

在极度弱光和两种底质条件下苦草的生长和生理响应

张忠海 杨桐 文紫豪 张霄林 曹特 倪乐意 袁昌波

GROWTH AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF *VALLISNERIA NATANS* UNDER EXTREME LOW LIGHT AND TWO SUBSTRATE CONDITIONS

ZHANG Zhong-Hai, YANG Tong, WEN Zi-Hao, ZHANG Xiao-Lin, CAO Te, NI Le-Yi, YUAN Chang-Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.178>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磷和CO<sub>2</sub>浓度变化对苦草光合生理的影响

EFFECTS OF PHOSPHORUS AND CO<sub>2</sub> ON PHOTOSYNTHESIS PHYSIOLOGICAL OF *VALLISNERIA NATANS*

水生生物学报. 2017, 41(5): 1097–1105 <https://doi.org/10.7541/2017.137>

硅酸盐矿物麦饭石对沉水植物生理生态的影响

EFFECTS OF MEDICAL STONE ON THE GROWTH OF SUBMERGED MACROPHYTES

水生生物学报. 2019, 43(6): 1353–1361 <https://doi.org/10.7541/2019.159>

光强对菹草生长及抗氧化酶活性的影响

EFFECTS OF LIGHT INTENSITY ON GROWTH AND ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITY OF *POTAMOGETON CRISPUS*

水生生物学报. 2018, 42(4): 846–853 <https://doi.org/10.7541/2018.104>

低平均光强下波动光对铜绿微囊藻生长的影响

EFFECTS OF FLUCTUATING LIGHT ON THE GROWTH OF *MICROCYSTIS AERUGINOSA* UNDER LOW LIGHT AVERAGE INTENSITY

水生生物学报. 2020, 44(2): 438–444 <https://doi.org/10.7541/2020.053>

基于水下光照条件和种子库分布指示沉水植物恢复区: 以金湖为例

INTEGRATING UNDERWATER LIGHT CONDITION AND SEED BANK TO INDICATE SUBMERSED MACROPHYTE RESTORATION ZONE: LAKE JINHU AS A CASE

水生生物学报. 2020, 44(5): 1111–1118 <https://doi.org/10.7541/2020.129>

群体和单细胞微囊藻对短期高光胁迫的生理响应

THE PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF COLONIAL AND SINGLE-CELLED FORM OF *MICROCYSTIS* TO SHORT-TERM HIGH STRESS

水生生物学报. 2017, 41(2): 443–447 <https://doi.org/10.7541/2017.55>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.178

## 在极度弱光和两种底质条件下苦草的生长和生理响应

张忠海<sup>1</sup> 杨桐<sup>2</sup> 文紫豪<sup>1</sup> 张霄林<sup>1</sup> 曹特<sup>1</sup> 倪乐意<sup>1</sup> 袁昌波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 大理市洱海管理局, 大理 671000)

**摘要:** 实验以云南大理州洱海水生植被重度退化区(湖心平台)作为实验地点, 探究极度弱光和两种底质(黏土、淤泥)环境下苦草(*Vallisneria spiralis*)在恢复过程中的形态及生理响应, 并依此探讨底质改善对苦草种群恢复的作用。结果表明: (1)在极度弱光环境下, 苦草部分死亡, 存活数量下降, 并在形态特征和生理特征上均表现出胁迫响应, 其形态特征值下降, 氮(N)含量和游离氨基酸含量上升, 碳(C)含量和淀粉含量下降; (2)苦草不同器官对弱光环境的响应有所差异, 叶片(地上部分)受到的胁迫影响大于根茎(地下部分); (3)苦草对弱光环境的响应在不同底质条件下有显著性差异, 苦草在黏土底质上表现出更小的胁迫反应和更高的存活数量, 两种底质相比较, 黏土更适合作为苦草恢复的底质条件。研究表明在洱海当前的水质环境下有希望结合局部的底质改善来实现在南部湖心平台的沉水植物恢复。

**关键词:** 弱光胁迫; 底质; 水生植被恢复; 苦草

**中图分类号:** Q142

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3207(2021)03-0652-11



湖泊富营养化及其引发的沉水植被退化仍然是我国众多湖泊目前面临的一个主要问题。由于沉水植物在湖泊生态系统中发挥着重要的生态功能(初级生产者, 维持生物多样性和清水稳态, 稳定底质环境等<sup>[1]</sup>), 沉水植被的退化将引发一系列水生态和水环境问题, 比如引起湖泊的“草-藻”稳态转换<sup>[2]</sup>。因此, 开展沉水植被修复是很多富营养化湖泊生态修复中的一项重要工作, 并在很多湖泊中得到实施, 比如武汉东湖<sup>[3]</sup>、杭州西湖<sup>[4]</sup>和荆州洪湖<sup>[5]</sup>等。但是, 在污染严重的水体中, 沉水植物的自然恢复是十分困难的, 一般而言, 湖泊低透明度和水下植物繁殖体的缺乏是影响水生植被恢复的主要限制因素<sup>[6, 7]</sup>。在这种情况下应尽快进行生态工程促进水生植被生境改善, 并积极开展水生植被重建与恢复工作<sup>[8]</sup>。就污染水体的低透明度而言, 水生植物必然会受到光照不足的影响, 一般认为环境光强持久或短时间显著低于植物光饱和点, 可以称为弱

光逆境<sup>[9]</sup>。在弱光条件下, 首先通过降低光合作用效率抑制沉水植物的生长, 此外还通过抑制抗氧化酶活性影响沉水植物的生存<sup>[10, 11]</sup>, 而大多数富营养化湖泊普遍表现出弱光或极度弱光的水下环境, 成为影响这些湖泊中沉水植被恢复的一大难题。除了水下光照环境, 底质条件对沉水植物的恢复亦有重要的影响, 底质是沉水植物的固定基质和营养来源, 对沉水植物生根、繁殖和生长产生不同程度的影响<sup>[12, 13]</sup>, 研究表明富营养水体中肥沃底质对沉水植物造成胁迫, 使其生物量下降<sup>[14]</sup>。

洱海位于云南西北部的大理州境内, 是我国著名的高原淡水湖泊之一, 在洱海面高程为1973.7 m时, 湖泊面积是249.8 km<sup>2</sup>。南部湖心平台(简称湖心平台)位于洱海南部湖心区域, 南起洱滨村, 北至才村和文笔村(25.64375—25.71297N, 100.21799—100.24011E), 南北两端是水深10 m以上的深水区, 东西两侧是水深10—13 m的深水带与沿岸带相隔,

**收稿日期:** 2020-08-10; **修订日期:** 2020-12-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(31870446); 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2019FBZ01); 中国科学院科技服务网络计划重点项目(KFJ-STIS-QYZD-156)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31870446); State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology (2019FBZ01); Science and Technology Service Network Initiative, Chinese Academy of Sciences (KFJ-STIS-QYZD-156)]

**作者简介:** 张忠海(1995—), 男, 硕士研究生; 主要从事水生植物学研究。E-mail: 1161962932@qq.com

**通信作者:** 袁昌波(1990—), 男, 博士后; 主要从事水生植物生态学研究。E-mail: yuancb@ihb.ac.cn

中间形成一片水深6 m左右的暗滩区域。湖心平台曾经是洱海沉水植物成片连续分布的最大区域, 在洱海沉水植被演替过程中具有非常重要的地位(表1)<sup>[15-17]</sup>; 自1998年洱海发生大面积水华后, 湖心平台区域沉水植被大幅退化<sup>[18, 19]</sup>, 在2009年该区域未发现沉水植物生存<sup>[20]</sup>。如果能成功恢复湖心平台的沉水植被, 将大幅提升洱海沉水植物群落的分布面积和生态功能。

