

五里湖底质条件与水生 高等植物的适应性研究

李文朝*

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提要 在五里湖富营养化过程中, 氮、磷及有机物质在湖底沉积物中大量积累。在夏季高温、高水位期, 底泥中因有机物分解耗氧强烈和溶解氧补给受阻而发生缺氧。挺水植物和浮叶植物均能适应这种底质条件; 在水温低于 30℃ 或水深小于 1m 的情况下, 五里湖的底质条件对沉水植物生长十分有利, 但在夏季, 当水温超过 30℃ 且水深远大于 1m 时, 底泥和底层湖水中的厌氧环境会引起沉水植物烂根, 故沉水植物无法在五里湖渡过夏季, 成为重建水生植被的障碍。适当降低水位, 开挖湖心区底泥, 在沿岸带堆积造成人工浅滩, 可以创造出适合水生植物生长的生境条件。

关键词 五里湖 富营养化 底质 水生植物 适应性

湖泊中的底泥是着底水生高等植物(除漂浮植物以外的所有水生高等植物)固着的基础, 也是植物生长所需矿质营养物质的主要来源^[1]。在湖泊富营养化过程中, 有机污染物质在底泥中大量积累^[2,3], 消耗过多的溶解氧而导致底泥缺氧, 造成植物根系呼吸困难。同时, 在厌氧条件下有机污染物质分解时会产生多种有毒物质, 有可能对植物根系产生毒害^[1]。因此, 底质条件的不适宜有可能成为限制水生高等植物生存的重要因素。研究富营养湖泊的底质条件及水生高等植物对它的适应能力, 可为重建水生植被前的环境改造提供依据。

1 研究方法

为研究水生高等植物对富营养水体中底质的适应性, 我们对五里湖底质条件进行了采样分析, 在严格控制的实验条件下完成了伊乐藻生长—底质关系实验和沉水植物盆栽实验, 并在五里湖实验区从湖岸建筑垃圾(瓦砾)至湖底肥沃淤泥的底质上进行了多种水生高等植物栽培实验。实验区及采样点的分布详见参考文献[4]。

1.1 实验区底泥的采样分析

1992 年 10 月 10 日在实验区内外 6 个采样点上采集柱状泥样, 截取 0—10cm 和 10—20cm 两个深度层, 现场测定 pH 和氧化还原电位, 然后将样品风干, 进行干容重及 TOC、TN、TP 含量测定。

1.2 湖内水生植物栽植实验

1.2.1 沿岸带挺水植物栽植实验 1992 年 5 月 31 日和 6 月 28 日从五里湖南端河道中采

* 连光华、张圣照等同志参加了部分工作。

集茭草苗 208kg,香蒲苗 265kg,芦苇苗 10kg,全部分割成单棵苗,栽植在实验区沿岸带水深 0—1m 的范围内。湖岸由建筑垃圾堆积而成,开挖栽植坑较为困难,使用钢钎打孔,将植物苗根部插埋在孔内。

1.2.2 浮叶植物种植实验 1992年6月和1993年6月两次在2000m²围隔中移栽野菱幼苗。自五里湖南端河道中采集长约2m的野菱幼苗,每3—5棵为一把,将其茎基部打结后,用竹竿插入湖底淤泥中。密度约为每平方米3—5棵,总栽植量3200kg。1993年2月自东太湖采集两角菱种150kg,撒播在浮叶植物种植区。

1.2.3 沉水植物栽植实验 1992—1995年先后多次在25m²、200m²、2000m²围隔区和沿岸带挺水植物群落周围种植伊乐藻、黑藻、苦草、菹草、金鱼藻、马来眼子菜、微齿眼子菜等沉水植物。其中伊乐藻和黑藻用枝尖插植,菹草和金鱼藻撒播休眠芽苞,其它三种植物移栽幼苗。

1.3 沉水植物盆栽实验

在五里湖实验区,水质或底质条件的都有可能限制沉水植物的生存。为了区分这两类环境因素的影响,于1992年在2000m²围隔区内进行了沉水植物盆栽实验。7月1日,在14个口径为0.5m的塑料盆中各放入五里湖实验区底泥至10cm厚度,插栽长18cm的伊乐藻枝尖70g,每两盆一组,依次按0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4m的深度(盆口沿至水面)悬挂在实验区内的漂浮竹架上进行培养,对伊乐藻生长情况进行定期观测,7月30日结束实验。8月30日开始重复实验,设0.5、1.0、1.5m三个深度,采用伊乐藻(每盆中栽20cm长枝尖40个)和菹草(每盆栽10cm长菹草幼苗40个)两种沉水植物,其它同7月份实验。

