

doi: 10.7541/2020.104

贵州草海水生植物多样性及群落演替

代亮亮¹ 陈翔¹ 李莉杰² 刘昌阔¹ 袁果¹

(1. 贵州省生物研究所, 贵阳 550000; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 在2016年调查基础上, 结合已有资料, 研究草海水生植物多样性、群落特征、水生植被分布现状及群落演替规律, 探讨驱动水生植物群落演替的主导因素。结果显示, 草海现有水生植物67种, 隶属28科40属, 水生植物优势群落22个。与1983年相比, 草海水生植物无论是在优势种还是优势群落上均发生了很大变化, 挺水植物群落组成由1983年以莎草科植物为主演变为现在以禾本科植物为主, 入侵植物空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*) 在草海环湖消涨区、航道、码头等地已形成入侵趋势, 部分区域种群密度可达70株/m²。草海水生植物生物量30年来呈上升趋势, 2016年各类型水生植物的总生物量是1983年的4.1倍。相关资料表明, 人类活动、鸟类迁徙、水土流失、水体富营养化、外来入侵物种都对草海水生植物多样性和群落演替具有一定影响。

关键词: 多样性; 群落结构; 草海湿地; 水生植物; 演替

中图分类号: Q145⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2020)04-0869-08

大型水生植物是湿地生态系统的重要组成部分, 在维持湿地生态系统结构和功能方面有着十分重要的作用^[1]。作为生态系统的初级生产者之一, 水生植物不仅为湿地鸟类、水生动物等提供食物与栖息环境^[2], 而且在物质循环和能量流动方面也起着至关重要的作用^[3], 因而也常常被作为湿地环境的重要指示生物^[4]。江河筑坝、围湖造田、排污入湖、水位抬升等不合理的人为干扰会打破湖泊的自然演替过程, 造成水生生物多样性降低、群落结构简单化和湖泊生态系统功能失调^[5]。

贵州威宁草海(26°49'N—26°53'N, 104°12'E—104°18'E)属典型高原喀斯特草型天然浅水湖泊, 有着丰富的水生动植物种类和较高生产力的水生生物群落, 系统结构和功能完整, 为我国亚热带高原湿地生态系统的典型代表^[6]。近年来, 随着城镇化的推进, 越来越多的人口入住到威宁县城, 使得草海面临严峻的环境压力^[7]。1980s至今, 人为活动(过量使用农业化肥及排放工业生活废水)的加剧^[8], 已经严重阻碍了草海水生植物的生长繁衍, 靠近威宁县城的沿岸带, 水生植物的生物量明显减少, 耐

污种成为草海优势物种, 而且外来入侵物种空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*) 在草海广泛分布。因此, 开展贵州草海水生植物多样性调查、研究和保护的工作迫在眉睫。

国内外专家对草海水生植物的研究始于1980s^[9], 主要集中在调查水生植物物种、优势种群及分布等方面, 对草海水生植被长期演变趋势少有研究。本文通过现场调查, 结合已有的历史资料, 研究草海水生植物多样性的现状及其长期动态演变特征, 分析草海水生植物群落演替规律和驱动因子, 为草海水生态系统修复和生物多样性保护提供科学合理的参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

贵州草海高原湿地位于云贵高原中部, 坐落在贵州省威宁彝族回族苗族自治县县城西南侧, 平均海拔2171.7 m, 属湿地生态类型的国家级自然保护区^[10]。气候类型为亚热带季风气候, 年平均气温10.5℃, 年平均日照时数为1805.4h, 平均降雨量为

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2020-02-28

基金项目: 贵州省林业科研课题(黔林科合[2015]14号); 贵州科学院青年基金(黔科院J字[2018]24号)资助 [Supported by Forestry Research Project of Guizhou Province ([2015]14); Youth Fund of Guizhou Academy of Sciences (J[2018]24)]

作者简介: 代亮亮(1991—), 男, 硕士; 研究方向为藻类环境生物学。E-mail: 1441712390@qq.com

通信作者: 袁果(1969—), 男, 硕士; 研究方向为湿地生态学。E-mail: 875932286@qq.com

950.9 mm, 降雨主要集中于夏季, 是贵州境内降雨量最少的地区。草海具有完整的高原湿地生态系统, 其生态系统的脆弱性、典型性、重要性和生物多样性是我国为数不多的亚热带高原湿地生态系统的代表, 是我国特有高原鹤类——黑颈鹤重要的越冬地之一, 每年来此越冬的黑颈鹤、灰鹤、斑头雁和赤麻鸭等鸟类约10万余只, 因而被列为我国Ⅰ级重要湿地^[11]。草海属于长江水系, 是金沙江支流横江洛泽河的上源湖泊, 其水源补给主要靠自然降雨, 湖泊水文明显受到受季节性降水的影响, 丰水期水位可达2172.0 m, 相应水域面积为26.05 km²; 枯水期水位降至2171.2 m, 相应水域面积为15.0 km²^[9]。