表 1 洱海湖心平台区域水生植被群落变化<sup>[15-17]</sup>

Tab. 1 Changes of aquatic vegetation community in the lake center platform of Erhai Lake

| 时间<br>Time | 分布面积<br>Distribution<br>area (km <sup>2</sup> ) | 在全湖水生<br>植被面积的<br>百分比<br>Distribution<br>proportion<br>(%) | 群落<br>Community     | 优势种<br>Dominant<br>species |
|------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1975—1983  |                                                 |                                                            | 金鱼藻群落               | 金鱼藻、苦<br>草、黑藻              |
| 1981—1983  | 23.0                                            | 29.76                                                      | 微齿眼子<br>菜、金鱼藻<br>群落 | 金鱼藻、微<br>齿眼子菜              |
| 1998       | 33.4                                            | 34.80                                                      | 微齿眼子菜<br>群落         | 微齿眼子<br>菜、苦草、<br>黑藻        |

2015年以来, 随着洱海环境保护力度的加大, 洱海水质呈现出逐年向好的发展趋势, 透明度逐年提高, 湖心平台水下光环境基本达到沉水植物的光补偿点, 理论上存在沉水植物恢复的可能性, 但是没有出现自然恢复的现象, 因此我们希望通过人工强化的修复措施实现该区域的沉水植被重建。这里面有两个问题: (1)选用哪种沉水植物; (2)如何通过改善局部环境来帮助沉水植物应对弱光胁迫。苦草(*Vallisneria natans*)是水鳖科(Hydrocharitaceae)苦草属(*Vallisneria*)沉水草本植物, 无直立茎, 叶基生, 条形<sup>[21]</sup>, 生长区域广泛, 在淡水湖泊、沟渠、池塘和内河航道的静水或流动水体中均能很好地生长<sup>[22]</sup>。苦草对弱光环境具有很强的耐受能力, 因此成为洱海沉水植物群落中分布下限最深的物种<sup>[23]</sup>, 并且在1980s中后期以来, 苦草成为洱海水生植被的优势种之一<sup>[24]</sup>, 所以我们选择了对弱光环境耐受能力强的苦草作为湖心平台区域沉水植被恢复的尝试物种。另外, 就湖心平台底泥中富集了大量有机碎屑的情况而言, 改善底质环境理论上对沉水植被的恢复有利, 所以我们选择了黏土作为底质的处理, 以原位淤泥作为对照的方法, 探究底质改善对湖心平台水域沉水植被恢复的影响。对当地水生植被的恢复可以起到很好的指导作用, 在洱海湖泊的生态修复中具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用的苦草来自洱海苗圃基地, 苗圃基地邻于洱海北部, 由水深1.5 m水生植物培养池构成, 取洱海的苦草置于苗圃培养池, 通过培养扩增苦草数量。实验选用的是生长茂盛、健康和形态指标大体一致[株高: (65±5) cm, 鲜重: (10.5±0.5) g]的苦草, 并去除植株上的匍匐茎。

1.2 实验时间与地点

实验时间选择苦草在洱海的生长旺盛期, 从2018年6月7日到2018年8月7日, 共9周(63d)。

如图1所示, 实验地点选择在洱海南部湖心平台水深最浅的区域, 实验地点中心坐标(25.684234 N, 100.226728E)。

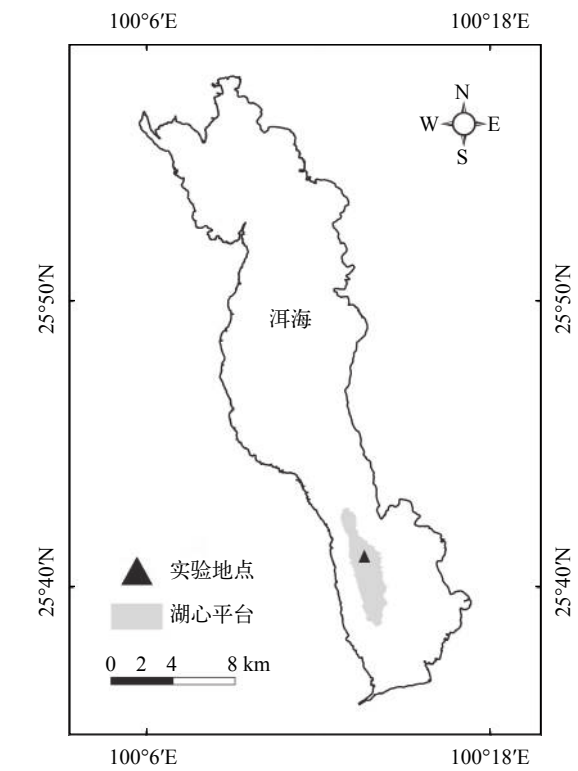


图 1 实验地点位置图

Fig. 1 Location map of experimental sites

1.3 实验设计

实验以黏土底质作为处理组, 以淤泥底质(湖心平台原位底泥)作为对照组。淤泥是用彼德森采泥器采集湖心平台水底的底泥, 黏土采自苗圃基地, 是洱海岸边常见的泥土。黏土含水率20%, N含量0.11%, C含量2.75%, 有机质含量7.76%; 而淤泥含水率83%, N含量1.09%, C含量13.63%, 有机质含量20.52%。比较两种底泥, 淤泥含有更高浓度的C、N和有机质含量, 而黏土含水率低, 土质偏硬。

种植方式采用沉桶种植。种植桶是白色塑料桶(口直径: 35 cm, 底直径: 27 cm, 高: 33 cm), 在桶内装填底质(淤泥或黏土)15 cm, 将苦草按照每桶30株的密度均匀植于桶内, 每个实验处理分配20桶作为平行。种植桶沉入水底前, 用另一端绑着浮标(直径10 cm的白色泡沫球)的尼龙绳系在桶上, 绳长度7.5 m, 略大于实验地点的水深(约6.3 m), 保证种植桶不受浮标漂动影响, 然后缓慢沉入水底。

#### 1.4 测量指标

**水环境指标** 在实验期间, 光合有效辐射、水温、pH、透明度、实验区水体总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、总磷(TP)和正磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )每1周测量1次。水温和pH用多参数水质分析仪YSI(Yellow Springs Instruments, Ohio, US)测量, 透明度用黑白透明度盘测量, 水底光合有效辐射使用水下照度计(Li-1400; Li-Cor Company, Lincoln, NE, U.S.A; UWQ-8342)于上午11—12点在苦草冠层深度测量, 水的消光系数用不同水深的光合有效辐射计算得来。总氮、氨氮、硝态氮、总磷和正磷酸盐根据标准方法测定<sup>[25]</sup>。

**苦草生长和生理指标** 在实验周期内, 每1周从对照组和实验组各随机取5个实验桶计数植株数量作为苦草存活量, 从5个桶内每桶随机取1株苦草带回实验室, 测量地上部分(叶片)和地下部分(根和茎)的长度, 经80℃烘干至恒重后测量各部分的生物量(干重)、游离氨基酸、可溶性糖、淀粉、碳和氮含量。植物组织碳和氮含量通过元素分析仪(Flash EA 1112, CE Instruments, Italy)测定; 将烘干的植物组织50 mg用5 mL的80%乙醇在80℃的水浴萃取20min, 重复2次, 离心后合并上清液, 并定容到5 mL用于测定总糖和氨基酸, 萃取后的残渣中加入1 mL 30%的高氯酸继续萃取120min, 离心10min后收集上清液用于测定淀粉含量。总糖的测定使用1 g/L的葡萄糖溶液做标准曲线, 用蒽酮试剂法测定<sup>[26]</sup>, 游离氨基酸的测定用3  $\mu\text{g/mL}$ 的丙氨酸做标准曲线, 用茚满三酮—抗坏血酸法测定<sup>[27]</sup>。用5 g/L的淀粉溶液做标准曲线, 用碘试剂法测定淀粉含量<sup>[28]</sup>。

