

张 飞,唐 杰,马 炯,等.太湖流域浮萍种质资源及其生长水环境调查[J].江苏农业科学,2016,44(1):336-340.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.099

太湖流域浮萍种质资源及其生长水环境调查

张 飞,唐 杰,马 炯,成家杨

(北京大学深圳研究生院环境与能源学院,广东深圳 518055)

摘要:对太湖流域多个县(市)浮萍分布情况进行调查,观测各地浮萍种类及其生长水体的水质状况,探讨水体 pH 值、铵态氮、硝态氮、总氮、总磷含量及其与浮萍分布的关系。调查结果表明,浮萍适宜生长在静止的水体中,流动的河流中较为少见。太湖流域采集到 3 属 5 种浮萍,分别为 *Spirodela polyrrhiza*、*Lemna minor*、*Lemna turionifera*、*Lemna aequinoctialis*、*Landoltia punctata*。其中,紫萍属(*Spirodela* genera)和青萍属(*Lemna* genera)分别占到 49% 和 37%,为该地区主要的浮萍种类。少根紫萍适宜在中性的环境中生长,而紫萍适宜生长在偏碱性的水体中;相对而言,青萍生长的 pH 范围更广,在 pH 值 6.34~8.78 均有分布。太湖流域浮萍生长水环境中氮、磷含量范围较广,铵态氮、硝态氮、总氮和总磷质量浓度范围分别为 0.28~19.67、0.01~5.18、0.10~24.62、0.03~2.45 mg/L。尚未发现自然环境中浮萍的分布与水体氮、磷含量间的必然联系。调查还发现,太湖流域浮萍淀粉含量在 10.95%~23.27% 之间,均值为 15.95%。在太湖流域水生植物修复过程中,可优先考虑利用当地优势浮萍品种及不同品种浮萍的共生复合系统,构建浮萍塘生态系统,来去除水体中的氮、磷等营养物质。

关键词:浮萍;水环境;氮;磷;淀粉

中图分类号: S917.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)01-0336-04

随着化石燃料等常规能源的日趋匮乏和生态环境负荷日益加大,以及经济发展的迫切需求,世界各国相继把可再生能源的发展作为实现经济可持续发展的重要能源政策^[1]。生物质能由于原料来源广泛、清洁低碳等特点获得了广泛的关注,被誉为继煤炭、石油、天然气之外的“第四大能源”。其中,浮萍由于不与人争粮争地、生长速度快、高淀粉等优点,作为新一代生物能源原料而被广泛关注。

浮萍科(Lemnaceae)植物,简称浮萍,共有 5 属(*Lemna*、*Spirodela*、*Landoltia*、*Wolffia*、*Wolffiella*),约 40 个种^[2],世界各地均有分布。我国有 5 属 7 种,广泛分布于南北各省^[3]。浮萍是最小的开花植物和被子植物,开花与否取决于营养状况、光周期和生长阶段^[4],浮萍的增殖方式为无性繁殖,生长速度快,在适宜环境条件下,每 16~24 h 其生物量翻 1 番^[5],适应性强,2~35℃ 下均能生存^[6]。

浮萍由于增殖快,易收获,蛋白质含量高,可达到干质量的 15%~45%^[7],而且对环境的适应性较好,对水体中氮、磷的去除能力强,加上植物修复过程投资少、能耗低等优点^[8],已被美国环保局推荐为氮磷污水净化修复处理资源化回收利用的最佳革新技术^[9-10]。有研究表明,浮萍对 TKN(凯氏氮)和 TP(总磷)的去除率可达 74%~77%,对 BOD(生化耗氧量)去除率达 95%~99%,对 COD(化学需氧量)的去除率为 50%~70%,虽低于藻类稳定塘,但可以有效抑制藻类生

长^[9]。而且,浮萍富含淀粉,最高可达 75%^[11],是用于燃料乙醇生产的新型淀粉质原料,可直接用于能源生产,将环境治理与能源生产有效结合起来。Chen 等尝试利用浮萍中的淀粉发酵产出乙醇,产率为 25.8%(干质量)^[12]。

