

不同温度培养下荇菜(*Nymphoides peltata*) 生长与光合作用特征*

施 娴^{1,2}, 陈开宁^{1**}, 黄 蔚^{1,2}, 杨 鑫^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以太湖东山与西山之间水域的荇菜根茎为实验材料,在室内分别进行3种温度(28、30、32℃)处理,利用Li-6400便携式光合作用测量系统,分别测定3种温度处理下荇菜的光响应曲线和CO₂响应曲线,并且利用非直角双曲线法进行拟合,得到相关参数.结果表明,3种温度下,荇菜的光合能力大小顺序表现为30℃ > 32℃ > 28℃,羧化效率为32℃ > 30℃ > 28℃,蒸腾速率、气孔导度均为30℃ > 28℃ > 32℃;28、30和32℃下的单位叶片生物量分别为0.0019 ± 0.0002、0.0021 ± 0.0003、0.0020 ± 0.0003 g(DW)/cm²,叶片及其单位面积生物量为30℃ > 28℃ > 32℃,但差异不显著;30℃下的根、茎干重显著高于另外2个温度下的.在低于30℃的温度条件下,随着温度的升高,荇菜的光合能力均明显升高,促进了植物的生长;而当温度超过30℃后,光合作用效率降低,植物的生长则受到抑制.在适宜温度范围内(<30℃),小幅度的升温(2℃)产生了显著的积温效应(200℃·d),促进了荇菜的生长.因此推断,1998—2006年太湖地区平均气温升高约1.0℃的现象对近年来太湖荇菜的大面积扩张可能具有促进作用.

关键词: 荇菜;光合作用;生物量;积温

Growth and photosynthesis characteristics of the *Nymphoides peltata* under different temperatures

SHI Xian^{1,2}, CHEN Kaining¹, HUANG Wei^{1,2} & YANG Xin^{1,2}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: Roots of *Nymphoides peltata* collected from Lake Taihu were cultured under three different temperatures (28, 30, 32℃). The biomass under such different temperature conditions were 0.0019 ± 0.0002, 0.0021 ± 0.0003 and 0.0020 ± 0.0003 g (DW)/cm², respectively. Meanwhile, the dry weight of stem and root was maximum under 30℃ than other treatments that had significant difference; the order of the dry weight and biomass per unit area of leave was 30℃ > 28℃ > 32℃. Light response curves and ACI curves were determined by a Li-6400 portable photosynthesis analysis system, and the non-rectangular hyperbolic method was used to fit the curve to obtain relevant photosynthetic parameters. The results showed that the influences of temperature on order of *N. peltata* photosynthetic capacity was 30℃ > 32℃ > 28℃, the order of carboxylation efficiency was 32℃ > 30℃ > 28℃, transpiration efficiency and stomatal conductance showed the same trend, 30℃ > 28℃ > 32℃. The photosynthetic capacity of *N. peltata* increased significantly with the increasing temperature, and the growth of *N. peltata* was promoted; however, the photosynthetic efficiency reduced when the temperature exceeded 30℃ with the suppression of *N. peltata*. In the appropriate temperature range (< 30℃), small amplitude warming (2℃) produced a significant effect of accumulated temperature (200℃·d), which promote the growth of *N. peltata*. It is deduced that the phenomenon that the average temperature of Lake Taihu increased about 1℃ during 1998–2006 may promote the expansion of *N. peltata* in Lake Taihu in recent years.

Keywords: *Nymphoides peltata*; photosynthesis; biomass; accumulated temperature

* 国家自然科学基金项目(41171413)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07103-002)联合资助.
2012-07-27 收稿;2013-01-13 收修改稿. 施娴,女,1988年生,硕士研究生;E-mail: sx881021@126.com.

** 通信作者;E-mail: knchen@niglas.ac.cn.

荇菜(*Nymphoides peltata*), 龙胆科荇菜属植物, 一种多年生根着浮叶植物, 广泛分布于中国南北各地, 日本和朝鲜等地也有分布, 通常生长在池塘和湖泊、静水体中^[1]. 荇菜属植物多分布于内陆水域浅水环境, 常生长在挺水植物与敞水区之间的过渡带, 分布的水深范围通常可达 2.2 m, 在一些浅水湖泊中分布的面积覆盖度可达 18%~70%^[2], 对淡水生态系统具有广泛影响. 在我国, 荇菜属植物在南北各省均有分布^[3].