1.4 伊乐藻生长与底质关系实验

实验于1993年4月27日至5月23日在五里湖实验点自然光照和温度条件下进行。将五个容积为40L(40cm×22cm×50cm)的玻璃箱编号为A、B、C、D、E,顺次排列在室内向南窗前的实验台上,在A箱中放入四根长38cm的玻璃棒,在B、C、D、E四只箱中依次铺放厚5cm的建筑用沙(经过洗涤)、取自湖岸深层地下的黄泥、湖底淤泥和鱼塘淤泥。同时取C、D、E三种底质的样品进行TOC、TN、TP含量分析。从实验区中采集长40cm的伊乐藻枝尖200个,称得鲜重为61.5g。将它们分成5组,每组40个,插栽在5只玻璃箱中,其中A箱中用橡皮筋将伊乐藻枝尖基部固定在玻璃棒上。给各箱注满经25号生物网过滤过的湖水,添加硝酸盐和磷酸盐标准液使箱内湖水增加5mg/L的NO₃⁻-N和0.5mg/L的PO₄³⁻-P,以保证箱内湖水处于营养过剩状态。观察记录各箱中伊乐藻的成活和生长情况,5月8日进行水质和底质物理性质测定。5月11日进行半数收获和统计分析,并在D、E箱中再次插栽伊乐藻枝尖各20个。5月23日结束实验,进行最后的生长统计。

2 结果与讨论

2.1 底质条件

在五里湖富营养化过程中,底质中有机物质和植物营养物质的积累是极为强烈的。1951年调查时,五里湖的表层底质主要为沙质淤泥,有机物氧化得较完全,溶解氧充分,pH值偏碱,TOC和TP含量分别为0.75%和0.023%^[3]。到1992年调查时,五里湖的表层底质已演变为干容重不到0.3t/m³的半流体状肥沃淤泥,有强烈的腥臭味。pH居于中性,氧化还

表1 1992年10月五里湖实验区表层底泥的特征

Tab. 1 Characteristics of the top-layer sediment in the bottom of Wuli L. in Oct., 1992

层次	0-10 cm层							10-20 cm层						
样点号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	平均	L1	L2	L3	L4	L5	L6	平均
干容重(t/m ³)	0.315	0.231	0.265	0.279	0.303	0.282	0.279	0.606	0.610	0.709	0.665	0.926	0.610	0.688
TOC(%)	2.12	2.06	2.20	2.17	2.16	2.21	2.15	1.17	1.48	1.56	1.65	1.31	1.47	1.44
TN(‰)	1.37	1.08	1.38	1.33	1.25	1.31	1.29	1.29	1.19	1.18	1.20	0.97	1.05	1.15
TP(‰)	1.11	1.38	1.39	1.46	0.91	0.88	1.19	0.66	1.06	0.82	1.02	0.96	0.68	0.87
本层表观特征	半流体状、细软、乌黑、有腥臭味、 pH6.9-7.2, Eh-120--183							固体状、细软、灰黑色、有腥臭味、 pH6.8-7.2, Eh-203--356						

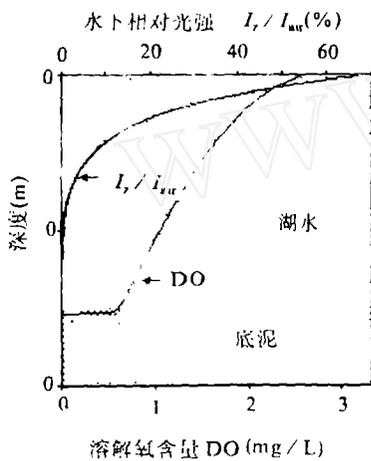


图1 1992年8月20日五里湖水下光照及溶解氧的垂向分布
Fig. 1 Vertical changes of light intensity and DO in the water of Wuli Lake on Aug. 20, 1992

原电位低于 -100mV 。有机物氧化较差, TOC含量高达2.15%。氮、磷等植物营养物质大量积累, TN、TP平均含量分别达到1.29‰和1.19‰(表1)。夏季高温期表层底质处于厌氧状态(图1)。