太湖为中国第三大淡水湖,该地区气候光照条件适宜,比较有利于浮萍生长。但近年来太湖流域富营养化问题严重,威胁地区饮水安全和生态环境的稳定性。利用水生植物如浮萍治理该地区水体富营养化问题具有重大意义,值得探究。但目前对太湖流域自然环境中浮萍的品种资源和生长条件的调查及研究开展较少,限制了该地区浮萍资源在水体净化及能源化生产中的应用。

因此,本研究通过调查太湖流域周边地区的浮萍品种及其生长水环境,了解各地区浮萍分布情况与水环境状况,为利用当地浮萍资源修复污染水体及浮萍的能源化利用提供植物材料与实践依据,也可以进一步丰富太湖流域浮萍种质资源情况,为遗传学及其他研究提供材料基础。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

太湖流域位于中国东部沿海的长江三角洲地区,面积达 3.69 万 km²,横跨江、浙 2 省,北临无锡,南濒湖州,西依宜兴,东近苏州。太湖地处亚热带,气候温和湿润,属季风气候,年平均气温为 16.0~18.0℃,年降水量 1 100~1 150 mm。

1.2 浮萍采集及水环境测定

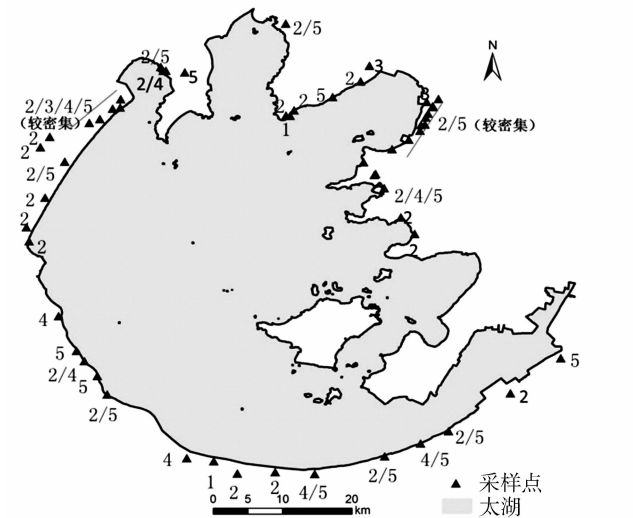
采样时间为 2013 年 7 月 10—14 日 08:00—19:00,平均温度 35℃。采样地点包括江苏的苏州、无锡、宜兴及浙江省的湖州等地,采样点分布情况如图 1 所示。在采样过程中也观察到个体较小的芜萍属和扁无根萍属浮萍,但考虑到其个体过小不利于打捞,故未对其进行研究。

收稿日期:2014-12-22

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项(编号:201305022);深圳市新兴产业重点项目(编号:JC201104210118A)。

作者简介:张 飞(1988—),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为生物能源工程。E-mail:zhangf0827@pku.edu.cn。

通信作者:成家杨,博士,教授,主要从事微藻生物燃料及浮萍的生物利用等研究工作。E-mail:chengjy@pkusz.edu.cn。



数字1、2、3、4、5分别对应*Lemna turionifera*、*Spirodela polyrhiza*、*Lemna minor*、*Landoltia punctata*、*Lemna aequinoctialis*,某个点有多个数字说明该点有多种浮萍共存
图1 太湖流域浮萍采样点分布

利用捞网捞取浮萍(携带少量水储于塑料袋中),并采用简易取水装置取表层水样储于塑料瓶中带回实验室测定,记录采样地点及具体 GPS 位置,现场测定水温、pH 值和溶解氧等指标。本次采样共 55 个采样点(图 1),采集 56 份水样和 78 份浮萍样品。

浮萍采回后,经过自来水清洗除去污垢和杂质后,用 0.5% NaClO 消毒 1 min,然后在 SH 培养基中培养、保存,用于浮萍分子鉴定和构建浮萍资源库。水样带回实验室,用 0.45 μm 滤膜过滤后,分析测定铵态氮(HJ 535—2009《水质、氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》)、硝态氮(紫外双波长分光光度法)、总氮(HJ 636—2012《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》)、总磷(GB 11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》)含量和 COD(快速密闭消解—分光光度法)。