#### 1.5 分析方法

使用SPSS 22软件进行统计分析, 采用双因素方差分析时间和底质因素对苦草存活数量和不同部位的生物量、长度的作用效应, 采用成组样本 $t$ 检验实验组和对照组在游离氨基酸、可溶性糖、淀粉、碳、氮含量上是否有差异, 方差分析前所有数据进行正态分布和方差齐性检验, 如有必要时将数据进行转换以满足方差齐性检验。使用Origin

2017软件绘图。

## 2 结果

### 2.1 水环境特征

在实验周期内, 实验区域水深6.1—6.6 m, 透明度1.5—2.0 m, 湖底光照8.3—15.8  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 有研究报道苦草的光补偿点为9.4  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 光饱和点200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ <sup>[29]</sup>(图2), 湖底光照强度不能满足苦草的需光量, 光照不足是影响生长的主要限制因子, 在此区域苦草必然受到弱光胁迫的影响。另外, 实验区域水体水温22.1—24.6℃; pH 8.5—8.6; TN浓度0.56—0.98 mg/L,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度0.012—0.071 mg/L,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度0.031—0.052 mg/L; TP浓度0.034—0.048 mg/L,  $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度0.002—0.015 mg/L, 湖心区域水质为III类水, 按照地表水质标准(GB3838-2002), 属于III类水。有研究报道苦草能在5—35℃温度条件下良好生长<sup>[30]</sup>, 在氨氮<1.56 mg/L时, 现存量增加百分比略有增加, 而硝氮<25 mg/L

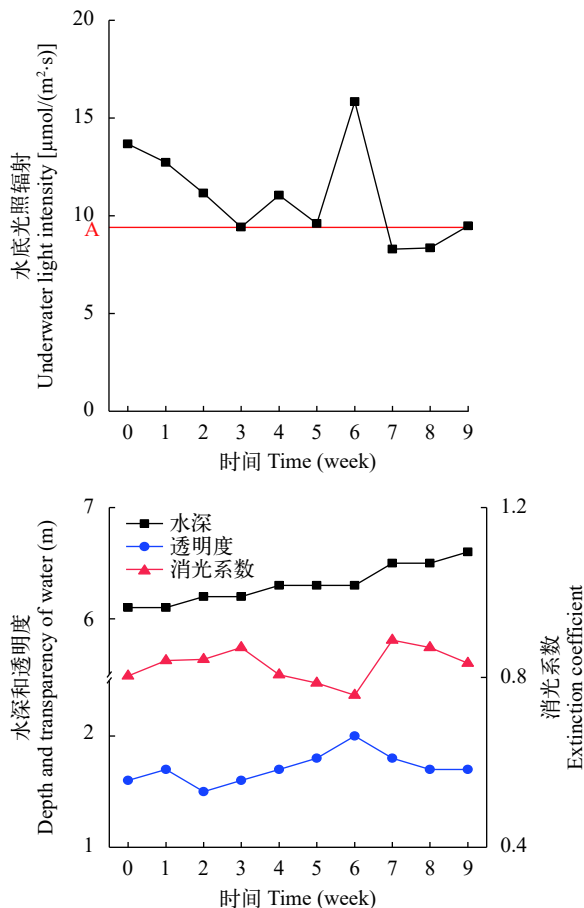


图2 水环境因子变化

Fig. 2 Changes in water environmental factors

A. 苦草的光补偿点

A. Light compensation point of *V. natans*

时, 促进苦草生长, 在总磷浓度 $<3.2 \text{ mg/L}$ 时, 苦草的生产力可保持正增长<sup>[1]</sup>, 在本实验地点水温和营养盐因素对苦草的生长并没有不利的影响。

## 2.2 苦草存活数量

在实验期间, 苦草存活量显著性下降, 对照组从30株/桶下降到 $(10 \pm 2)$ 株/桶, 实验组从30株/桶下降到 $(18 \pm 4)$ 株/桶(图3), 这说明弱光环境限制了苦草的生长, 导致了部分苦草死亡。双因素方差分析表明, 黏土组苦草存活株数显著性大于淤泥对照组(表2,  $P < 0.05$ ), 说明相比于淤泥底质, 黏土更有利于苦草的存活, 然而2种底质苦草存活数仍明显少于初始种植数。

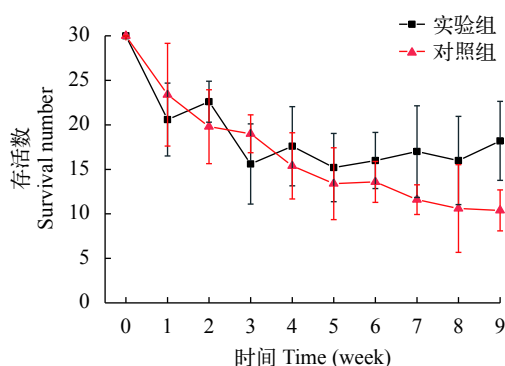


图3 苦草存活数量变化

Fig. 3 Changes in the survival number of *V. natans*

表2 苦草存活数和不同器官生物量、长度的双因素方差分析

Tab. 2 Two factor ANOVA table of survival number, biomass and length of different organs of *V. natans* (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$ )

| 指标<br>Index            |       | 方差变异百分比 Percentage (%) |         |         |      |
|------------------------|-------|------------------------|---------|---------|------|
|                        |       | 底质                     | 时间      | 底质×时间   | 误差   |
| 存活数<br>Survival number |       | 2.9**                  | 61.7*** | 7.1*    | 28.2 |
| 生物量<br>Biomass         | 叶片    | 0.0                    | 91.0*** | 4.1***  | 4.9  |
|                        | 根茎    | 6.3***                 | 63.3*** | 4.9     | 25.3 |
|                        | 根茎/叶片 | 3.8***                 | 66.8*** | 22.6*** | 6.8  |
| 长度<br>Length           | 叶片    | 0.2                    | 55.1*** | 1.5     | 43.1 |
|                        | 根茎    | 0.0                    | 65.5*** | 5       | 29.6 |
|                        | 根茎/叶片 | 0.9                    | 58.4*** | 5.7     | 35.1 |

## 2.3 弱光胁迫下底质对苦草形态指标的影响

在实验初始时, 单株苦草叶片的平均生物量为 $(0.96 \pm 0.04) \text{ g}$ , 根茎的平均生物量为 $(0.27 \pm 0.01) \text{ g}$ 。在弱光环境下, 苦草生长明显受到抑制, 叶片生物量和根茎生物量都有显著性下降(表2,  $P < 0.05$ )。在实验期间, 实验组和对照组单株叶片的平均生物量分别下降至 $(0.10 \pm 0.03)$ 和 $(0.10 \pm 0.02) \text{ g}$ , 下降幅度

分别是90%和90%; 根生物量在第1周下降趋势最迅速, 之后在2个实验组之间表现出差异, 对照组的下降趋势减缓, 实验组的变化是先上升后下降, 第9周, 实验组和对照组的根生物量分别是 $(0.13 \pm 0.04)$ 和 $(0.06 \pm 0.01) \text{ g}$ , 相比初始值下降幅度分别是51%和80%; 实验组和对照组单株苦草根茎和叶片的生物量比值显著性上升(表2,  $P < 0.05$ ), 分别从 $(0.28 \pm 0.01)$ 上升到 $(1.35 \pm 0.09)$ 和 $(0.59 \pm 0.09)$ , 并且叶片生物量的下降幅度远大于根茎(图4)。双因素方差分析表明, 时间因素对叶片和根茎的生物量及两者的比值有显著性影响, 底质因素对根茎的生物量有显著性影响, 实验组根茎生物量大于对照组(表2,  $P < 0.05$ )。