2.2 水生高等植物对五里湖底质的适应性

如果水生高等植物对富营养水体中的底质条件是适应的, 它应能够在这种底质中形成正常的根系, 这一根系能忍受诸如缺氧、低氧化还原电位等不利的底质条件, 并拥有正常的固持功能和营养吸收功能, 能维持植物的正常生长。否则为不适应。

2.2.1 湖内实验结果

(1) 挺水植物。芦苇、茭草和香蒲均能适应从湖岸建筑垃圾(瓦砾)至湖底肥沃淤泥的各种底质, 主要因为它们属于宿根性多年生植物, 有粗壮的地下水平根状茎和发达的根系, 能在坚硬的底质中穿行; 它们的茎和地下根状茎是中空的, 能由地上部分向根系输送氧气, 可适应缺氧的底质环境。

(2) 浮叶植物。菱的种植实验证明, 它完全可以适应富营养湖泊中的底质条件, 正常萌发和生长。菱种一般在3月下旬至4月上旬萌发, 此时湖底温度低于 20°C , 湖水和底泥中有机的氧化耗氧较少, 底泥中氧气供给比较充足, 因而位于底泥表层的菱种能获得所需的氧气而萌发生长。多次移栽实验结果, 6月份当菱秧被插栽5天后, 就能由泥中茎节上产生具根毛的须状不定根, 它能够从底质中获得充足的营养, 使得菱秧正常分枝和结实。荇菜的营养繁殖体也能在实验区中萌发生长, 形成正常的植株。

(3) 沉水植物。在实验区中先后种植和栽植过伊乐藻、菹草、黑藻、金鱼藻、马来眼子菜、狐尾藻、微齿眼子菜等沉水植物, 除了微齿眼子菜以外, 其它6种植物均能在9月至次年5月正常生长。当进入6月以后, 沉水植物会发生烂根现象, 整个植物体漂浮于水面而死亡, 这主要是由于底部湖水和底泥中严重缺氧和微生物的强烈活动所致(图1)。

2.2.2 盆栽实验结果

湖水温度 $24.6-37.6^{\circ}\text{C}$ (1992年7月), 伊乐藻生长情况的观测结果见表2。在实验前

期(7月1—20日)湖底光照强度大于5%,各深度的伊乐藻均能正常生长,到20日时最底层盆中的伊乐藻冠层距水面约1m,已经处于较好的光照条件之下。20日以后,由于伊乐藻本身的遮阴作用,使得水下光照减弱;加之水温上升到35℃以上,湖水和底泥中生物耗氧增加,湖底层缺氧而导致处于1m水深以下的伊乐藻根部腐烂。0.8m以上的浅水层内伊乐藻仍能正常生长,说明浅水层内较好的光照条件和氧气供给是沉水植物得以存活的根本保证。

表2 1992年7月伊乐藻盆栽深度实验结果统计

Tab. 2 The results of *Elodea Nuttallii* pot-cultivation experiment in July, 1992

水深(m)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
7月20日:生长状况	旺盛	旺盛	旺盛	旺盛	正常	正常	瘦弱
植株高度(m)	0.40	0.45	0.55	0.60	0.55	0.40	0.40
7月30日:生长状况	旺盛	旺盛	旺盛	旺盛	根部腐烂	烂根漂起	烂根漂起
植株高度(m)	0.50	0.65	0.80	1.00	0.80	0.70	0.65
生物量(g)	2500	3509	3330	4720	1878	—	—

8月29日—10月10日湖水温度30—18℃,水底相对光照强度保持在5%左右。处于0.5—1.5m水深的伊乐藻和菹草均能正常生长,但长势有明显差异(表3)。处于底层的植物生长瘦弱,分枝少,生物量积累较慢;而处于表层的植物则生长旺盛,分枝能力强,生物量积累较快。

表3 1992年8—10月伊乐藻盆栽深度实验结果统计

Tab. 3 The results of *Elodea Nuttallii* pot-cultivation experiment from Aug. to Oct., 1992

种名	伊乐藻	伊乐藻	伊乐藻	菹草	菹草	菹草
水深(m)	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
9月8日:生长状况	旺盛	旺盛	瘦弱	旺盛	旺盛	瘦弱
植株高度(m)	0.80	0.85	0.75	0.38	0.90	0.98
分枝数(个)	250	10	8	130	100	68
10月10日:植株高度(m)	1.00	1.20	0.90	0.75	1.00	1.50
生物量(g)	1650	1100	515	340	330	240