1.3 浮萍鉴定及淀粉含量的测定

浮萍鉴定:用 DNA 条形码(DNA barcoding)技术对采集的浮萍株系进行分子鉴定,获得相应的种属信息。这部分内容在实验室之前的工作中已经完成^[13]。

浮萍淀粉含量测定:浮萍中淀粉含量采用酶解法测量^[14]。

1.4 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2010 软件进行数理统计分析,用 ArcGIS 10.0 软件绘制太湖流域采样点分布图。

2 结果与分析

2.1 太湖流域浮萍种属分布情况

实验室选取 *atpF* - *atpH*、*matK* 和 *rpoB* 3 个基因序列,用 DNA 条形码技术对采集的 78 份浮萍样品进行了分子鉴定,通过 Blast 比对及构建系统发育树,获得相应的种属信息(表 1)。

从表 1 可以看出,本次采样获得的 78 株浮萍覆盖 3 个属 5 个种,分别为 *Spirodela polyrhiza*、*Lemna turionifera*、*Lemna aequinoctialis*、*Lemna minor* 和 *Landoltia punctata*。结合图 1 采样

表 1 太湖流域浮萍种属分布情况

属名	种名	株数	百分比(%)
<i>Spirodela</i>	<i>Spirodela polyrhiza</i>	38	49
	<i>Landoltia</i>		
<i>Landoltia</i>	<i>Landoltia punctata</i>	11	14
	<i>Lemna minor</i>	3	
<i>Lemna</i>	<i>Lemna aequinoctialis</i>	24	37
	<i>Lemna turionifera</i>	2	

点分布情况可知,紫萍和青萍 2 属遍布整个太湖流域,分别占到 49% 和 37%,达到浮萍采样总数的 86%,为该地区的常见浮萍种,而少根紫萍在整个太湖流域零星分布。在利用浮萍对太湖水体进行富营养化修复控制时,应主要考虑这 2 种浮萍。另外,调查发现,浮萍易生长在浅水坑、静水坑、静止的河流中以及稻田附近,流动水体中较为少见。这可能是因为浮萍漂浮在水面上,容易被风吹散到别的地方,加上水体流动,浮萍更容易随水流飘走,进而停留在较少受风影响的河湾及稻田附近。可见浮萍分布与水体流动性之间存在一定的关系,值得进一步深入探讨。在浮萍用于水体富营养化修复时,应充分考虑这些潜在的影响因素。

从图 1 还可以看出,相比太湖流域各地均有分布的 *Lemna aequinoctialis* 而言,*Lemna minor* 和 *Lemna turionifera* 分别只在太湖北边和太湖南边有发现,两者仅占采集浮萍株数的 5%。这可能与南北水质条件及土地功能类型有关,北边农田分布较多,而南边湖州水流居多,少田地。整个来看,北边浮萍较密,多于南边,尤其是西北和东北角,这与该地区河流分布较多,且曲折多湖湾有关,此外,该地区多居民区,生活污水排放较多,利于浮萍生长,加上多为河湾地带,因而利于浮萍分布。

在调查中还发现自然环境中,紫萍、青萍和少根紫萍 3 种浮萍可以单独存在、两两存在或者三者共存,而且浮萍共生情况多出现在太湖北部地区,尤其是 *Spirodela polyrhiza*、*Lemna minor*、*Landoltia punctata*、*Lemna aequinoctialis* 多种浮萍共生,而南部较少出现,在利用浮萍进行富营养化修复时应考虑分布的差异及共生去除污染情况。周雄飞研究不同比例的稀脉浮萍和少根紫萍的混养体系对总氮、总磷去除效果时,发现稀脉浮萍与少根浮萍 1:2 的处理对总氮去除效果最佳^[15]。所以在利用浮萍处理太湖水域氮、磷污染时,可以考虑不同种浮萍的共存,以达到最优处理效果。

浮萍不仅可以去除氮、磷污染,同样可以用于重金属修复。Rahmani 研究表明,在初始 Pb 浓度为 5 mg/L 的水体中,小浮萍在维持自身生物量增长的同时对水中铅的去除率达到 90% 以上。因此,在利用浮萍对太湖流域富营养化水体进行修复控制的同时,也可以在一定程度上去除工厂出水中的重金属等污染,具有多重环境价值。

