Ecological Engineering*, 2008, **4**: 1-9.
- [5] Sachse R, Petzoldt T, Blumstock M et al. Extending one-dimensional models for deep lakes to simulate the impact of submersed macrophytes on water quality. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **11**(61): 410-423.
- [6] Ren YQ, Chen KN. Status of submersed macrophytes and its relationship with environmental factors in Lake Chaohu, 2010. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 409-416. DOI: 10.18307/2011.0314. [任艳芹, 陈开宁. 巢湖沉水植物现状(2010年)及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2011, 23(3): 409-416.]
- [7] Carpenter SR, Lodge DM. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany*, 1986, **26**: 341-370.
- [8] Tian Q, Wang PF, Ouyang P et al. Purification of eutrophic water with five submersed hydrophytes. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(1): 1-14. [田琦, 王沛芳, 欧阳萍等. 5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究. 水资源保护, 2009, 25(1): 1-14.]
- [9] Zhang AJ, Ye JY, Zhao HQ et al. Utilization of aquatic plants for improvement of water quality of southern Taihu Lake. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(6): 32-37. [张爱菊, 叶金云, 赵汉取等. 利用水生植物改善南太湖水质的研究. 水生态学杂志, 2011, 32(6): 32-37.]
- [10] Li WC, Lian GH. Light demand for brood-bud germination of submersed plant. *J Lake Sci*, 1996, **8**(Suppl): 25-29. DOI: 10.18307/1996.sup04. [李文朝, 连光华. 几种沉水植物营养繁殖体萌发的光需求研究. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 25-29.]
- [11] Jin XC, Chu JZ, Wang SR. Effects of nitrogen concentration and form in water on photosynthetic characteristics of *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum*. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13**(2): 200-204. [金相灿, 楚建周, 王圣瑞. 水体氮浓度、形态对黑藻和狐尾藻光合特征的影响. 应用与环境生物学报, 2007, 13(2): 200-204.]
- [12] Horppila J, Nurminen L. Effects of different macrophyte growth forms on sediment and P resuspension in a shallow lake. *Hydrobiologia*, 2005, **545**(1): 167-175.
- [13] Xie YF, Li CH, Liu ZW et al. Effects of sediments on the growth and morphology of *Vallisneria natans*. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1269-1272. [谢贻发, 李传红, 刘正文等. 基质条件对苦草(*Vallisneria natans*)生长和形态特征的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1269-1272.]

- [14] Wang WL, Wang GX, Li Q *et al.* Influence of water turbidity on growth of the seedlings of *Potamogeton crispus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(11): 3586-3593. [王文林, 王国祥, 李强等. 水体浊度对菹草(*Potamogeton crispus*)幼苗生长发育的影响. 生态学报, 2006, **26**(11): 3586-3593.]
- [15] Barko JW, Smart RM. Comparative influences of light and temperature on the growth and metabolism of selected submersed freshwater macrophytes. *Ecological Monographs*, 1981, **51**: 219-235.
- [16] Yan ZQ, Liu M, Wu XY *et al.* Influence of temperature on the growth and nutrient removal of five submerged macrophytes. *Ecological Science*, 2014, **33**(5): 839-844. [闫志强, 刘黾, 吴小业等. 温度对五种沉水植物生长和营养去除效果的影响. 生态科学, 2014, **33**(5): 839-844.]
- [17] Sun JH, Cao XF, Huang Y. Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 347-354. DOI:10.18307/2012.0304. [孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 347-354.]
- [18] Xu XM, Wu X, He J *et al.* Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed(1988-2014) and identification of countermeasures. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 476-484. DOI:10.18307/2016.0302. [徐晓梅, 吴雪, 何佳等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 476-484.]
- [19] Li SH, Yu MJ, Li GZ *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan plateau. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, **5**(2): 87-114. [黎尚豪, 俞敏娟, 李光正等. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 1963, **5**(2): 87-114.]
- [20] Li H. The relationships between the changes of aquatic vegetation in the Lake Dianchi and the ecological conditions. *Journal of Yunnan University*, 1985, **7**(Suppl): 37-44. [李恒. 滇池植被变迁和生态条件的关系. 云南大学学报, 1985, **7**(增刊): 37-44.]
- [21] Qu ZX, Li H. Plant communities and pollution in Dianchi. In: *Pollution and aquatic organisms in Dianchi*. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 1983: 7-15. [曲仲湘, 李恒. 滇池植物群落和污染. 见:《滇池污染与水生生物》研究课题协作组编. 滇池污染与水生生物. 昆明: 云南人民出版社, 1983: 7-15.]