据 2004 年和 2008 年 5 月—2009 年 4 月的现场调查, 荇菜和金银莲花种群在太湖东南部水域(除东太湖, 其受人类活动干扰强烈而覆盖面积较少)覆盖面积已达 76.7 km²(占全湖面积 3.47%), 局部湖区(如胥口湾和东西山之间)覆盖度已接近 40%; 从全湖范围看, 覆盖度较 2004 年调查时扩大了 63.7% (2004 年: 2.12%; 2008—2009 年: 3.47%)^[4]. 浮叶植物茂密生长将严重影响阳光对水下的照射, 使得下层的沉水植物不能正常进行光合作用, 最终导致沉水植物消亡, 进而对水质乃至整个水域生态系统产生巨大的负面影响. Larson 研究了不同覆盖度下荇菜生长对 2 种沉水植物(*Ceratophyllum demersum* 和 *Elodea canadensis*) 生长率的影响, 实验表明, 随着荇菜覆盖度的增大, 2 种沉水植物的生长率随之下降^[5]. Marion 等利用物质平衡方法研究了法国西部的 Grand-Lieu 湖中浮叶植物(2 种荇菜属植物 *Nymphaea alba* 和 *N. peltata*, 1 种菱属植物 *Trapa natans*) 对流域内输入湖泊水体氮、磷营养的影响, 发现 1997 年 *N. alba* 覆盖面积达到 75% 时, 有 50%~72% 的氮和 46%~70% 的磷储存在浮叶植物体内, 浮叶植物对该湖泊水体中氮、磷的年负荷量贡献比例分别达到 3.35%~5.00% 和 16.80%~156.25%^[2], 可见荇菜对湖泊水体营养物质循环有很大的影响. 可想而知, 荇菜在太湖的不断扩张不但会直接影响到东南部水域航运和渔业生产, 同时也会对湖泊生态系统产生较大的影响.

此外, 在全球变暖的大趋势下, 太湖流域也于 1970s 经历了一个缓慢的增温过程. 监测表明^[6], 太湖流域自 1991 年开始进入显著性增温时期, 1991—2000 年平均气温比多年平均气温高出约 0.4℃, 而且增温幅度随时间不断增大. 这一结果与姜彤等^[7]对长江流域年平均气温的分析结论比较接近, 该分析结论表明, 1991—2006 年平均气温比多年平均气温高出约 0.7℃, 1998—2006 年平均气温更是比多年平均气温高出约 1.0℃, 温度升高趋势显著, 且表现出最低气温上升幅度大于最高气温上升幅度的变化趋势. 已有研究表明^[8-11], 全球变暖对陆生植物的生长和物候变化等会产生一定的影响. 在全球气候变暖的大趋势下, 是否也对水生植物, 如太湖的荇菜生长产生影响呢? 气候变暖是否是荇菜属植物在太湖快速扩张的驱动因子? 现阶段该方面的研究较匮乏.

光合作用是衡量植物生长状况的一个重要指标, 是描述植物生长状况以及生长发育的基础, 植物的光响应曲线、CO₂ 响应曲线反映的正是光合速率随着光照强度、CO₂ 浓度的变化特性, 这种曲线的测定对于判定植物的光合能力非常有效^[12-16]. 陈维^[17]在探究环境因素对光合作用强度的影响中证实: 在 0~40℃ 温度范围内, 随着温度的升高, 光合作用产生的氧气量也在升高, 表明温度适度升高可以提高光合作用的强度; 当温度达到 50℃ 时, 光合作用产生的氧气量开始下降, 说明温度太高将直接影响光合作用的进程. 本文通过室内不同温度下的受控实验, 研究荇菜生长与光合作用特征对温度变化的响应, 着重探讨全球气候变暖可能对荇菜生长产生的影响, 为分析近年来荇菜属植物在太湖迅速扩张的机制提供基础数据.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

供试的荇菜克隆株于 2011 年 12 月采自江苏太湖东、西山之间的水域(31°7'N, 120°22'E), 而后在实验室流水中培养. 同时取太湖相同水域的底泥, 充分混匀后作为荇菜培养基质, 其总氮含量为 1306.36 mg/kg, 总磷含量为 398.25 mg/kg.