1.2 样品采集与测量

2016年8月对草海全湖的水生植物进行采样调查, 根据草海水域环境和水生植物类型及分布特征, 采样点的设置遵循随机和均匀两者兼顾的原则, 全湖共设置12个采样点(图1)。

2016年8月对草海水生植物进行采样调查, 调查内容包括水生植物种类、多度、盖度、生物量、优势种、群落结构组成及优势群落等。对于湖面水位较深的采样点, 用50 cm×50 cm采草器随机打草3次, 将水生植物尽可能连根拔起, 除去枯枝死叶并及时冲洗干净进行分类处理; 对于岸带水位较浅的采样点, 在每个采样点随机设置6个1 m×1 m

的样方, 将植物连根拔起, 洗净去除污泥。分别记录各水生植物的湿重, 取部分水生植物的子样品, 烘干至恒重, 计算水生植物的干重, 以干重代表生物量, 而后计算单位面积生物量^[12]。

每个样点同时采集足量水样, 用于各项理化指标的分析, 各项理化指标的测定采用标准方法^[13], 草海湿地的主要环境参数见表1。

1.3 水生植物群落多样性研究

群丛的命名采用优势种原则, 即以各群丛优势种名称作为该群丛的名称。优势种的确定采用重要值方法, 其中重要值=(相对频度+相对盖度+相对多度)/3, 多度、盖度用目测法。同一层次的优势种之间用“+”连接, 不同层次的优势种之间用“-”连接^[5]。

1.4 图形处理

柱形图的处理利用Excel完成, RDA分析利用CANOCO 4.5软件完成。

2 结果

2.1 不同时期草海水生植物主要优势种的变化

据1983年的调查资料显示^[9], 草海共有水生植物37种, 分属于20科26属。1983年以来草海水生植物科、属、种数量变化状况如图2所示。属、种数量及分布均以单子叶植物占优势, 常见的为眼子菜科的光叶眼子菜(*Potamogeton lucens*)、穿叶眼子菜(*Potamogeton perfoliatus*)、篦齿眼子菜(*Potamo-*



图1 草海湿地采样点的分布

Fig. 1 Distribution of research sites in Caohai Wetland

表 1 草海湿地的主要环境参数

Tab. 1 Main environmental factors of Caohai Wetland

环境因子Environment factor	最小值Minimum	最大值Maximum	均值Mean
温度T (°C)	16.30	16.90	16.60
溶解氧DO (mg/L)	6.45	7.74	7.06
电导率Cond (μS/cm)	133.0	299.0	227.3
酸碱度pH	8.85	9.34	9.09
溶解性总固体TDS (mg/L)	97.50	224.25	161.47
氧化还原电位ORP (mV)	-26.80	58.40	22.38
盐度Sal	0.07	0.17	0.12
浊度Turbidity (NTU)	2.17	12.61	6.17
叶绿素a Chl.a (μg/L)	2.03	13.93	6.06
高锰酸盐指数COD _{Mn} (mg/L)	4.97	7.97	6.73
总氮TN (mg/L)	0.378	1.772	0.933
总磷TP (mg/L)	0.039	0.086	0.058
可溶性总氮DTN (mg/L)	0.340	1.369	0.787
可溶性总磷DTP (mg/L)	0.002	0.053	0.027
氨氮NH ₃ -N (mg/L)	0.069	0.370	0.256
硝态氮NO ₃ -N (mg/L)	0.172	0.432	0.319

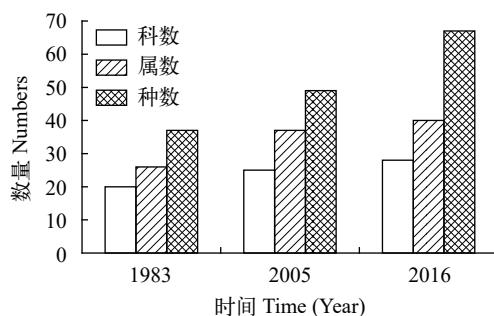


图 2 1983年以来草海水生植物科、属、种数量变化

Fig. 2 Numbers of families, genera and species of aquatic plants in Caohai wetland in 1983, 2005 and 2016

geton pectinatus)、菹草(*Potamogeton crispus*)、竹叶眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)、水鳖科的海菜花(*Ottelia acuminata*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、茨藻科的茨藻(*Najas marina*)、泽泻科的泽泻(*Alisma orientale*)、禾本科的李氏禾(*Leersia hexandra*)、莎草科的水葱(*Scirpus validus*)、蘆草(*Scirpus triqueter*); 双子叶植物主要有蓼科的两栖蓼(*Polygonum amphibium*)、金鱼藻科的金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、菱科的耳菱(*Trapa potaninii*)、小二仙草科的狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、荇菜科的荇菜(*Nymphoides peltatum*)、狸藻科的黄花狸藻(*Utricularia aurea*)等; 蕨类植物仅有蘋(*Marsilea quadrifolia*)和节节草(*Equisetum ra-*