此外,研究表明不同品种浮萍对环境温度的要求不同,相应的最适生长温度不一样^[8]。因此,在温度稍低的春、秋季应继续对太湖流域浮萍资源进行相关调查,做到对不同季节太湖流域浮萍分布情况进行探究,以研究太湖流域浮萍种质资源与环境间的关系,为利用浮萍进行富营养化修复提供充足的理论依据。同时,在利用浮萍处理污水时,应充分考虑利用各地域当季的优势浮萍,获得最佳的水体修复效果和经

济效益。

2.2 太湖流域浮萍种属与生长水环境的关系

2.2.1 浮萍种属与水体 pH 值、温度、溶解氧等关系 从表 2 中浮萍生长的 pH 值范围和中位数可以看出,少根紫萍适宜在中性的环境中生长,而紫萍适宜生长在偏碱性的水体中;相对而言,青萍在 pH 值 6.34~8.78 均有分布,其生长的 pH 值范围更广。从生长水体的温度情况来看,浮萍生长水体的温度范围为 28.1~38.1℃,其中青萍生长的水体温度相对较高,为 30.1~38.1℃。从溶解氧含量来看,紫萍和青萍生长水体溶解氧均值分别为 5.3、5.5 mg/L,中位值为 5.5、5.4 mg/L,而少根紫萍相对较低,均值和中位值只有 3.8、3.4 mg/L。还可以看出,3 个属的浮萍均可以在不含氧的水体中生存,这可能是因为浮萍漂浮生长在水面上,可以接触空气中的氧,来满足生长的需要。而个别点溶解氧值最高达到 12.4 mg/L,这说明水体存在氧过饱和的情况,这可能与浮萍或其他水生植物放氧有关。此外,结合表 1 可知,此次采样紫萍属和青萍属样本数较多,少根紫萍相对较少,这可能是因为适宜紫萍和青萍生长的水体 pH 值范围(6.34~9.0)较广,紫萍和青萍的适应能力较少根紫萍强。

表 2 太湖流域不同种属浮萍与相应水体 pH 值、温度、溶解氧值				
种属	统计值	pH 值	温度(℃)	溶解氧(mg/L)
紫萍	平均值	7.47	31.8	5.31
	标准差	0.51	1.78	3.56
	范围	6.89~9.00	28.4~37.1	0~12.4
	中位数	7.37	31.7	5.5
	变异系数	0.07	0.05	0.67
青萍	平均值	7.53	32.1	5.53
	标准差	0.64	2.1	3.62
	范围	6.34~8.78	30.1~38.1	0~12.4
	中位数	7.43	31.7	5.4
	变异系数	0.08	0.06	0.65
少根紫萍	平均值	7.30	31.0	3.78
	标准差	0.51	1.9	2.09
	范围	6.79~8.58	28.1~34.0	0~9.8
	中位数	7.12	31.2	3.4
	变异系数	0.98	1.00	0.55

采样过程中,还发现农田中经常会有浮萍存在,这可能是农民灌溉把浮萍从河湾水体转移到了农田。农田生态系统过多施肥,会造成面源污染,进而随雨水进入附近的河流、湖泊,进而加重水体富营养化。而浮萍可以去除水体的氮、磷污染,因此,浮萍的存在对农田生态系统氮、磷面源污染是否存在控制作用,值得探讨。

2.2.2 太湖流域浮萍种属与水体氮、磷含量的关系 从表 3 可以看出,浮萍种属不同,其生长环境的 COD 及水体氮磷含量存在一定的差异。从化学需氧量来看,青萍和少根紫萍生长水体的 COD 含量均值基本一样,分别为 79.87、78.21 mg/L,而紫萍生长水体 COD 均值为 61.57 mg/L。我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅴ类水 COD 值为 40 mg/L,表明浮萍可以在污染较严重的水体中广泛存在,这也是浮萍可以用于水体污染控制的一个原因。而且青萍生长水体的 COD 范围广于紫萍和少根紫萍,为 2.2~345.5 mg/L,表