1.2 实验设计

本实验为室内控制实验, 实验时间为 2012 年 3 月 1 日—5 月 20 日, 荇菜培养用室内日光灯照射, 光照强度为 150 μmol photons/(m²·s), 光暗比为 14 h:10 h. 选取形态、大小相似的荇菜克隆株(克隆株鲜重为 1.5±0.2 g(FW), 植株上带有 2 个小叶片), 随机植入装满太湖底泥的白色塑料盒中(长×宽×高=30 cm×25 cm×10 cm), 每个塑料盒中植入 1 个克隆株. 然后将塑料盒放入装满水的 80 cm×60 cm×110 cm 玻璃缸中. 培养水为经过 24 h 曝气的自来水, 玻璃缸的换水周期为一周 2 次, 水体总氮浓度为 2.18 mg/L, 总磷浓度为 0.04 mg/L, 玻璃缸内设置 3 种温度: 使用波茵智能型温控器和加热棒进行温度控制, 保证玻璃缸水体的温度

梯度为 28 ± 0.5 、 30 ± 0.5 和 32 ± 0.5 °C. 每个处理设置 3 个重复.

1.3 实验方法

在 2012 年 5 月 20 日利用 Li-6400 便携式光合作用分析仪(Li-cor, USA)对苜蓿菜成熟叶片进行测定,获得苜蓿菜叶片的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线. 在每个温度梯度下,分别选取大小相似、生长状态相近的叶片 3 片,作为重复. 为保证其它环境因子稳定适宜,测定过程中,叶温设置为 28 °C,相对湿度设置为 80%.

1.3.1 光响应曲线的测定 CO₂ 浓度设置为 380 $\mu\text{mol}/\text{mol}$. 测定过程使用 Li-6400 的人工光源(Li-6400-02B 红蓝光源),并手动设置光强为 0、20、50、80、100、150、300、500、700、900、1000、1100、1200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每个温度梯度下,分别选取大小相似、生长状况相近的 3 片叶片作为重复.

1.3.2 CO₂ 响应曲线的测定 参照上述光响应曲线的测定结果,将植物叶片 CO₂ 响应曲线测定时的人工光源设为 900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每个温度梯度选取 3 片叶子(标准如前),手动设置 CO₂ 浓度为 400、300、200、100、50、400、600、800、1000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,由系统自动记录不同的 CO₂ 浓度所对应的净光合速率.

1.3.3 蒸腾速率和叶片气孔导度测定 在测定光响应曲线的同时,系统自动测定叶片的蒸腾速率和气孔导度,获得每个时刻叶片的蒸腾速率和气孔导度数据,对每个时刻的蒸腾速率和气孔导度进行作图,可得出苜蓿菜叶片在 3 种温度下蒸腾速率和气孔导度曲线.

1.3.4 植物生物量测定 对植物叶片使用 Li-6400 测定结束后,取出所培养的植物,洗净后分出苜蓿菜叶片、根系、茎 3 部分,利用根系扫描仪 EPSON TWAIN PRO(32 bit)和 WinRHIZO 专业根系分析系统对每株苜蓿菜上的全部叶片、根系和茎进行扫描,对根系长度、表面积以及体积等指标进行测定分析,并且将扫描后的叶片、根系和茎在 80 °C 条件下烘干至恒重后称量干重(DW),计算苜蓿菜叶片单位面积生物量.

1.4 数据分析

用 Origin 8.5 统计软件对 Li-6400 光合作用分析仪测量的数据进行分析,同时运用光合助手^[18] 计算出系列光合特征参数,并且采用非直角双曲线法进行拟合,表示为:

$$P_n = \frac{\alpha \cdot I + P_{\max} - \sqrt{(\alpha \cdot I + P_{\max})^2 - 4\alpha \cdot I \cdot k \cdot P_{\max}}}{2k} - R_{\text{day}}$$

式中, P_n 为净光合速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); I 为光量子通量密度 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); R_{day} 为暗呼吸速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); k 为参数; P_{\max} 为光饱和时的最大净光合速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); α 为初始量子效率,是光响应曲线的初始速率,表示植物光合作用对光的利用效率; α 与 P_{\max} 是描述光合作用光响应特征的参数.

2 结果

2.1 光响应曲线

采用非直角双曲线法拟合光响应曲线,并利用光合助手软件得出系列光响应曲线的特征参数(表 1),结果表明不同温度下苜蓿菜生长的光响应曲线特征参数存在着一定的差异. 对各特征参数比较可看出,3 种温度下苜蓿菜光响应曲线的表观量子利用效率(AQE)、光饱和点(LSP)和最大光合速率(A_{\max})三者大小顺序均表现为: $30^\circ\text{C} > 32^\circ\text{C} > 28^\circ\text{C}$. 暗呼吸速率(R_{day})和光补偿点(LCP)均随着温度的升高依次降低,表现为 $28^\circ\text{C} > 30^\circ\text{C} > 32^\circ\text{C}$.