mosissimum)两种。

2005年调查研究发现^[14], 草海水生植物共49种, 隶属25科37属。种类数量及分布以单子叶植物占优势, 常见种有眼子菜科的竹叶眼子菜、光叶眼子菜、微齿眼子菜、穿叶眼子菜、篳齿眼子菜, 茨藻科的茨藻, 泽泻科的泽泻、慈姑(*Sagittaria sagittifolia*)、水鳖科的黑藻、海菜花, 禾本科的菰(*Zizania latifolia*)、李氏禾, 莎草科的水葱、蘆草、水莎草(*Juncellus serotinus*)、浮萍科的紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、浮萍(*Lemna minor*); 双子叶植物主要有金鱼藻科的金鱼藻, 菱科的耳菱, 小二仙草科的狐尾藻, 蓼科的两栖蓼、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、苋科的空心莲子草, 伞形科的水芹(*Oenanthe javanica*)、荇菜科的荇菜, 豆科的车轴草(*Trifolium repens*)、马鞭草科的马鞭草(*Verbena officinalis*)、菊科的小蓬草(*Conyza canadensis*)、小鱼眼草(*Dichrocephala benthamii*)、马兰(*Kalimeris indica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)。蕨类植物有蘋、满江红(*Azolla imbricata*)和节节草3种。

2016年调查发现草海水生植物物种多样性较高, 共计28科40属67种。其中挺水植物18科42种, 漂浮、浮叶植物6科7种, 沉水植物4科18种。挺水植物以芦苇(*Phragmites australis*)、菰、水葱、水烛(*Typha angustifolia*)、蘆草、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、荆三棱(*Scirpus yagara*)占优势; 浮叶植物以荇菜、两栖蓼、细果野菱(*Trapa maximowiczii*)占优势; 漂浮植物以满江红、浮萍、紫萍占优势; 沉水植物以金鱼藻、光叶眼子菜、穿叶眼子菜、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、篳齿眼子菜、海菜花等为代表。1983年以来草海各生活型水生植物种类数量变化状况如表2所示。

2.2 不同时期草海水生植被群落类型及优势群落的变化

据资料记载^[9], 1983年草海水生植物群落类型有3大类, 14个群落。其中4个挺水植物群落, 主要是水葱群落(*S. validus* association)、蘆草群落(*S. triqueter* association)、水莎草群落(*J. serotinus* association)、李氏禾群落(*L. hexandra* association); 2个浮叶植物群落, 主要是荇菜群落(*N. peltatum* association)、两栖蓼群落(*P. amphibium* association); 8个沉水植物群落, 主要是金鱼藻群落(*C. demersum* association)、光叶眼子菜群落(*P. lucens* association)、穿叶眼子菜群落(*P. perfoliatus* association)、菹草群落(*P. crispus* association)、狐尾藻群落(*M. verticillatum* association)、茨藻群落(*N. marina* as-

sociation)、海菜花群落(*O. acuminata* association)、轮藻群落(*Chara* sp. association)。

2005年调查发现草海水生植物群落有4大类, 9个群落^[14]。其中4个挺水植物群落, 主要是水葱群落、蔗草群落、水莎草群落、空心莲子草群落(*A. philoxeroides* association); 1个浮叶植物群落, 主要是两栖蓼群落; 1个漂浮植物群落, 主要是紫萍+浮萍群落(*S. polyrrhiza* + *L. minor* association); 3个沉水植物群落, 主要是竹叶眼子菜群落(*P. malaianus* association)、狐尾藻群落、球状轮藻+钝节拟丽藻群落(*Chara globularis* + *Nitellopsis obtusa* association)。

2016年实地调查发现草海共有水生植物群落22个。分为4大类, 其中, 挺水植物群落9个, 为芦苇群落(*P. australis* association)、李氏禾群落、水葱群落、蔗草群落、菰群落(*Z. latifolia* association)、水烛群落(*T. angustifolia* association)、水葱+荆三棱群落(*S. validus* + *S. yagara* association)、水葱+两栖蓼+空心莲子草群落(*S. validus* + *P. amphibium* + *A. philoxeroides* association)、水莎草+灯心草群落(*J. serotinus* association+*Juncus* sp. association); 浮叶植物群落4个, 为两栖蓼群落、苔菜群落、眼子菜群落(*P. distinctus* association)、苔菜+水葱+金鱼藻群落(*N. peltatum*+ *S. validus*+ *C. demersum* association)等; 漂浮植物群落1个, 为满江红+紫萍+浮萍群落(*A. imbricata* + *S. polyrrhiza* + *L. minor* association); 沉水植物群落8个, 为金鱼藻群落、微齿眼子菜群落(*P. maackianus* association)、光叶眼子菜群落、篦齿眼子菜群落(*P. pectinatus* association)、海菜花群落、黄花狸藻群落(*U. aurea* association)、光叶眼子菜+穗状狐尾藻+篦齿眼子菜群落(*P. lucens* + *M. spicatum* + *P. pectinatus* association)、穿叶眼子菜+黑藻+小茨藻群落(*P. perfoliatus* + *H. verticillata* + *N. minor* association)。1983年以来草海水生植被群落类型变化如表3所示。