在初始时, 苦草叶片长度平均值 $(51.7 \pm 3.7) \text{ cm}$ , 根茎长度平均值 $(13.4 \pm 1.0) \text{ cm}$ 。在弱光环境下, 苦草叶片和根茎长度显著性下降(表2,  $P < 0.05$ ), 第1周, 实验组的苦草叶片长度下降至 $(36.3 \pm 9.2) \text{ cm}$ , 对照组的苦草叶片长度下降至 $(40.1 \pm 14.4) \text{ cm}$ , 比初始值分别下降了30%和22%, 此后变化不显著; 第5周, 实验组苦草的根茎长度为 $(3.6 \pm 1.0) \text{ cm}$ , 对照组苦草的根茎长度为 $(3.7 \pm 1.1) \text{ cm}$ , 比初始值分别下降了73%和72%, 此后苦草根茎的变化不显著; 苦草根茎和叶片长度的比值显著性下降(表2,  $P < 0.05$ ), 实验组和对照组的根茎和叶片长度的比值分别从 $(0.26 \pm 0.00)$ 下降到 $(0.12 \pm 0.01)$ 和 $(0.11 \pm 0.01)$ , 并且叶片长度的下降幅度远小于根茎(图4)。双因素方差分析表明, 时间因素对叶片和根茎的长度及两者的比值都有显著性影响, 而底质因素对它们没有显著性效应, 即实验组和对照组之间没有显著性差异。

## 2.4 在弱光胁迫下两种底质中苦草的生理指标的变化

在初始时, 苦草叶片的C含量是37.2%, 根茎的C含量是36.2%, 在弱光环境下, 实验组和对照组的叶片和根茎的C含量均呈下降趋势, 在实验期间, 实验组和对照组的叶片C含量分别下降至30.6%和32.1%, 相比于初始值其下降幅度分别是17.8%和13.8%; 实验组和对照组的根茎C含量分别下降到28.3%和30.2%, 相比于初始值其下降幅度分别是21.8%和16.5%; 叶片C含量的下降幅度与根茎相差不大, 实验组和对照组根茎和叶片的C含量比值在实验期间的变化也不明显(图5)。根茎和叶片的C含量在实验组和对照组之间没有显著性差异(表3)。

在初始时, 苦草叶片的N含量是0.94%, 根茎的N含量是0.91%, 在弱光环境下, 叶片和根茎的N含量呈上升趋势, 在实验期间, 实验组和对照组叶片N含量分别下降至2.97%和3.07%, 相比于初始值上

升幅度分别是215%和225%;实验组和对照组根茎的N含量分别下降到1.05%和1.75%,相比于初始值上升幅度分别是15.1%和92.3%;叶片N含量的上升幅度远大于根茎,实验组和对照组根茎和叶片的N含量比值分别从0.97下降到0.35和0.57(图5)。实验组叶片和根茎的N含量均显著性大于对照组(表3,  $P < 0.05$ )。

在初始时,苦草叶片和根茎的游离氨基酸含量分别是0.27和0.21 mg/g,在弱光环境下,叶片和根茎的游离氨基酸含量都呈上升趋势,在实验期间,实验组和对照组叶片的氨基酸含量分别上升到1.22和1.30 mg/g,比初始值上升了347%和374%;实验组和对照组根茎的氨基酸含量分别上升到0.32和0.62 mg/g,相比于初始值上升了49%和190%;叶片的氨基酸含量的上升幅度大于根茎,根茎和叶片的氨基酸含量比值下降,实验组和对照组分别从0.78下降到0.26和0.48(图6)。样本 $t$ 检验表明,实验组根茎的氨基酸含量显著低于对照组(表3,  $P < 0.05$ )。

在初始时,苦草叶片的可溶性糖含量是16.2 mg/

g,根茎的可溶性糖含量是14.1 mg/g,在弱光环境下,叶片的可溶性糖含量在第1周略有上升随后迅速下降,在实验结束时,实验组和对照组叶片的可溶性糖含量分别下降至8.2和9.4 mg/g,相比于初始值下降幅度分别是49%和42%;根茎的可溶性糖含量呈先上升后下降的趋势,实验组根茎的可溶性糖含量上升至29.3后下降至9.0 mg/g,对照组根茎的可溶性糖含量先上升至31.9后下降至5.6 mg/g;实验组根茎和叶片的可溶性糖含量比值从0.87上升至3.9随后下降至1.1,对照组从0.87上升至5.4随后下降至0.60(图6)。叶片和根茎的可溶性糖含量在实验组和对照组之间没有显著性差异(表3)。

在初始时,苦草叶片和根茎的淀粉含量分别是239和286 mg/g,在弱光环境下,苦草叶片和根茎的淀粉含量持续下降,在实验结束时,实验组和对照组叶片的淀粉含量分别下降到19和9 mg/g,相比初始值下降幅度分别是92%和96%;实验组和对照组根茎的淀粉含量分别下降到212和133 mg/g,相比根茎初始值下降幅度分别是26%和53%;叶片淀粉