表 1 3 种温度下苜蓿菜生长光响应曲线的特征参数

Tab. 1 The parameters of light response curves of *Nymphoides peltata* under three temperature conditions

温度/°C	表观量子利用效率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	最大光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)
28	0.06690	-1.2356	18.5333	173.3333	10.3800
30	0.06923	-1.0676	15.7333	219.3333	13.6333
32	0.06880	-0.7623	11.8333	176.6667	10.9000

光响应曲线反映了植物光合速率随光照强度变化而变化的规律. 当光强为 0 时,苜蓿菜的净光合速率为负值;之后随着光强的增大,净光合速率明显上升;而当光强达到一定值后,净光合速率增加的幅度就逐

渐减慢,最后达到一定限度,不再随光强的增加而增加,即达到光饱和(图 1a). 3 种温度下的光响应曲线对比可以看出,苜蓿的光合速率在 3 种温度下都较大,并且 $30^{\circ}\text{C} > 32^{\circ}\text{C} > 28^{\circ}\text{C}$,由此说明, 30°C 很有可能是苜蓿生长的适宜温度.

2.2 CO_2 响应曲线

在苜蓿的光饱和点附近,测定其功能叶在不同 CO_2 含量条件下的光合速率,得到植物叶片的 ACI 曲线——二氧化碳响应曲线(图 1b). 对 3 种温度下苜蓿叶片的 ACI 曲线比较可以看出, CO_2 响应曲线的变化趋势与光响应曲线一致,呈现出类似的变化规律,即 $30^{\circ}\text{C} > 32^{\circ}\text{C} > 28^{\circ}\text{C}$. 对 ACI 曲线分析计算得出一系列 CO_2 响应曲线的特征参数, $28, 30, 32^{\circ}\text{C}$ 下呼吸速率(R_{ep})分别为 $-4.1676, -3.4980, -6.1645 \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, RuBP 最大再生光合速率(A_{max})分别为 $23.700, 34.545, 25.440 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 羧化效率(CE)分别为 $0.0716, 0.0726, 0.1337 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

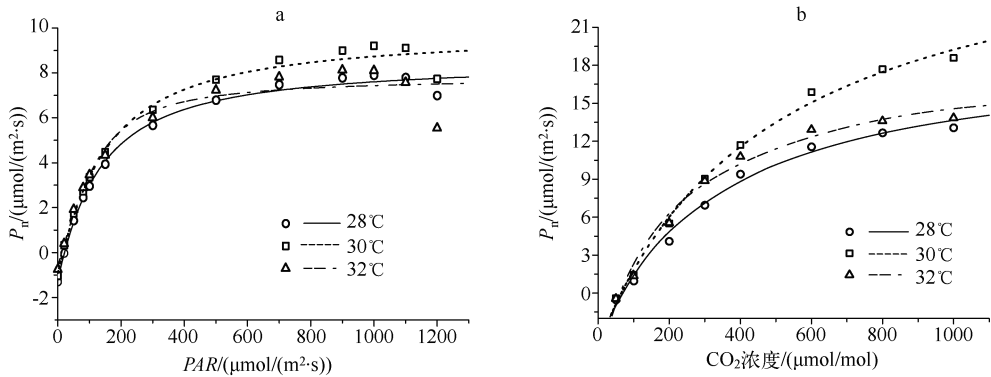


图 1 3 种温度下苜蓿的光响应曲线(a)和 ACI 曲线(b)

Fig. 1 The light response curves(a) and ACI curves(b) of *Nymphaoides peltata* under three temperature conditions

2.3 蒸腾速率和叶片气孔导度曲线

对 3 种温度下苜蓿叶片的蒸腾速率和气孔导度进行作图比较可得,两者的变化趋势与光响应曲线和 CO_2 响应曲线也基本一致(图 2). 3 条蒸腾速率曲线可以看出,随着光照强度的增大,蒸腾速率也随之增大;然而,对于气孔导度来说,当光强从 0 增加到某一阈值(约为 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),气孔导度随着光强的增大而增加,而当光照超过这个阈值后,光照的增强导致气孔导度的降低. 蒸腾速率、气孔导度均表现为 $30^{\circ}\text{C} > 28^{\circ}\text{C} > 32^{\circ}\text{C}$ (图 2).