2.3 草海水生植物群落的时空演替

在1983年的采样调查中^[9], 各生活型水生植物

生物量占总重量之比为: 挺水植物占17.18%, 浮叶植物占3.82%, 漂浮植物占2.11%, 沉水植物占76.89%; 2005年的调查结果显示, 挺水植物仅占7.34%, 漂浮植物占2.44%, 沉水植物占90.22%; 2016年的调查研究表明, 挺水植物占8.56%, 漂浮植物占1.87%, 浮叶植物占2.08%, 沉水植物占87.49%。

由表2可知, 与1983年相比, 2005年草海分布的物种数量增加^[14], 但增加的种类多数为挺水植物, 大部分为两栖、湿中生或中生的植物种类, 水葱、蔗草等在1983年调查时生物量较大的挺水植物群落, 主要分布于水体的东部、东北部及东南部, 其余湖缘及滩涂仅有零星分布, 而竹叶眼子菜和狐尾藻则广泛分布于草海各处水域, 其变化结果是2005年比1983年挺水植物减少了9.84%, 漂浮植物增加了13.33%。此外, 在2005年8月的调查中, 发现水生植物群落数量降低, 仅有4大类, 9个群落, 外来恶性杂草-空心莲子草在草海已形成入侵趋势; 在样方中未发现莎草科的荆三棱和狸藻科的黄花狸藻。由于人为活动过度干扰, 菹草和国家红皮书记载的珍稀濒危植物海菜花在草海的种群数量也越来越少, 水葱、蔗草等挺水植物的种群数量在草海湖缘急剧减少(表3)。

2016年的调查研究表明, 草海水生植物群落数量增加, 水生植物群落得到了一定恢复, 共有4大类, 22个群落。与1983年和2005年的调查研究结果相比, 新增了13个水生植物群落。芦苇群落最早发现于2011年, 其来源为人为引种, 现已广泛分布于草海浅水区和周边潮湿的农地及水沟。菰群落主要分布于草海东北部和北岸等周边淤泥较厚、水体呈富营养化的区域。水烛群落最早发现于2011年, 当前该群落分布于草海东北部、中部、西部等人类活动频繁区域。水葱+荆三棱群落和水葱+两栖蓼+空心莲子草群落主要分布于草海东北部, 该区域水体呈富营养化状态, 水体发黑。水莎草+灯心草群落主要分布于草海刘家巷子至大中河入湖口区域, 属草甸类型, 为黑颈鹤等主要的觅食地与夜

表2 1983年以来草海各生活型水生植物种类数量变化

Tab. 2 Numbers of each life forms aquatic plants in Caohai wetland from 1983 to 2016

种类Types	1983年Year 1983		2005年Year 2005		2016年Year 2016	
	种数	所占比例(%)	种数	所占比例(%)	种数	所占比例(%)
沉水植物Submerged vegetation	14	37.84	14	28.57	18	26.87
浮叶植物Floating-leaf vegetation	3	8.11	3	6.12	3	4.48
漂浮植物Floating vegetation	1	2.70	3	6.12	4	5.97
挺水植物Emergent vegetation	19	51.35	29	59.19	42	62.68
合计Total amount	37	100	49	100	67	100