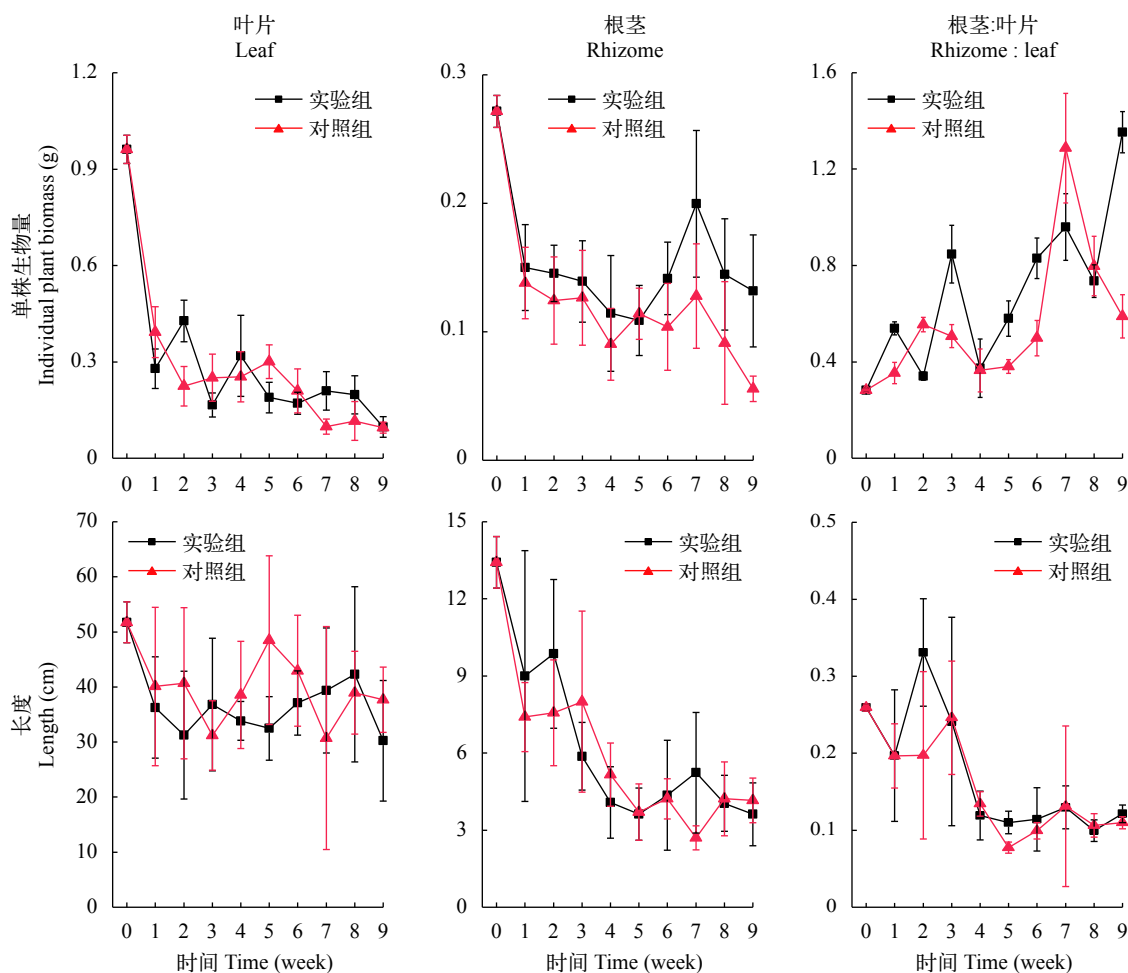


图4 苦草的生长特征变化

Fig. 4 Changes of growth characteristics of *V. natans*

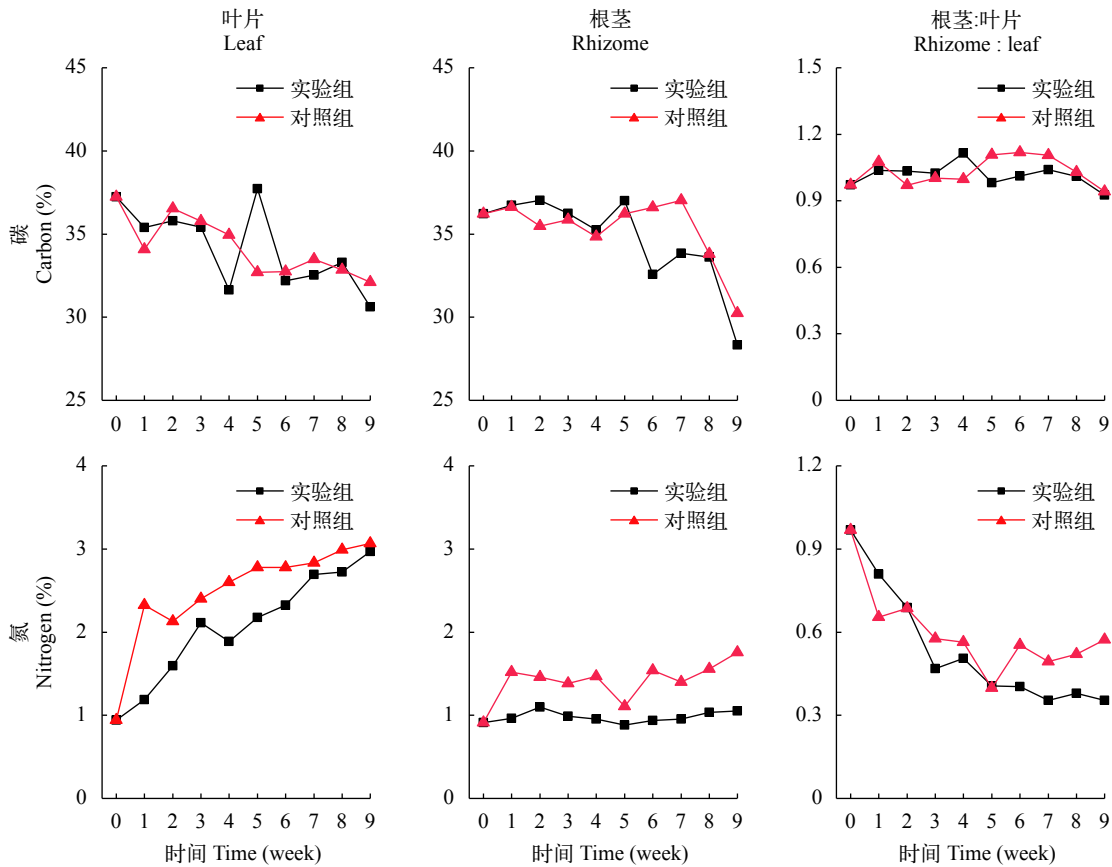


图5 苦草的碳(C)和氮(N)含量变化

Fig. 5 Changes of carbon (C) and nitrogen (N) contents in *V. natans*

含量的下降幅度大于根茎, 根茎和叶片的淀粉含量比值呈上升趋势, 实验组从1.2上升至11.4, 对照组从1.2上升至15(图6)。叶片淀粉含量在实验组和对照组之间没有显著性差异, 而实验组根茎的淀粉含量显著大于对照组(表3,  $P<0.05$ )。

3 讨论

3.1 弱光环境对苦草影响

植物通过光和色素吸收光能, 将无机碳和水转化为有机物, 用于自身合成和代谢, 湖泊底部良好的光照是沉水植物生长的基本前提。在洱海湖心平台所测的湖底光合有效辐射强度平均值是 $10.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 略高于他人研究报道的苦草光补偿点 $9.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[29]</sup>, 所以弱光是苦草植被恢复的主要限制因子。

在实验结束时, 实验桶内的苦草存活数量已稳定下来, 存活数量显著小于初始种植数量。相比于初始状态, 单株苦草的叶生物量、根生物量及根长和叶长均显著性下降。有研究表明, 随水深梯度的增加苦草生物量和和无性系分株数显著性下降, 而株高呈先增加后降低的趋势<sup>[31]</sup>, 本研究结果与其一致。一方面苦草株高和生物量下降, 使其长期处于弱光胁迫下; 另一方面低光照会减弱沉水植物的

表3 样本t检验苦草生理指标在两种底质间的差异显著性分析

Tab. 3 Significant analysis on the difference of physiological indexes of *V. natans* between two kinds of sediment by *t* test

| 部位Position    | 生理指标<br>Physiological index | 底质(P值)<br>Sediment (P) |
|---------------|-----------------------------|------------------------|
| 叶片Leaf        | C含量                         | 0.943                  |
|               | N含量                         | 0.047                  |
|               | 游离氨基酸含量                     | 0.168                  |
|               | 可溶性糖含量                      | 0.501                  |
|               | 淀粉含量                        | 0.306                  |
|               | C含量                         | 0.575                  |
| 根茎<br>Rhizome | N含量                         | 0.000                  |
|               | 游离氨基酸含量                     | 0.002                  |
|               | 可溶性糖含量                      | 0.681                  |
|               | 淀粉含量                        | 0.016                  |
|               | C含量                         | 0.575                  |
|               | N含量                         | 0.000                  |

胁迫耐受能力<sup>[32]</sup>, 两者共同解释了前面苦草存活株数小于初始种植株数的实验结果。苦草叶片的游离氨基酸含量上升, 而C含量、淀粉含量和可溶性糖含量下降, N含量上升; 根茎的游离氨基酸含量上升, 可溶性糖的含量先上升后下降, C含量下降, N含量上升。有文献报道水下光强的大幅降低能导致沉水植物出现生理胁迫, 包括植物组织N含量增加, 碳源性次生化学产物的含量下降, 比如可溶性

糖和酚类<sup>[33, 34]</sup>。苦草的生理响应可见苦草出现一定程度的胁迫反应。

在苦草形态响应弱光环境的过程中, 苦草对不同器官的资源重新分配有一定的差异。相比于初始状态, 苦草根茎和叶片的生物量比值上升, 而根茎与叶片的长度比值下降, 实验结果与张素娟的研究结果一致<sup>[35]</sup>。两种器官相对比, 叶片的生物量损失相对更大, 而长度降低幅度相对较小, 这也反映了苦草为适应弱光环境发生了一些形态上的改变, 因为苦草植株的高度很大程度取决于叶片的长度, 并且苦草需要根的定植才能存活。弱光胁迫可以引起细胞活性氧的产生和积累, 诱导相关酶系统活性增强<sup>[11, 36]</sup>, 氨基酸是合成酶的物质基础, 有许多文献表明游离氨基酸含量是指示环境胁迫的重要生理指标<sup>[37, 38]</sup>。与根茎相比, 苦草叶片的游离氨基