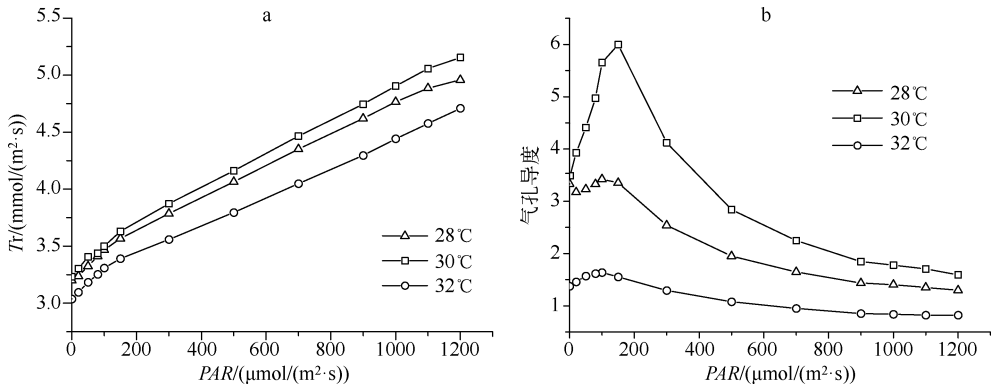


图 2 3 种温度下苜蓿的蒸腾速率曲线(a)和叶片气孔导度曲线(b)

Fig. 2 The transpiration rate(a) and stomatal conductance(b) curves of *Nymphaoides peltata* under three temperature conditions

2.4 不同温度下苜蓿菜生物量的变化

植物生物量是衡量植物生长状态的一个很显著的表征参数. 3种温度下苜蓿菜的叶、根和茎在80℃下烘干称重可看出(表2),叶、根和茎生物量在30℃下均最大,并且根、茎的生物量显著高于另外2种温度下的数值($P < 0.05$),30℃下的叶片生物量也显著高于28℃下的叶片生物量($P < 0.05$),但与32℃条件下的叶片生物量没有显著差异($P > 0.05$). 利用WinRHIZO根系分析系统对苜蓿菜叶片进行扫描分析,获得每株苜蓿菜的总叶面积,从而计算出每株苜蓿菜叶片单位面积的生物量(表2),大小顺序表现为30℃ > 28℃ > 32℃,但是差异不显著.

表2 3种温度下苜蓿菜的叶、根、茎干重以及叶片单位面积生物量*

Tab. 2 The dry weight of leaf, root and stem, and per unit area biomass of the leaf of *Nymphoides peltata* under three temperature conditions

温度/℃	叶/g(DW)	根/g(DW)	茎/g(DW)	叶片单位面积生物量/(g(DW)/cm ²)
28	22.1165 ± 8.8082 ^a	0.0628 ± 0.0438 ^b	0.0519 ± 0.0019 ^b	0.0019 ± 0.0002 ^a
30	33.9444 ± 6.2131 ^b	0.4265 ± 0.1157 ^a	0.5494 ± 0.0967 ^a	0.0021 ± 0.0003 ^a
32	29.2148 ± 9.0747 ^b	0.1234 ± 0.0592 ^b	0.2551 ± 0.2317 ^b	0.0020 ± 0.0003 ^a

* 同一列字母不同表示差异显著($P < 0.05$);表中数据为平均数 ± 标准差.

3 讨论

3.1 苜蓿菜光合特征对温度变化的响应

在一定环境条件下,叶片的最大光合速率(A_{max})表示叶片的最大光合能力,表观量子利用效率(AQE)反映叶片对光能的利用情况,尤其是对弱光的利用能力^[19],呼吸速率(R_{day})则与叶片的生理活性有关. 通过对3种温度下苜蓿菜生长的光响应曲线特征参数进行比较分析可以看出:30℃下,苜蓿菜叶片的光合同化潜力最大,对弱光的利用能力最强;28℃下,叶片的光合同化潜力最小,对弱光的利用能力弱. 同时,3种温度下植物的光合速率均随CO₂含量的增加而增大,当CO₂含量达到一定值时,光合速率达到最大,即达到CO₂饱和,之后随CO₂含量增加,其光合速率下降. 其原因可能是当CO₂含量增大到某个阈值后,含量过高而引起细胞中pH值发生了改变,叶片保卫细胞的膨压下降,使得气孔的开度减小,进一步影响了叶片的净光合速率^[20-21].