表 3 草海水生植物群落类型及演替动态

Tab. 3 Community types and variation of aquatic plants in Caohai Wetland

群落类型Coenotype	1983年 Year 1983	2005年 Year 2005	2016年 Year 2016
挺水植物群落Emergent vegetation association			
水葱群落 <i>S. validus</i> association	√	√	√
蘆草群落 <i>S. triqueter</i> association	√	√	√
水莎草群落 <i>J. serotinus</i> association	√	√	
李氏禾群落 <i>L. hexandra</i> association	√		√
空心莲子草群落 <i>A. philoxeroides</i> association		√	
芦苇群落 <i>P. australis</i> association			√
菰群落 <i>Z. latifolia</i> association			√
水烛群落 <i>T. angustifolia</i> association			√
水葱+荆三棱群落 <i>S. validus</i> + <i>S. yagara</i> association			√
水葱+两栖蓼+空心莲子草群落 <i>S. validus</i> + <i>P. amphibium</i> + <i>A. philoxeroides</i> association			√
水莎草+灯心草群落 <i>J. serotinus</i> association+ <i>Juncus</i> sp. association			√
沉水植物群落Submerged vegetation association			
金鱼藻群落 <i>C. demersum</i> association	√		√
光叶眼子菜群落 <i>P. lucens</i> association	√		√
穿叶眼子菜群落 <i>P. perfoliatus</i> association	√		
菹草群落 <i>P. crispus</i> association	√		
狐尾藻群落 <i>M. verticillatum</i> association	√	√	
茨藻群落 <i>N. marina</i> association	√		
微齿眼子菜群落 <i>P. maackianus</i> association			√
竹叶眼子菜群落 <i>P. malaianus</i> association		√	
篳齿眼子菜群落 <i>P. pectinatus</i> association			√
黄花狸藻群落 <i>U. aurea</i> association			√
海菜花群落 <i>O. acuminata</i> association	√		√
轮藻群落 <i>Chara</i> sp. association	√		
球状轮藻+钝节拟丽藻群落 <i>Chara globularis</i> + <i>Nitellopsis obtusa</i> association		√	
光叶眼子菜+穗状狐尾藻+篳齿眼子菜群落 <i>P. lucens</i> + <i>M. spicatum</i> + <i>P. pectinatus</i> association			√
穿叶眼子菜+黑藻+小茨藻群落 <i>P. perfoliatus</i> + <i>H. verticillata</i> + <i>N. minor</i> association			√
浮叶植物群落Floating-leaf vegetation association			
荇菜群落 <i>N. peltatum</i> association	√		√
两栖蓼群落 <i>P. amphibium</i> association	√	√	√
眼子菜群落 <i>P. distinctus</i> association			√
荇菜+水葱+金鱼藻群落 <i>N. peltatum</i> + <i>S. validus</i> + <i>C. demersum</i> association			√
漂浮植物群落Floating vegetation association			
紫萍+浮萍群落 <i>S. polyrrhiza</i> + <i>L. minor</i> association		√	
满江红+紫萍+浮萍群落 <i>A. imbricata</i> + <i>S. polyrrhiza</i> + <i>L. minor</i> association			√

栖地之一,当前随着草海水位提升,该群落分布区正逐步被芦苇群落所取代。微齿眼子菜群落广布于草海水质较好的区域,优势种群主要分布于草海西部保落山至阳关山之间。篳齿眼子菜群落主要分布于草海中部大中河区域。黄花狸藻群落主要分布于草海刘家巷子周边静水区域或沟塘环境。光叶眼子菜+穗状狐尾藻+篳齿眼子菜群落和穿叶眼子菜+黑藻+小茨藻群落主要分布于草海中部、西部水质较好的区域。眼子菜群落主要分布于草海周边静水区域或沟塘环境。荇菜+水葱+金鱼藻群落和满江红+紫萍+浮萍群落分布于草海东北部水体富营养化区域(表 3)。

2.4 草海水生植物生物量的变化

据1983年、2005年和2016年的调查研究表明(表 4),近30多年以来,草海水生植物生物量呈逐渐上升的趋势。与1983年相比,2016年的调查结果显示,草海水生植物的生物量增长了近3倍。

2.5 沉水植物与环境因子的冗余分析

利用CANOCO 4.5软件对2016年草海沉水植物(盖度和生物量)和环境数据进行主成分分析(PCA)的结果表明,第1轴梯度长度为0.073,特征值为0.004,因此选用RDA方法探究草海沉水植物(盖度和生物量)与环境因子之间的关系。RDA分析结果显示(图 3),5、11、12号样点受营养盐(TN、TP、DTN、DTP、NH₃-N、NO₃-N)、TDS和Sal影响较大,这些样点主要分布在靠近威宁县城的沿岸带,浮游植物的Chl.a浓度比较高,营养盐、TDS、Sal与浮游植物的Chl.a浓度呈正相关,与沉水植物的生物量和盖度呈负相关。

3 讨论

3.1 草海水生植物种类变化

1983年至今的30余年间,草海水生植物在科、属、种水平上,均呈上升的趋势。新增的满江红、空心莲子草、黑三棱、水烛、芦苇及浮萍等水生植物,具有耐污染、环境适应性强,繁殖方式多样、生长迅速的生理特点,易形成优势群落,且有扩张泛滥的趋势^[15-17]。以满江红为例,常与蓝藻门中的鱼腥藻(*Anabaena azotica*)共生^[18,19],能在富营养化水体中大面积聚集、繁殖扩张,形成泛滥态势,对水质造成污染,破坏水环境生态平衡。水域生态环境的破坏导致过去在草海水域广泛分布的海菜花,当前仅为零星分布,难以形成较大群落,浮叶植物细果野菱几乎绝迹。草海作为相对封闭的内陆淡水湖泊生态系统,每一个物种或群落的减少与消失,与该物种或群落对生态系统变化的生理响应相