表 3 太湖流域不同种属浮萍与相应水体氮、磷含量的关系						
种属	统计值	含量(mg/L)				
		COD	铵态氮	硝态氮	总氮	总磷
紫萍	平均值	61.58	1.85	1.72	4.76	0.31
	标准差	60.77	3.31	1.64	4.83	0.34
	最小值	2.20	0.30	0.01	0.10	0.03
	最大值	211.87	11.70	5.18	10.42	1.34
	中位数	45.14	0.78	0.78	4.18	0.20
	变异系数	0.99	1.78	0.95	1.01	1.11
青萍	平均值	79.87	1.71	1.55	4.28	0.31
	标准差	89.83	3.63	1.51	4.22	0.32
	最小值	2.20	0.28	0.01	0.65	0.03
	最大值	345.20	19.67	4.38	23.49	1.20
	中位数	45.60	0.77	0.73	4.05	0.19
	变异系数	1.12	2.12	0.97	0.99	1.03
少根紫萍	平均值	78.22	2.56	1.11	5.15	0.36
	标准差	86.21	4.77	1.33	6.65	0.71
	最小值	12.53	0.39	0.02	0.78	0.05
	最大值	294.70	16.74	4.38	24.62	2.45
	中位数	36.53	0.99	0.56	3.97	0.10
	变异系数	1.10	1.84	1.21	1.29	1.96

明其对水体污染的适应性更好。可以将青萍作为一个目标植物,在利用浮萍治理水体富营养化的过程中予以优先考虑。

我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅴ类水铵态氮浓度小于 2.0 mg/L,从均值、中位数和范围可以看出,太湖流域水体存在一定的铵态氮污染,部分水体相当严重,其铵态氮浓度最高达到 19.67 mg/L。从表 3 水体铵态氮含量来看,少根紫萍生长水体铵态氮均值高于紫萍和青萍。其中,紫萍和青萍生长水体铵态氮含量相差不多,分别为 1.85、1.70 mg/L,而少根紫萍生长水体铵态氮含量均值为 2.60 mg/L。从太湖水体铵态氮范围来看,少根紫萍和青萍分别为 0.39~16.74 mg/L 和 0.28~19.67 mg/L,而紫萍相对较窄,为 0.30~11.7 mg/L,这表明少根紫萍和青萍对铵态氮的耐受性更广。研究表明当水体铵态氮浓度较高时,对浮萍的生长有抑制作用,因此在利用浮萍进行水体富营养化控制可优先考虑耐受性较好的少根紫萍和青萍。

从水体硝态氮含量来看,紫萍生长水体硝态氮均值高于青萍,青萍均值高于少根紫萍。其中,紫萍和青萍生长水体硝态氮含量相差不多,分别为 1.72、1.55 mg/L,而少根紫萍生长水体硝态氮含量均值为 1.11 mg/L。从太湖水体硝态氮范围来看,紫萍为 0.01~5.18 mg/L,而青萍和少根紫萍相对较窄,分别为 0.01~4.38 mg/L 和 0.02~4.38 mg/L,这表明紫萍对硝态氮的耐受性更广。从均值来看,3 属浮萍硝态氮均值低于铵态氮,这可能是因为采样点多分布于居住区,多为村镇,生活污水排放较多,造成水体有机质含量较高,而铵态氮存在于有机质氨化和硝化反应的初始阶段,铵态氮含量较高表明水体受污染的时间较短^[16]。对少根紫萍而言,约有 70% 的采样水体铵态氮含量高于硝态氮,而对青萍和紫萍而言,分别有 70% 和 75% 的采样水体中硝态氮含量超过铵态氮含量,但并未发现浮萍分布与氮形态间的必然联系。

从水体总氮含量来看,少根紫萍生长水体硝态氮均值高于紫萍,紫萍均值高于青萍。其中,紫萍和青萍生长水体硝态

氮含量相差不多,分别为 4.76、4.28 mg/L,而少根紫萍生长水体硝态氮含量均值为 5.15 mg/L。从太湖水体硝态氮范围来看,紫萍为 0.10 ~ 10.42 mg/L,而青萍和少根紫萍相对较宽,分别为 0.65 ~ 23.49 mg/L 和 0.78 ~ 24.62 mg/L,这表明青萍和少根紫萍对总氮的耐受性更广。我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅴ类水总氮浓度小于 2.0 mg/L,而紫萍、青萍和少根紫萍生长水体总氮的中位值分别为 4.18、4.05、3.97 mg/L,表明太湖流域水体存在较严重的氮污染,部分水体相当严重,其总氮浓度最高达到 24.62 mg/L。这会引引起太湖流域水体富营养化,威胁太湖流域生态系统的稳定性。