酸含量上升幅度更大, 并且根茎和叶片的氨基酸含量比值大幅降低, 这说明苦草氨基酸的合成主要发生在叶片细胞中, 叶片细胞的胁迫响应更显著。可溶性糖是植物能直接利用的能源物质<sup>[39]</sup>, 在弱光胁迫下, 光合作用合成糖类和ATP的量都很低, 但用于合成氨基酸的能量和糖类的需求增多, 植株需要消耗淀粉分解成糖以提供能量基础, 所以植株储存的碳水化合物的含量与植物对不良环境的耐受能力息息相关<sup>[40]</sup>。苦草叶片的可溶性糖含量大幅降低, 而根茎的可溶性糖含量先升高后下降, 根茎和叶片的可溶性糖含量比值也先升高后下降, 这也表明了根茎细胞对逆境的抵抗能力相对更强; 根茎与叶片的淀粉含量比值大幅升高, 说明叶细胞受到弱光胁迫造成的能量损耗远大于根茎的细胞, 当能量不能满足代谢损耗时, 逆境抵抗能力也因此下降,

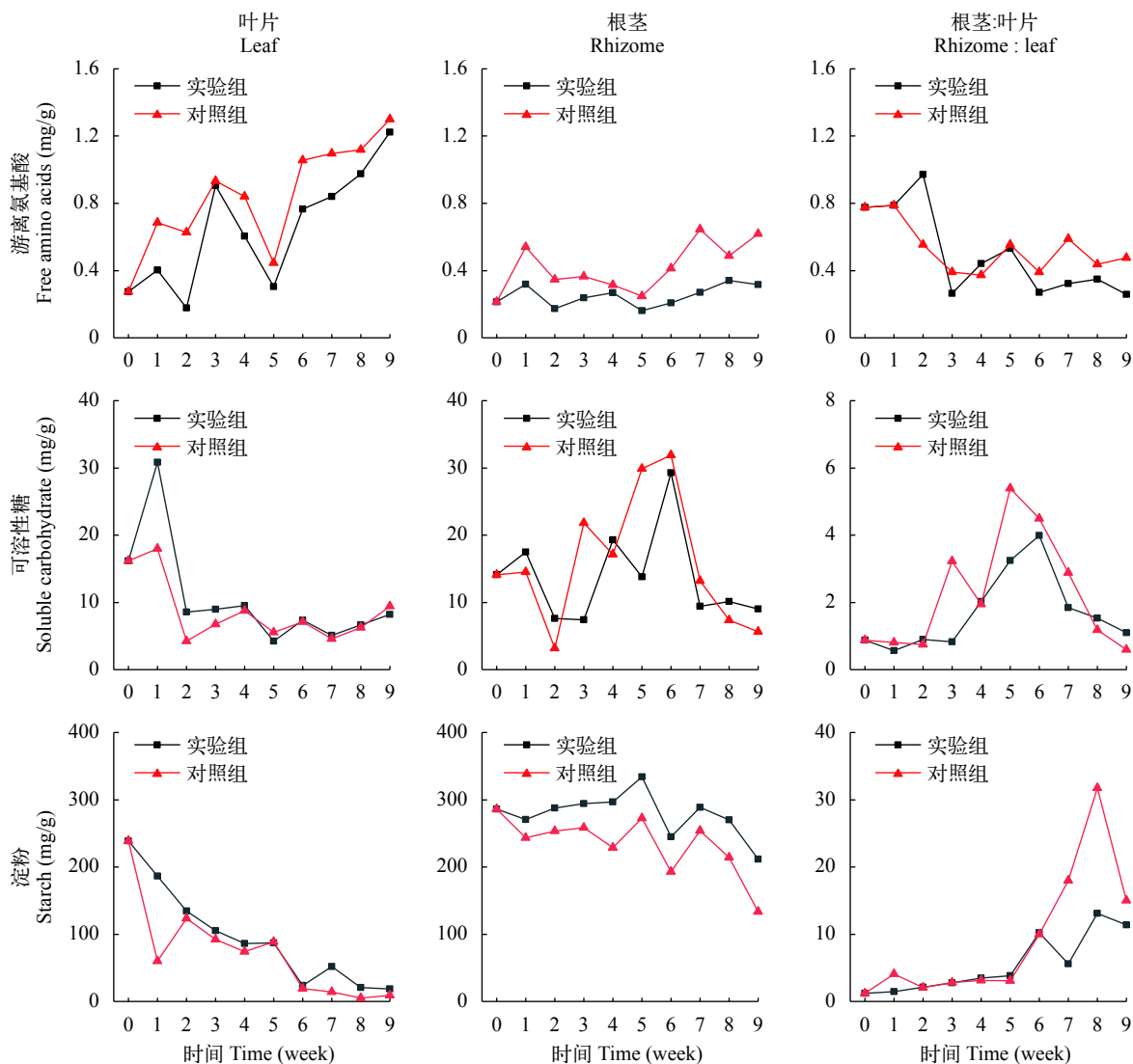


图6 苦草的游离氨基酸、可溶性糖和淀粉含量变化

Fig. 6 Changes of free amino acid, soluble carbohydrate and starch content in *V. natans*

造成细胞死亡。

### 3.2 在弱光环境下不同底质对苦草影响

在实验期间, 淤泥和黏土2种底质下苦草存活数量表现出显著性差异, 在实验结束时, 实验组(黏土底质)和对照组(淤泥底质)存活数量平均值分别是18和10株/桶, 实验组大于对照组。并且底质因素对苦草根茎生物量也显著性影响, 表现为实验组大于对照组。虽然有研究报道在光照合适的条件下, 相比于黏土底质, 苦草更适合在高营养的湖泥中生长<sup>[41, 42]</sup>, 但是在弱光环境下, 底质对沉水植物生长影响的研究却比较少, 并且, 李文朝<sup>[43]</sup>的研究认为, 底质条件是否适合沉水植物生长, 不仅取决于底质本身, 很大程度受制于湖水温度和水深, 30℃且水深远大于1 m时, 底泥和底层湖水中的厌氧环境会引起沉水植物烂根, 另外, 底泥的物理结构与沉水植物的扎根能力和扎根深度密切相关<sup>[44]</sup>, 密度大、孔隙小的黏土在根系的附着上占优势。

在生理特征上, 叶片的N含量及根茎的N含量和氨基酸含量在不同底质处理下有显著性差异, 均表现为实验组小于对照组, 这说明实验组苦草受到程度更小的生理胁迫, 并且不同底质条件苦草根茎的淀粉含量比较, 实验组显著性大于对照组, 这也说明了实验组苦草受到的胁迫损伤相对更小。以上2点均为2种底质条件下苦草存活率和形态特征的差异提供了一定的解释。沉水植物可以直接从底质中吸收氮等营养盐, 并且, 由于氨态氮浓度在底泥中往往比湖水高, 沉水植物吸收的氮主要来源于底泥<sup>[12]</sup>。相对于黏土底质, 淤泥底质的N含量约为黏土的9.9倍, 苦草叶片、根茎的N含量和氨基酸含量在不同底质之间的差异与两种底质N含量的极大差异有关, 另外底泥中有机物含量和底泥营养含量密切相关, 过多的有机物分解可造成底泥缺氧和还原性的状态, 对植物有毒害作用<sup>[45, 46]</sup>, 这也为本次实验结果提供了一个较合理的解释。

综合来看, 在弱光环境下对比于淤泥对照组, 黏土实验组的苦草在生理上表现出幅度更小的胁迫响应, 同时受到相对更小的胁迫损伤, 使其根茎的生物量显著大于对照组, 死亡植株数下降, 存活数量显著大于对照组。所以使用黏土代替本底淤泥的措施对苦草的恢复有利。

### 3.3 苦草恢复的可行性分析和恢复策略

因为对照组底质是在湖心平台退化区直接采取的底泥, 所以对对照组的苦草存活数量和形态特征来看, 虽然在实验结束时, 苦草留有一定的存活数量, 但是苦草形态特征并没有明显的上升现象, 并且实验并未发现有大规模的分株现象, 所以此时