关。而物种的增加,与鸟类迁徙和人类活动等行为密切相关。

3.2 草海水生植被优势物种、优势群落的变化及群落演替

与1983年、2005年相比,2016年草海水生植物在物种种类数量及优势种上有很大的变化。其中水莎草群落、穿叶眼子菜群落、菹草群落、狐尾藻群落、茨藻群落和轮藻群落在1983年是主要的水生植物群落,但是在2016年的调查中仅为零星分布。与1983年、2005年相比,2016年新增的水生植物群落有芦苇群落、菰群落、水烛群落、水葱+荆三棱群落、水葱+两栖蓼+空心莲子草群落、水莎草+灯心草群落、微齿眼子菜群落、篳齿眼子菜群落、黄花狸藻群落、光叶眼子菜+穗状狐尾藻+篳齿眼子菜群落、穿叶眼子菜+黑藻+小茨藻群落、眼子菜群落、荇菜+水葱+金鱼藻群落、满江红+紫萍+浮萍群落。历史资料表明,1983年草海挺水植物群落分布主要为水葱群落、菹草群落、荆三棱

群落、水莎草群落。当前,挺水植物群落主要为芦苇群落、李氏禾群落、水葱群落、水烛群落,挺水植物主要群落已由过去的莎草类型演变为禾本类型。

草海挺水植物群落生态位结构发生改变的原因主要是局部湖床淤积抬升,这为芦苇、水烛等大型挺水植物的扩张提供了基本条件,另外,人类活动也为芦苇、水烛等挺水植物提供了传播途径,使得种群得以迅速扩张,以芦苇为例,2004年前后仅在草海周边农地水沟有零星分布,2012年在草海东部中河已形成近2000 m²的优势群落^[20]。其次,草海水位提升后,弃耕地面积增加,芦苇在无人清除的状态下迅速扩张,而水葱、菹草及水莎草等群落在水位提升的情况下种群逐渐萎缩。此外,由于人类活动(耕作、放牧等)的减少,骨顶鸡、斑嘴鸭等夏候鸟、留鸟的种群和栖息地得以扩大,在春季会大量摄食莎草科等植物萌发的嫩茎,致使莎草科植物减少。

3.3 环境因子对草海水生植物生物量的影响

由于草海国家级自然保护区的建立及水体中相对充足的营养盐含量,草海水生植物生物量30多年来呈上升趋势,2016年的生物量是1983年的4.1倍。但过高的营养盐会使湖泊由草型湖泊转变为藻型湖泊^[21],草海湿地各采样点沉水植物与主要环境因子的RDA分析结果显示,靠近县城的5、11、12号采样点主要受营养盐、总溶解固体、浊度的影响,营养盐是导致威宁县城沿岸带藻类浓度较高,沉水植物生物量和盖度较低的主要原因。

3.4 草海面临的生态问题及水生态环境修复的几点建议

草海当前面临的生态问题有:(1)水土流失,水

表 4 1983年以来草海水生植物生物量(干重)的变化

Tab. 4 Biomass (dry weight) of aquatic plants in Caohai wetland from 1983 to 2016 (g/m²)

区域Section	1983年9月 September of 1983	2005年8月 August of 2005	2016年8月 August of 2016
草海东部East of Caohai wetland	126.4	453.2	634.9
草海中部Middle of Caohai wetland	100.6	92.0	257.4
草海西部West of Caohai wetland	106.3	113.1	478.5
平均值Mean	111.1	219.4	457.0

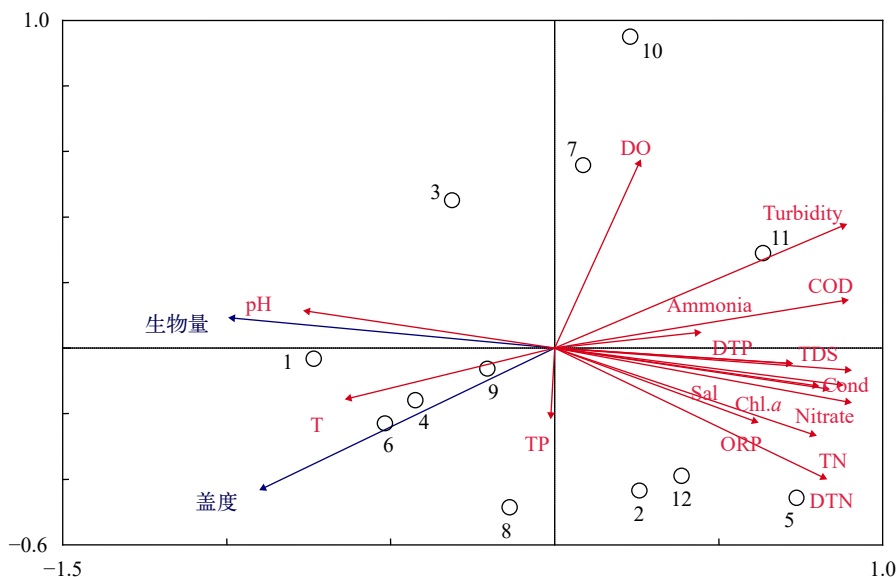


图 3 沉水植物与环境因子的冗余分析(RDA)排序图

Fig. 3 Relationship between submerged plants and environmental factors with redundancy analysis