实验结果表明,五里湖底质条件是否适合沉水植物生长,这不仅取决于底质自身的化学特征,而且在很大程度上受制于湖水深度和温度。当水温低于30℃且水深小于1.5m时,底质条件完全适合沉水植物的生长;但在夏季高温、高水位期,沉水植物因水底光照不足和严重缺氧发生烂根,这是湖内多次种植实验沉水植物无法渡过夏季的主要原因。

2.2.3 伊乐藻生长—底质关系实验结果

在水质和其它环境条件完全一致,湖水中保持充足光照和氮、磷营养的情况下,以五里湖底泥与其它类型的沉积物为基质,进行对比性伊乐藻栽培实验,旨在揭示五里湖底质对沉水植物的适宜程度。实验条件见表4。实验期间实测水温18—21℃,在伊乐藻生长的适宜温度范围内^[5]。湖水和底泥的pH值略偏碱性,但在正常范围内。湖水处于较好的氧化状态,而D、E中的底泥氧化程度很差,有较高的TOC、TN、TP含量。各箱中水质清澈,保持了5mg/L以上的氮含量,在A、B、C中有较高的磷含量,这基本符合原设计的实验条件。

伊乐藻生长情况见表5,主要结果如下:

(1) 在5种底质条件下,伊乐藻均有较高的成活率(75%—100%)。不同类型的底质没

表4 伊乐藻生长—底质关系实验的底质与水质条件

Tab. 4 Characteristics of sediment and water in sediment-based cultivation experiment of *Elodea Nuttallii*

水箱编号	A'	B	C	D	E
基质类型	—	粗沙	黄泥	湖底淤泥	鱼塘淤泥
基质性状	—	经过清洗	坚硬贫瘠	松软肥沃	松软肥沃
干容重(t/m ³)	—	—	1.43	0.485	0.279
pH值	8.3	8.3	7.3	7.2	7.1
氧化还原电位(mV)	+153	+153	+163	-310	-408
TOC含量(%)	0	0	0.36	6.8	9.8
TN含量(%)	0	0	0.037	0.203	0.174
TP含量(%)	0	0	0.027	0.073	0.043
湖水OD ₄₀₀ (m ⁻¹)	1.30	1.40	0.98	2.50	1.60
pH值	8.3	8.3	8.7	8.5	8.3
TN(mg/L)	5.01	6.22	5.87	5.02	5.05
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	0.171	0.080	0.006	1.796	0.160
NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	0.323	0.323	0.022	0.630	0.287
NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	2.758	2.745	2.745	0.694	2.303
PO ₄ ³⁻ -P(mg/m ³)	451	383	93	4	7

* 将伊乐藻枝尖固定在直径6mm的玻璃棒上。

表5 伊乐藻生长—底质关系实验结果*

Tab. 5 The results of sediment-based cultivation experiment of *Elodea Nuttallii*

日期	观测项目	A	B	C	D	E	D'	E'
5月11日	成活率(%)	100	90	95	85	90		
	生根率(%)	45	40	55	100	100		
	分枝率(%)	95	100	105	60	0		
	长度(cm)	12±4	14±3	14±3	40±9	39±9		
	生长(cm)	2±4	4±3	4±3	30±9	29±9		
	鲜重(g)	4.15	4.2	5.24	11.02	8.48		
	增重(g)	-2.00	-1.95	-0.91	4.87	2.33		
5月23日	成活率(%)	75	100	100	85	80	95	100
	生根率(%)	33	45	35	100	100	95	45
	分枝率(%)	50	135	80	185	40	40	0
	长度(cm)	12.5±4.1	14.7±5.6	13.7±4.9	68.4±7.7	32.9±6.6	54.4±16	17.7±8
	生长(cm)	2.5±4.1	4.7±5.6	3.7±4.9	58.4±7.7	22.9±6.6	44.4±16	7.7±8
	鲜重(g)	2.79	4.48	4.35	18.16	10.28	5.80	2.91
	增重(g)	-3.36	-1.67	-1.80	12.01	4.13	3.80	0.91

* 半数收获统计。D'、E'系5月11日D、E箱中半数收获后重新栽植。

有给伊乐藻的成活率带来明显的影响。

(2) 在底质松软、营养丰富的D、E中,伊乐藻能从埋在底质中的茎节上产生根毛发达的须状根系(图2),这种根系具有正常的固持作用和营养吸收作用。相反,在无底质(A)、粗沙底质(B)及贫瘠而坚硬的黄泥底质(C)中,伊乐藻不能产生正常的根系,只形成少量不具根毛的水中不定根,这些不定根尚未扎入底质中,未能起到固持作用和营养吸收作用。