- [22] Dai QY. Observation and analysis of aquatic vegetation in Kunminghu Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1986, **2**: 65-75. [戴全裕. 云南滇池水生植被的观察与分析. 海洋湖泊通报, 1986, **2**: 65-75.]
- [23] Yu GY, Liu YD, Qiu CQ *et al.* Macrophyte succession in Dianchi Lake and relations with the environment. *J Lake Sci*, 2000, **12**(1): 73-80. DOI:10.18307/2000.0112. [余国营, 刘永定, 丘昌强等. 滇池水生植被演替及其与水环境变化关系. 湖泊科学, 2000, **12**(1): 73-80.]
- [24] Liang ZY, Liu Y, Sheng H *et al.* Identification of water quality trends in Lake Dianchi using an integrated STL and RSI approach. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 754-762. [梁中耀, 刘永, 盛虎等. 滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 754-762.]
- [25] Gong Z, Xia F, Wu XC eds. Study on demonstration project of large aquatic plant community restoration in Lake Dianchi. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003. [龚震, 夏峰, 吴学灿. 滇池大型水生植物群落恢复示范工程研究. 昆明: 云南科技出版社, 2003.]
- [26] Ren JC, Zhou H, Sun YT. Vertical distribution of light intensity and light compensation depth of submerged macrophyte in Lake Dianchi. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, **33**(2): 211-214. [任久长, 周红, 孙亦彤. 滇池光照强度的垂直分布与沉水植物的光补偿深度. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, **33**(2): 211-214.]
- [27] Li GB, Li L, Pan M *et al.* The degradation cause and pattern characteristics of Lake Dianchi ecosystem and new restoration strategy of ecoregion and step-by-step implementation. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 485-496. DOI:10.18307/2014.0401. [李根保, 李林, 潘珉等. 滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分布恢复策略. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 485-496.]
- [28] “Water and wastewater monitoring and analysis method” editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. *Monitoring and analysis methods of water and wastewater*: fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [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: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [29] Yang ZP, Zhang X, Liu AR. Study on aquatic vegetation change in Dianchi Lake. *Journal of Southwest Forestry College*, 2004, **24**(1): 27-30. [杨赵平, 张雄, 刘爱荣. 滇池水生植被调查. 西南林学院学报, 2004, **24**(1): 27-30.]
- [30] Kirk JTO ed. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [31] Ma K, Cai QH, Xie ZC *et al.* GIS simulation on the distribution of submerged macrophytes in Baoan Lake. *Acta Ecologica*

- Sinica*, 2003, 23(11): 2271-2277. [马凯, 蔡庆华, 谢志才等. 保安湖沉水植物分布的GIS模拟. 生态学报, 2003, 23(11): 2271-2277.]
- [32] Hu W, Zhang D, Ram YX et al. The allelopathy of *Myriophyllum spicatum* on freshwater algae. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 2011, 34(4): 359-364. [胡威, 章典, 冉颖霞等. 穗花狐尾藻对淡水华藻类的化感效应. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2011, 34(4): 359-364.]
- [33] Ji HT, Xie D, Zhou HJ et al. Influences of chemical components of water extracts from submerged macrophyte leaves on the growth of three common epiphytic algae. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 445-453. [纪海婷, 谢冬, 周恒杰等. 沉水植物浸提液组分对三种常见附植藻类生长的影响. 生态学杂志, 2015, 34(2): 445-453.]
- [34] Guo JX, Xu QJ, Jin XC et al. Effect of phosphorus concentration on growth of *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla verticillata*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 118-123. [郭俊秀, 许秋瑾, 金相灿等. 不同磷质量浓度对穗花狐尾藻和轮叶黑藻生长的影响. 环境科学学报, 2009, 29(1): 118-123.]
- [35] Yan CZ, Zeng AY, Jin XC et al. Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1050-1055. [颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿等. 同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响. 生态学报, 2007, 27(3): 1050-1055.]
- [36] Jian MF, Jian MF, Li LY et al. Distribution pattern of submerged plants in typical wetlands of Poyang Lake and its influencing factors of water environment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 765-772. [简敏菲, 简美锋, 李玲玉等. 鄱阳湖典型湿地沉水植物的分布格局及其水环境影响因子. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 765-772.]
- [37] Chen KN. Studies on biology and ecology of *Potamogeton pectinatus* L and its application for ecological restoration in Dianchi Lake [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2002. [陈开宁. 蓼齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus* L)生物、生态学及其在滇池富营养水体生态修复中的应用研究[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2002.]
- [38] Liu WL, Hu WP, Gu XH. The biomass variation of *Potamogeton malaianus* and its influential factors in Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3324-3333. [刘伟龙, 胡维平, 谷孝鸿. 太湖马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)生物量变化及影响因素. 生态学报, 2007, 27(8): 3324-3333.]