域面积萎缩^[22]。草海周边以村落及耕地为主, 植被覆盖率低, 大量泥沙在雨季会直接流入草海, 导致湖河口区域淤沙严重, 每年因水土流失导致的淤积量高达 $(6.37-11.43) \times 10^7$ kg。(2)水体污染加重。2001年, 草海有80%的水体能达到地表水Ⅰ类标准^[23]。但2014—2015年, 草海水质处于地表水环境Ⅲ—Ⅴ类的水平^[24]。(3)农村面源污染严重。草海周边有14个行政村, 总人口35373人, 耕地总面积1076 hm²。农村每年排入草海的污染物COD、TN和TP分别为 1594×10^3 kg、 352×10^3 kg和 13×10^3 kg^[23]。(4)外来物种入侵, 生态系统脆弱。空心莲子草在草海环湖消涨区、航道、码头等地已形成入侵趋势, 部分区域空心莲子草的种群密度可达70株/m²^[25]。

针对草海当前面临的诸多环境问题, 建议当地政府要着重控制湖水污染物的总排放量, 同时结合其他相关修复措施, 保护草海水生态环境。首先, 以乔木、灌丛、草本结构, 持续对草海上游周边山体植被绿化, 防治水土流失; 其次, 尽快完成草海各入湖河口的生态湿地建设, 拦截来自上游区域的泥沙及污染物; 第三, 对草海入湖污染物进行控制与削减, 最大限度解除草海湿地的各项胁迫因子; 第四, 持续开展草海水生植物种类、群落结构变化和对外来入侵物种的定期监测, 及时清除外来入侵物种。

参考文献:

- [1] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, *et al.* Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands [J]. *Water Research*, 1986, **20**(3): 363-368.
- [2] Duarte C M. Nutrient concentration of aquatic plants: Patterns across species [J]. *Limnology & Oceanography*, 1992, **37**(4): 882-889.
- [3] Santamar A L. Why are most aquatic plants widely distributed? Dispersal, clonal growth and small-scale heterogeneity in a stressful environment [J]. *Acta Oecologica*, 2002, **23**(3): 137-154.
- [4] Boon P I, Bunn S E. Variations in the stable isotope composition of aquatic plants and their implications for food web analysis [J]. *Aquatic Botany*, 1994, **48**(2): 99-108.
- [5] Hao M X, Yang L, Kong X H, *et al.* Diversity and community succession of macrophytes in Lake Changhu, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(1): 94-102. [郝孟曦, 杨磊, 孔祥虹, 等. 湖北长湖水生植物多样性及群落演替 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(1): 94-102.]
- [6] Zhang Z M, Lin S X, Zhang Q H, *et al.* Distribution pattern of the heavy metals and its pollution load in Caohai wetland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(2): 279-284. [张珍明, 林绍霞, 张清海, 等. 草海湖湿地重金属分布特征及污染负荷 [J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(2): 279-284.]
- [7] Pan H, Tang Y H. Pollution indicator species and evaluation of water quality in Caohai lake of weining [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(2): 230-234. [潘鸿, 唐宇宏. 威宁草海浮游植物污染指示种及水质评价 [J]. *湿地科学*, 2016, **14**(2): 230-234.]
- [8] Ouyang Y, Lin C H, He T B, *et al.* Study on phytoremediation of eutrophication in Caohai lake of Guizhou [J]. *Guizhou Science*, 2011, **29**(6): 21-25. [欧阳勇, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州草海水体富营养化的植物修复研究 [J]. *贵州科学*, 2011, **29**(6): 21-25.]
- [9] Guizhou Institute of Biology. Scientific Survey Reports on the Lake Caohai Guizhou China [M]. Guiyang: Guizhou People's Press, 1986: 134-148. [贵州省生物研究所. 草海科学考察报告 [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986: 134-148.]
- [10] Cai G J, Zhou C, Lin Y H, *et al.* Zooplankton community structure and water quality assessment of Caohai plateau wetland, Guizhou Province, China [J]. *Ecology and Environment*, 2016, **25**(2): 279-285. [蔡国俊, 周晨, 林艳红, 等. 贵州草海高原湿地浮游动物群落结构与水质评价 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(2): 279-285.]
- [11] Xu T, Xu Y, Jiang B, *et al.* Evaluation of the ecosystem services in Caohai wetland, Guizhou province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(13): 4295-4303. [徐婷, 徐跃, 江波, 等. 贵州草海湿地生态系统服务价值评估 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(13): 4295-4303.]
- [12] Tian C C, Guo C B, Wu X Q. Distribution of submerged plants and its relationship with environment factors in Gaoyou lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 423-430. [田翠翠, 郭传波, 吴幸强. 高邮湖沉水植物分布格局及其与水环境因子的关系 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(2): 423-430.]
- [13] China's State Environmental Protection Administration. Methods for Monitoring and Analyzing Water and Wastewater, Fourth edition [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-281. [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法, 第4版 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-281.]
- [14] Zhang H H, Li M J, Yao S L. Caohai Research [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2007: 141-152. [张华海, 李明晶, 姚松林. 草海研究 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007: 141-152.]
- [15] Sainty G, Mccorkelle G, Julien M. Control and spread of Alligator Weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., in Australia: lessons for other regions [J]. *Wetlands Ecology & Management*, 1997, **5**(3): 195-201.
- [16] Chambers R M, Meyerson L A, Saltonstall K. Expansion of *Phragmites australis* into tidal wetlands of North America [J]. *Aquatic Botany*, 1999, **64**(3-4): 261-273.
- [17] Jarchow M E, Cook B J. Allelopathy as a mechanism for the invasion of *Typha angustifolia* [J]. *Plant Ecology*, 2009, **204**(1): 113-124.