的退化区环境并不适合直接进行沉水植物恢复工程, 应该优先考虑改善环境特征。因为光照是限制苦草生长的主要限制性因子, 应该采取降低水位和 水体营养盐浓度以增加透明度等提高水下光合有效辐射的措施, 或者寻找或驯化出对弱光环境适应性更强的沉水植物品种等。另外, 虽然底质因素对苦草存活数的方差变异解释度只有2.9%, 对根茎的生物量的方差变异解释度只有6.3%, 但是都有显著性影响, 所以, 底质因素也是影响苦草恢复的重要因子, 从淤泥对照组和黏土实验组的对比来看, 黏土实验组存活数量大于淤泥对照组, 黏土底质条件下苦草拥有更高的存活率, 并且黏土底质条件下苦草受到的胁迫损伤相对更小, 所以使用黏土实施底质改善措施对苦草的恢复有积极的作用。

## 4 结论

(1)在平均光强略高于苦草光补偿点的极度弱光[8.3—15.8  $\mu\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ]和水深6.1—6.6 m的洱海湖底, 桶栽的苦草部分死亡, 存活数量下降, 并在形态特征和生理特征上均表现出胁迫响应, 其单株生物量和株高下降, N含量和游离氨基酸含量上升, C含量和淀粉含量下降。(2)苦草不同器官对弱光环境的响应有所差异, 叶片(地上部分)受到的胁迫影响大于根茎(地下部分)。(3)苦草对弱光环境的响应在黏土和湖底淤泥2种不同底质条件下有显著性差异, 苦草在黏土底质上表现出更小的胁迫反应和更高的存活数量, 2种底质相比较, 黏土更适合作为苦草恢复的底质条件。研究表明, 在洱海当前的水质环境下有希望结合局部的底质改善来实现在湖心平台的沉水植物恢复。

### 参考文献:

- [1] Wu Z B. Aquatic Plants and Water Ecological Restoration [M]. Beijing: Science Press, 2011: 66-138. [吴振斌. 水生植物与水体生态修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 66-138.]
- [2] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **200-201**(1): 367-377.
- [3] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, et al. Ecological restoration of aquatic vegetation in a eutrophic shallow lake, Donghu Lake, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, **9**(2): 168-174. [邱东茹, 吴振斌, 刘保元, 等. 武汉东湖水生植被的恢复试验研究 [J]. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 168-174.]
- [4] Chen H D. An approach to the restoration of aquatic vegetation in the Xihu Lake of Hangzhou, with reference to the water quality problem [J]. *Acta Hydrobiologica Sini-*

- ca, 1984, **8**(2): 237-244. [陈洪达. 杭州西湖水生植被恢复的途径与水质净化问题 [J]. 水生生物学报, 1984, **8**(2): 237-244.]
- [5] Ding X Q, Jia Y T, Yang J Y, *et al.* Seed bank in aquaculture area of Honghu lake and the strategy of aquatic vegetation restoration [J]. *Journal of Huazhong Normal University*, 2010, **44**(2): 236-300. [丁小青, 贾延亭, 杨娇艳, 等. 洪湖养殖区水生植物种子库现状及水生植被恢复策略研究 [J]. 华中师范大学, 2010, **44**(2): 236-300.]
- [6] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, *et al.* The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China [J]. *Ecological Engineering*, 2001, **18**(2): 147-156.
- [7] Joanna R, Michal R, Ryszard G. Patterns of macrophyte community recovery as a result of the restoration of a shallow urban lake [J]. *Aquatic Botany*, 2017(138): 45-52.
- [8] Zheng Z M, Song G Y, Zhou Z X, *et al.* Classified conservation and restoration of vegetation in Wuhan urban lake wetlands based on plant diversity characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(24): 7045-7054. [郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等. 基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复 [J]. 生态学报, 2010, **30**(24): 7045-7054.]
- [9] Zhan J C, Huang W D, Wang L J. Research of weak light stress physiology in plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, **20**(1): 43-50. [战吉成, 黄卫东, 王利军. 植物弱光逆境生理研究综述 [J]. 植物学通报, 2003, **20**(1): 43-50.]
- [10] Chen J F, Cao T, Zhang X L, *et al.* Differential photosynthetic and morphological adaptations to low light affect depth distribution of two submersed macrophytes in lakes [J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 1-9.
- [11] Xue W N, Peng Y B, Song X F, *et al.* Effects of light intensity on physiological and biochemical characteristics of *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2012, **40**(7): 4169-4172. [薛维纳, 彭岩波, 宋祥甫, 等. 弱光胁迫对黑藻生理生化特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(7): 4169-4172.]
- [12] Barko J W, Gunnison D, Carpenter S R. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics [J]. *Aquatic Botany*, 1991, **41**(1-3): 41-65.
- [13] Cao T, Ni L Y, Xie P, *et al.* Effects of moderate ammonium enrichment on three submersed macrophytes under contrasting light availability [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(8): 1620-1629.
- [14] Ni L Y. Stress of fertile sediment on the growth of submersed macrophytes in eutrophic waters [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(4): 399-405. [倪乐意. 富营养水体中肥沃底质对沉水植物生长的胁迫 [J]. 水生生物学报, 2001, **25**(4): 399-405.]
- [15] Li H, Shang Y M. Aquatic vegetation in Lake Erhai, Yunnan [J]. *Mountain Research*, 1989, **7**(3): 166-174. [李恒, 尚榆民. 云南洱海水生植被 [J]. 山地研究, 1989, **7**(3): 166-174.]
- [16] Dai Q Y. A preliminary study of the aquatic vegetation in Erhaihu Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1984(4): 31-41. [戴全裕. 洱海水生植被的初步研究 [J]. 海洋湖沼通报, 1984(4): 31-41.]
- [17] Hu X Z, Jin X C, Du B H, *et al.* Submerged macrophyte of Lake Erhai and its dynamic change [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(1): 1-4. [胡小贞, 金相灿, 杜宝汉, 等. 云南洱海沉水植被现状及其动态变化 [J]. 环境科学研究, 2005, **18**(1): 1-4.]
- [18] Han T, Peng W Q, Li H E, *et al.* Research on features and ecological function of plant root channel [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, **3**(1): 71-74. [韩涛, 彭文启, 李怀恩, 等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(1): 71-74.]
- [19] Wu Q L, Wang Y F. On the succession of aquatic communities in Erhai Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, **11**(3): 267-273. [吴庆龙, 王云飞. 洱海生物群落的历史演变分析 [J]. 湖泊科学, 1999, **11**(3): 267-273.]
- [20] Chu Z S, Ye B B, Tian G P, *et al.* Spatial distribution characteristics and estimation of submerged plant biomass in Lake Erhai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(1): 1-5. [储昭升, 叶碧碧, 田桂平, 等. 洱海沉水植物空间分布及生物量估算 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(1): 1-5.]
- [21] Chen Y D. The Chinese Aquatic Plants [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 2012: 256-257. [陈耀东. 中国水生植物 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2012: 256-257.]
- [22] Lowden, Richard M. An approach to the taxonomy of *Vallisneria* L. (Hydrocharitaceae) [J]. *Aquatic Botany*, 1982(13): 269-298.
- [23] Li W, He L, Zhu T S, *et al.* Distribution and leaf C, N, P stoichiometry of *Vallisneria natans* in response to various water depths in a large mesotrophic lake, Lake Erhai, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 585-592. [李威, 何亮, 朱天顺, 等. 洱海苦草(*Vallisneria natans*)水深分布和叶片C、N、P化学计量学对不同水深的响应 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 585-592.]
- [24] Fu H, Yuan G X, Cao T, *et al.* Succession of submerged macrophyte communities in relation to environmental change in Lake Erhai over the past 50 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 854-861. [符辉, 袁桂香, 曹特, 等. 洱海近50a来沉水植被演替及其主要驱动要素 [J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 854-861.]
- [25] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000: 42-54. [黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 42-54.]
- [26] Yemm E W, Willis A J. The estimation of carbohydrates