从水体总磷含量来看,3 属浮萍生长水体均值相差不多,在 0.31 ~ 0.36 mg/L。而少根紫萍生长水体中总磷范围相对较宽,为 0.05 ~ 2.45 mg/L,紫萍和青萍分别为 0.03 ~ 1.34 mg/L 和 0.03 ~ 1.20 mg/L,这表明少根紫萍对总磷有更好的适应性或者偏好。我国 GB3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅴ类水总磷浓度小于 0.4 mg/L,从中位值来看,超标水体不到一半,但部分水体浓度过高,甚至达到 2.45 mg/L,这对水体富营养化的贡献应当引起足够重视。有文献报道,当总磷浓度超过 0.1 mg/L 或总氮浓度超过 0.3 mg/L 时,藻类会过量繁殖。而经济合作与发展组织(OECD)提出将平均总磷浓度大于 0.035 mg/L 作为富营养湖泊的一个考量标准,表明太湖流域水体富营养化较严重,应加大治理,确保良好的生态区功能。

从氮、磷指标总体来看,太湖流域总氮含量远高于总磷含量,水体污染较严重,尤其是氨氮和总磷污染,应当引起当地相关部门的足够重视,加大对该地区污染控制,确保良好的水体质量。可以考虑选择优良浮萍品种,进行水体植物修复。Alaerts 等研究表明,浮萍处理养殖废水时,在水力停留时间 21 d 过程中对其 TKN 和 TP 的去除率可以达到 74% ~ 77%^[17]。Oron 等研究表明,浮萍处理污水过程中可以获得 15 g/(m²·d) 的高生物质量,蛋白质含量在 30% 左右^[18]。而且,利用当地浮萍资源进行生态修复,不仅可以控制水体富营养化,还可以进行高蛋白饲料加工,服务于养殖业,也可以用来获得高淀粉产量,用于能源化生产,在保护环境的同时,促进当地居民收入,达到环境效益、经济效益和生态效益的统一。

2.3 太湖流域不同种属浮萍淀粉含量

42 株太湖浮萍株系的淀粉含量如表 4 所示(部分样品未能在野外采集到足够的生物量用于淀粉含量的分析测定)。从表 4 可以看出,青萍淀粉含量均值最高,为 17.24%,而紫萍和少根紫萍淀粉含量均值分别为 16.00% 和 14.95%。从淀粉含量范围来看,青萍的淀粉含量范围较广一些,属于 *Spirodela*、*Lemna*、*Landoltia* 属的浮萍淀粉含量范围分别 10.95% ~ 20.62%、11.33% ~ 23.27%、11.79% ~ 21.16%。

表 4 浮萍样品中的淀粉含量 %					
种属	平均值	标准差	范围	中位数	变异系数
紫萍	14.95	3.02	10.95 ~ 20.62	14.15	20
青萍	17.24	3.99	11.33 ~ 23.27	17.29	23
少根紫萍	16.00	3.36	11.79 ~ 21.16	15.67	21

从本次采样结果来看,太湖流域浮萍野外环境下淀粉最

高含量为 23.27%,该浮萍为青萍。据 Caicedo 等研究,浮萍淀粉含量在 3% ~ 75% 之间^[9]。而本次采样中浮萍淀粉含量在 10.95% ~ 23.37% 之间,并没有采集到较高淀粉含量的浮萍株系。这可能与浮萍所处的生长环境有关,从表 2 和表 3 中太湖流域浮萍生长水体中营养成分及浓度来看,浮萍所处水体营养较为丰富,利于浮萍的生长;加上采样时处于夏季,气候条件(温度和光照)也都比较适宜浮萍生长,而高淀粉浮萍株系往往出现在低温、营养匮乏等逆境环境条件中。高淀粉的浮萍株系对浮萍的能源化利用具有至关重要的意义,可以尝试从采集样品中筛选驯化优良的浮萍株系,来探究太湖流域浮萍的生物质利用前景,并为之提供一定的基础数据。