- [18] Dai L P, Xiong Z T, Ma H H. Effects of cadmium on nitrogen metabolism in *Azolla imbricata*-*Anabaena azollae* symbiosis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(3): 1629-1635. [戴灵鹏, 熊治廷, 马海虎. 镉对满江红(*Azolla imbricata*)-鱼腥藻(*Anabaena azollae*)共生体氮代谢的影响 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(3): 1629-1635.]
- [19] Zhan L, Ma H H, Nan X, *et al.* Effects of Cd stress on nitrogen supply ability of *Azolla imbricata*-*Anabaena azollae* symbiosis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 613-618.
- [20] Liu W, Li H, Zhang Y W, *et al.* Distribution status and change in recent 30 years of aquatic vascular plants in Caohai of Guizhou [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, **54**(23): 5872-5876. [刘文, 李宏, 张玉武, 等. 贵州草海水生维管束植物分布现状及近30年变化特征研究 [J]. *湖北农业科学*, 2015, **54**(23): 5872-5876.]
- [21] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, *et al.* Catastrophic shifts in ecosystems [J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 591-596.
- [22] Qi J W, Li K M, Li Y C, *et al.* Restoration strategies of Caohai wetland in Guizhou Province [J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2012, **31**(2): 39-40. [齐建文, 李矿明, 黎育成, 等. 贵州草海湿地现状与生态恢复对策 [J]. *中南林业调查规划*, 2012, **31**(2): 39-40.]
- [23] Xu S, Gao Y. Study on sustainable utilization of Caohai Lake Wetland based on analysis of current situation of water pollution [J]. *Environmental Science Survey*, 2009, **28**(5): 33-36. [徐松, 高英. 草海湖泊湿地水环境污染现状及可持续利用研究 [J]. *环境科学导刊*, 2009, **28**(5): 33-36.]
- [24] Zhou C, Yu L F, Cai G J, *et al.* Spatial-temporal variation of water quality in Caohai lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(1): 24-30. [周晨, 喻理飞, 蔡国俊, 等. 草海高原湿地湖泊水质时空变化及水质分区研究 [J]. *水生态学杂志*, 2016, **37**(1): 24-30.]
- [25] Zhang J L, Cai G J, Wu D, *et al.* The plant community structure and quantitative features after the invasion of *Alternanthera philoxeroides* in Caohai wetland of Guizhou Province [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(5): 827-833. [张健利, 蔡国俊, 吴迪, 等. 贵州草海湿地空心莲子草入侵迹地植物群落结构数量特征 [J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(5): 827-833.]

AQUATIC PLANT DIVERSITY AND COMMUNITY SUCCESSION IN CAOHAİ WETLAND, GUIZHOU PROVINCE

DAI Liang-Liang¹, CHEN Xiang¹, LI Li-Jie², LIU Chang-Hong¹ and YUAN Guo¹

(1. Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550000, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: The current study explored the distribution of aquatic vegetation, species diversity, community characteristics and succession features of Caohai wetland based on previous results and recently obtained data, and analyzed the primary driving factors of community succession. Results showed that there were 67 species of aquatic plants, which belong to 40 genera and 28 families, and 22 dominant plant association in Caohai wetland in 2016. Compared with results of 1983, both dominant species and preponderant associations changed dramatically. The dominant aquatic plant associations have gradually changed from sedge family to grass family. The alien species *Alternanthera philoxeroides* in the Caohai wetland has formed an invasion trend in the water fluctuation belt, waterway and wharf, and its population density can reach 70 plants/m² in some regions. The total biomass of aquatic plants of each life in Caohai wetland has increased in the past 30 years, and in 2016 it was 4.1 times that of 1983. Relevant data indicate that human activity, bird migration, water and soil loss, eutrophication, and alien species invasion have influenced the biodiversity and community succession of Caohai wetland.

Key words: Diversity; Community structure; Caohai wetland; Aquatic macrophytes; Succession