(3) 在5种底质条件下,伊乐藻均能正常地形成分枝,但在无底质(A)和鱼塘淤泥底质(E)条件下分枝率较低,在底质营养丰富(D、E)时分枝能较好地生长。

(4) 在无底质(A)或底质营养贫乏(B、C)条件下,伊乐藻虽也能维持存活和缓慢的茎尖

伸长,但生物现存量却在持续减少。在底质营养丰富(D、E)时伊乐藻以较高的速度进行茎尖伸长和生物现存量的积累,前期茎尖平均伸长速度超过 2cm/d。

实验结果证明,在富营养水质条件下,伊乐藻的正常生长仍然依赖于底泥中的营养。富营养湖泊中的底泥不仅含有丰富的植物营养物质,可以充足地供给水生高等植物生长的需要,而且对湖水中的 PO_4^{3-} 有强烈的吸收能力,这样可以使湖水保持较低的 $PO_4^{3-}-P$ 水平。尽管富营养湖泊中的底泥氧化程度很差,但插植的伊乐藻枝尖能在其中形成发育良好的根系,并可从中吸取足够的营养物质以维持植物高速生长的需要。这说明,富营养湖泊中的底泥本身是适合水生植物生长的。

3 小结

富营养湖泊中的底泥含有丰富的植物营养物质,尽管存在低氧化还原电位等不利因素,水生植物的根系可以适应其环境条件,并从中吸取充足的矿物质营养。对于水生植物而言,富营养底泥比贫营养底泥更为优越。高温和水下光照不足能引起水底层和底泥中严重缺氧,导致沉水植物烂根,使得沉水植物无法渡过夏季高温、高水位期。但这并非底泥本身的问题,受控于水深和湖水透明度的水底光照条件及氧气供给状况起了决定性的作用。挺水植物能通过中空的茎杆向根系输送氧气,因而能适应底泥中的厌氧环境。浮叶植物对富营养的底泥也有较强的适应能力。

可以通过三种途径改善底泥条件,保证沉水植物的生存条件。(1)降低水位和提高湖水透明度;(2)清除表层有机质含量过高的淤泥;(3)改造湖底形态,创造沿岸带浅水环境。对于五里湖,如能将三者综合运用,在适当控制水位的前提下,开挖湖心区底泥,将其堆积在沿岸带,造成人工浅滩,可为水生植物生长提供优越的生境条件。



图2 伊乐藻枝尖插植在湖泥中形成的须状根系(右)和在贫营养底质中形成的水中不定根(左)
Fig. 2 The root of *Elodea Nuttallii* formed in different sediment; left, adventitious root in the poor sediment; right, well-developed fibrous root system in the fertile lake mud

参 考 文 献

- 1 Riemer D N. Introduction to freshwater vegetation. AVI Publishing Campony. 1984
- 2 李文朝. 五里湖营养状况及治理对策探讨. 湖泊科学, 1994, 6(2): 136-143
- 3 李文朝. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 37-45
- 4 李文朝. 浅型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 1-10
- 5 杨清心, 李文朝. 伊乐藻在东太湖的引种. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第6号. 北京: 科学出版社, 1989. 84-93

ON THE ADAPTIVENESS OF AQUATIC MACROPHYTE TO THE SEDIMENT IN WULI LAKE

Li Wenchao

(Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

In the eutrophication process of Wuli Lake, large amount of nitrogen, phosphorous and organic matter accumulated in the sediment of the lake bottom. In summer, oxygen deficiency often occurred in the sediment and bottom water, because high temperature enhanced biochemical oxygen consumption in the sediment and water, but the high water level greatly limited oxygen supply of the bottom water and sediment. The sediment condition was suitable for emerged plant and floating-leaved plant all the time, and even favorite to submerged plant when the temperature was below 30°C or the water depth was less than 1m. In summer season when the temperature was over 30°C and the water depth was beyond 1m, the anaerobic condition in the sediment and bottom water could destroy the root of submerged plant and cause it floating-up. It became an obstacle for restore aquatic vegetation in Wuli Lake that submerged plant could not survive the summer. To create suitable habitat for aquatic plant in Wuli Lake, the water level should be controlled, and the fertile sediment in the center of the lake be moved to the littoral zone to make it more shallow.

Key Words Wuli Lake, eutrophication, sediment, aquatic plant, adaptiveness