- in plant extracts by anthrone [J]. *Biochemical Journal*, 1954, **57**(3): 508-514.
- [27] Yemm E W, Cocking E C. The determination of amino acid with ninhydrin [J]. *Analyst*, 1955, **80**(948): 209-213.
- [28] Dirk L M A, Krol A R V D, Vreugdenhil D, *et al.* Galactomannan, soluble sugar and starch mobilization following germination of *Trigonella foenum-graecum* seeds [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1999, **37**(1): 41-50.
- [29] Su W H, Zhang G F, Zhang Y S, *et al.* The photosynthetic characteristics of five submerged aquatic plants [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, **28**(4): 391-395. [苏文华, 张光飞, 张云孙, 等. 5种沉水植物的光合特征 [J]. 水生生物学报, 2004, **28**(4): 391-395.]
- [30] Yan Z Q, Liu M, Wu X Y, *et al.* Influence of temperature on the growth and nutrient removal of five submerged macrophytes [J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(5): 839-844. [闫志强, 刘弼, 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 [J]. 生态科学, 2014, **33**(5): 839-844.]
- [31] Fu H, Yuan G X, Cao T, *et al.* Clonal growth and foraging behavior of a submerged macrophyte *Vallisneria natans* in response to water depth gradient [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(5): 705-711. [符辉, 袁桂香, 曹特, 等. 水深梯度对苦草(*Vallisneria natans*)克隆生长与觅食行为的影响 [J]. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 705-711.]
- [32] Goss R M, Baird J H, Kelm S L, *et al.* Trinexapac-ethyl and nitrogen effects on creeping bentgrass grown under reduced light conditions [J]. *Crop Science*, 2002, **42**(2): 472-479.
- [33] Larsson, Wiren, Lundgren, *et al.* Effects of light and nutrient stress on leaf phenolic chemistry in salix-dasyclados and susceptibility to galerucella-lineola (coleoptera) [J]. *Oikos*, 1986, **47**(2): 5-10.
- [34] Cronin C, Lodge D M. Effects of light and nutrient availability on the growth, allocation, carbon/nitrogen balance, phenolic chemistry, and resistance to herbivory of two freshwater macrophytes [J]. *Oecologia*, 2003, **137**(1): 32-41.
- [35] Zhang S J. The influence of *Vallisneria natans* growth under water gradient/light intensity [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2016: 24-27. [张素娟. 水深/光照对苦草生长的影响研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2016: 24-27.]
- [36] Pan H Y, Li X L, Xu X H, *et al.* Effects of uniconazole on the growth and activities of anti-oxidation enzymes of *Elodea nuttallii* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(12): 6159-6164. [潘慧云, 李小路, 徐小花, 等. 烯效唑对沉水植物伊乐藻(*Elodea nuttallii*)生长及抗氧化酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6159-6164.]
- [37] Cao T, Xie P, Ni L Y, *et al.* The role of  $\text{NH}_4^+$  toxicity in the decline of the submerged macrophyte *Vallisneria natans* in lakes of the Yangtze River [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2007, **58**(6): 581-587.
- [38] Zou L S, Nie Z Y, Yao X Y, *et al.* Effects of light on submerged macrophytes in eutrophic water: Research progress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(7): 2073-2080. [邹丽莎, 聂泽宇, 姚笑颜, 等. 富营养化水体中光照对沉水植物的影响研究进展 [J]. 应用生态学报, 2013, **24**(7): 2073-2080.]
- [39] Lambers H. The physiological significance of cyanide-resistant respiration in higher plants [J]. *Plant Cell & Environment*, 1980, **3**(5): 293-302.
- [40] Myers J A, Kitajima K. Carbohydrate storage enhances seedling shade and stress tolerance in a neotropical forest [J]. *Journal of Ecology*, 2007, **95**(2): 383-395.
- [41] Lei Z X, Xie Y F, Liu Z W. Effects of different sediments from Meiliang Bay of Taihu Lake on the growth of three submersed aquatic macrophytes [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Science)*, 2006, **40**(2): 125-129. [雷泽湘, 谢贻发, 刘正文. 太湖梅梁湾不同沉积物对3种沉水植物生长的影响 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, **40**(2): 125-129.]
- [42] Xie Y F, Li C H, Liu Z W, *et al.* Effects of sediments on the growth and morphology of *Vallisneria natans* [J]. *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 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1269-1272.]
- [43] Li W C. On the adaptiveness of aquatic macrophyte to the sediment in Wuli Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996(8): 30-36. [李文朝. 五里湖底质条件与水生高等植物的适应性研究 [J]. 湖泊科学, 1996(8): 30-36.]
- [44] Denny P. Solute movement in submerged angiosperms [J]. *Biological Reviews*, 2008, **55**(1): 65-92.
- [45] Squires M M, Lesack L F W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta [J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2003, **60**(3): 333-343.
- [46] Ni L Y. Effects of Water column nutrient enrichment on the growth of *Potamogeton maackianus* A. Been [J]. *Journal of Aquatic Plant Management*, 2001, **39**(1): 83-87.

## GROWTH AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF *VALLISNERIA NATANS* UNDER EXTREME LOW LIGHT AND TWO SUBSTRATE CONDITIONS

ZHANG Zhong-Hai<sup>1</sup>, YANG Tong<sup>2</sup>, WEN Zi-Hao<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-Lin<sup>1</sup>, CAO Te<sup>1</sup>, NI Le-Yi<sup>1</sup> and YUAN Chang-Bo<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Dali Erhai Lake Administration, Dali 671000, China)

**Abstract:** In restoration of aquatic vegetation in the degraded area of shallow lakes, it is necessary to study the effects of low light stress and sediment types on aquatic plants. *Vallisneria natans* has strong tolerance to low light and sediment, and can be selected as a restoration species. The central part of the southern Erhai Lake (a mesotrophic lake in Yunnan Province, China) is flat, with an average annual water depth of about 6.3 m, which was called the “lake center platform” (LCP). Large areas of aquatic vegetation, including *V. natans*, was used to exist in LCP, it played important roles in the lake ecological function, but has completely disappeared since 2003. So, we chose *V. natans* as experimental material, and set two kinds of sediment conditions to study the morphological and physiological responses of *V. natans* under weak light of LCP and two kinds of sediment (clay and silt) environment, in order to explore the effect of substrate improvement on the restoration of *V. natans*. The results showed that: (1) Under the extremely low light environment, the survival number of *V. natans* decreased, and it also showed morphological and physiological responses to stress. The biomass and length of leaf and rhizome decreased in both sediments, and the contents of carbon (C), soluble carbohydrate and starch decreased, but the contents of free amino acid (FAA) and nitrogen (N) increased. The low light intensity inhibited the growth of *V. natans* and caused some plant deaths. (2) The effect of weak light stress on leaves in both sediments was greater than that on rhizome, which was shown in the increasing biomass ratio of rhizome and leaf. The physiological stress response of leaves was relatively greater than that of rhizomes, which was reflected in the decrease in the ratio of N and FAA contents, and the increase in the ratio of soluble carbohydrate and starch contents. (3) There were significant differences in the responses of *V. natans* to weak light environment under different sediment conditions, which was shown below: the survival number, starch content and biomass of rhizome in clay group were higher than those in sludge group, while FAA and N contents of leaves were lower. This attempt indicated that under the current water quality environment, it was possible to achieve the restoration of submerged plants in the LCP by combining with local sediment improvement.

**Key words:** Weak light stress; Sediment; Restoration of aquatic vegetation; *Vallisneria natans*