3 结论与展望

3.1 结论

本研究在太湖流域采集到的浮萍共 3 属 5 种,分别为紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、青萍(*Lemna minor*、*Lemna turionifera*、*Lemna aequinoctialis*)和少根紫萍(*Landoltia punctata*)。其中,紫萍和青萍分别占到 49% 和 37%,为该地区主要的浮萍种类,两者或以共生方式存在,其次是少根紫萍,未见稀脉浮萍和品藻。

少根紫萍适宜在中性的环境中生长,而紫萍适宜生长在偏碱性的水体中;相对而言,青萍在 pH 值 6.34 ~ 8.78 均有分布,其生长的 pH 值范围更广。

太湖流域浮萍生长水环境中氮、磷含量范围较广,铵态氮、硝态氮、总氮和总磷质量浓度范围分别为 0.28 ~ 19.67、0.01 ~ 5.18、0.10 ~ 24.62、0.03 ~ 2.45 mg/L。尚未发现自然环境中浮萍的分布与水体氮、磷含量间的必然联系。

太湖流域采集的浮萍株系淀粉含量在 10.95% ~ 23.27% 之间,均值为 15.95%,其中青萍含量最高,达到 23.27%。太湖流域浮萍淀粉含量均值从高到低依次为青萍、少根紫萍和紫萍。

3.2 展望

对未来浮萍的研究,应考虑充分利用浮萍生长速度快、对氮磷等去除能力强、易打捞等优点,筛选适合当地的优良浮萍株系并将其应用于太湖流域等富营养化水体的植物修复中;同时,考虑其作为生物质原料具有的高淀粉和高蛋白含量等特点,可进一步加工生产生物乙醇或高蛋白饲料,从而达到环境效益、生态效益和经济效益的统一。

参考文献:

[1] Kerr R A. The next oil crisis looms large and possibly close[J]. Science,1998 (1):1128 - 1131.
[2] TAP Group. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants:APG II [J]. Bot J Linn Soc,2003,141 (4):399 - 436.
[3] 印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用[J]. 资源节约和综合利用,1998(2):46 - 48.
[4] Xu J,Zhao H,Stomp A M,et al. The production of duckweed as a source of biofuels[J]. Biofuels,2012,3(5):589 - 601.
[5] Peng J F,Wang B Z,Song Y H,et al. Modeling N transformation and removal in a duckweed pond:model development and calibration[J]. Ecological Modelling,2007,206(1/2):147 - 152.

易婷婷, 支崇远, 李培林, 等. Pb^{2+} 对淡水硅藻谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*) 生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 340–343.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.100

Pb^{2+} 对淡水硅藻谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*) 生长的影响

易婷婷, 支崇远, 李培林, 杨雨嘉, 帅春燕

(贵州师范大学生命科学学院, 贵州贵阳 550001)

摘要:通过在自制培养基中加入不同浓度的 Pb^{2+} , 研究水环境中重金属 Pb^{2+} 污染对谷皮菱形藻生长和叶绿素 a 含量的影响, 并在光学显微镜下观察细胞形态变化, 研究该藻对铅离子 (Pb^{2+}) 的耐受性。试验结果表明, 谷皮菱形藻对 Pb^{2+} 的耐受性较强。 Pb^{2+} 浓度低于 5 mg/L, 促进其生长; Pb^{2+} 浓度为 10 mg/L 时, 对其无明显影响; Pb^{2+} 浓度大于 50 mg/L 时, 明显抑制其生长, 且藻细胞出现异常现象; 96 h EC_{50} 值为 27.26 mg/L。 Pb^{2+} 浓度小于 10 mg/L 时, 藻叶绿素 a 含量均较高, 与正常生长情况相似; Pb^{2+} 浓度大于 50 mg/L 时, 叶绿素 a 含量明显降低。 Pb^{2+} 浓度较低时, 藻细胞体形态正常, 且运动能力很强, Pb^{2+} 浓度大于 50 mg/L 时, 藻细胞体出现畸形, 颜色加深, 两端由圆形变成方形, 且运动能力很弱。

关键词:淡水硅藻; 谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*); Pb^{2+} ; 形态; 生长

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)01-0340-04

硅藻是单细胞藻类, 作为水体中重要的初级生产者, 在地球上已存在 1.65 亿年, 对整个海洋初级生产力的贡献高达 40%^[1], 与水生动物相比, 硅藻具有生长周期短、易于分离培养和可以直接观察细胞水平上的中毒症状等优点, 对重金属胁迫更加敏感, 因此, 是较为理想的实验材料^[2]。菱形藻是

底栖硅藻的一种, 因含有丰富的营养物质, 可以作为鲍、海胆、海参等名贵经济动物的饵料, 另外菱形藻属也是环境污染检测指示种^[3-5]。

重金属污染不仅抑制藻类的生长速率, 而且会使其形态发生畸变, 因而硅藻种群或群落中畸形细胞的数量可以作为重金属污染程度的定量指标^[6]。硅藻细胞形态异常在生物监测中是一种很有前途的重金属污染物指示工具^[7]。在环境监测中, 常将叶绿素 a 含量作为湖泊富营养化的指标之一^[8]。铅是一种不能降解且广泛存在的重金属污染物, 铅盐少部分是溶解于水的, 大部分是微溶或不溶于水的^[9]。在自然水体中, 铅的含量一般为 20 $\mu\text{g/L}$, 但污染严重的地区水体含量高达 400 $\mu\text{g/L}$ 。目前 EPA 和 WHO 水体铅浓度标准分

收稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41062005); 贵州省国际科技合作项目 [编号: (2012)800107]。

作者简介: 易婷婷 (1989—), 女, 安徽宣城人, 硕士研究生, 研究方向为现代生物技术应用。E-mail: 136659358@qq.com。

通信作者: 支崇远, 博士, 教授, 主要从事硅藻生理生态方面的研究。E-mail: zhicy@163.com。

[6] 侯文华, 宋关玲, 汪群慧. 浮萍在水体污染治理中的应用[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊1): 70–73.

[7] Landolt E, Kandeler R. The family of Lemnaceae: a monographic study. 2. Phytochemistry, physiology, application, bibliography[M]. Geobotan Inst, 1987.

[8] 沈根祥, 胡宏, 沈东升, 等. 浮萍净化氮磷污水生长条件研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 284–287.

[9] Caicedo J R, van der Steen N P, Arce O, et al. Effect of total ammonia nitrogen concentration and pH on growth rates of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) [J]. Water Research, 2000, 34(15): 3829–3835.

[10] Cheng J Y, Bergmann B A, Classen J J, et al. Nutrient recovery from swine lagoon water by *Spirodela punctata* [J]. Bioresource Technology, 2002, 81(1): 81–85.

[11] Reid M S, Bielecki R L. Response of *Spirodela oligorrhiza* to phosphorus deficiency [J]. Plant Physiology, 1970, 46(4): 609–613.

[12] Chen Y, Yablonski M, Ernst E, et al. Duckweed: an alternative starch source for bioethanol production [C]. Michigan: ASABE

Regional Annual Conference, 2007.

[13] Tang J, Zhang F, Cui W, et al. Genetic structure of duckweed population of *Spirodela*, *Landoltia* and *Lemna* from Lake Tai, China [J]. Planta, 2014, 239(6): 1299–1307.

[14] Rose R, Rose C L, Omi S K, et al. Starch determination by perchloric acid vs enzymes: evaluating the accuracy and precision of six colorimetric methods [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(1): 2–11.

[15] 周雄飞. 浮萍对富营养化水体中 N、P 净化能力初探 [D]. 扬州: 扬州大学, 2011.

[16] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究 [J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 29–33.

[17] Alaerts G J, Mahbub R, Kelderman P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon [J]. Water Research, 1996, 30(4): 843–852.

[18] Oron G D, Porath D. Nitrogen removal and conversion by duckweed grown on wastewater [J]. Water Research, 1988, 22(2): 179–184.