叶片是植物的光合器官,也是对环境条件变化较为敏感的营养器官,其表型特征和生理生化特征都能体现环境因子变化的影响或对环境的适应. 在一定温度范围内,植物的光合作用随温度的升高而升高^[22]. 植物的光合作用和蒸腾作用相互联系、相互影响. 从苜蓿菜蒸腾速率和气孔导度图可以看出(图2),在28℃时由于温度较低,气孔导度明显小于30℃下的气孔导度,蒸腾作用变慢,光合作用与此同时也有一定程度的减弱;而32℃下苜蓿菜气孔导度低于30℃下的气孔导度,说明超过一定温度范围后,相对的高温条件会导致叶片气孔的部分关闭,营养物的运输将会产生一定程度的限制,CO₂供应不足,这些因素必然导致光合速率急剧下降,光合作用受到抑制,最终影响植物生长. 因此,在光合作用和蒸腾作用两者的相互调控下,30℃下苜蓿菜叶片的气孔导度最大,从而加快了蒸腾作用,这样有利于水和二氧化碳等原料在植物体内的运输;另一方面,营养物质的运输和蒸腾作用的推动力同时促进苜蓿菜的光合作用,因此植物在较高的光合作用和蒸腾作用等生理过程的作用下长势较好. 苜蓿菜光合特征参数表现为30℃ > 28℃ > 32℃.

3.2 太湖苜蓿菜生长对温度变化的响应

对苜蓿菜生物量、叶片面积以及叶片单位面积生物量等参数进行分析可以看出,3种温度下植物的生长状况都较为良好,在30℃下植物各项生长参数达到最大,生长趋势为30℃ > 28℃ > 32℃. 28、30和32℃下苜蓿菜的积温分别为2240、2440、2560℃·d,其中30℃下比28℃下增加了200℃·d,对植物体增温效果显著. 在适宜的温度范围内,由于植物生长期内的积温增加显著,植物的生长必然会得到一定程度的促进. 虽然近年来太湖水体的温度小幅度升高^[6],积温却显著增加,这种现象可能会促进植物的生长^[23-26]. 例如,张宇等根据不同熟性的玉米潜在产量和积温关系的理论模型推算^[24],东北地区年均增温1℃,玉米增产率可达到5%~8%. 因此,在相对适宜的温度范围内,全球变暖所引起的积温增加将会促进苜蓿菜的生长,加速苜蓿菜种群的扩

张,这可能是荇菜属植物在太湖水域迅速扩张的一个外在因素.

此外,监测数据和文献资料显示^[6-7],夏季太湖敞水区水温在大部分时间小于 30℃,荇菜茂密生长的同时叶片在一定程度上相互或多或少地起到了一定的遮荫作用,使得大量生长的荇菜一般情况下不会受到高温的限制.

4 结论

在 28、30、32℃ 水温条件下,荇菜的光饱和点分别为 173.3333、219.3333、176.6667 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最大光合速率分别为 10.3800、13.6333、10.9000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;蒸腾曲线和气孔导度曲线显示,30℃ 下的荇菜具有较高的光合能力和蒸腾速率;从荇菜生物量上看,30℃ 下的叶、根、茎生物量分别为 33.9444 \pm 6.2131、0.4265 \pm 0.1157、0.5494 \pm 0.0967 g(DW),明显高于另外 2 种温度下的数值;综合实验结果表明 30℃ 条件下荇菜生长状况最好.

在适宜温度范围内(< 30℃),尽管温度小幅度地升高(2℃),但是较显著的积温效应(200℃·d)促进了荇菜的生长.因此,1998—2006 年太湖地区平均气温升高约 1.0℃ 的现象可能对近年来太湖荇菜的大面积扩张具有促进作用.

5 参考文献

- [1] 李扬汉. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社, 1998: 511-512.
- [2] Marion L, Paillisson JM. A mass balance assessment of the contribution of floating-leaved macrophytes in nutrient stocks in an eutrophic macrophyte-dominated lake. *Aquatic Botany*, 2003, **75**(3): 249-260.
- [3] 丁小余, 金飞宇, 张如志等. 荇菜营养器官的形态结构及生态适应性研究. 南京师大学报, 2003, **16**(3): 71-78.
- [4] 陈开宁. 富营养化浅水湖泊生态恢复机理与技术研究——以太湖五里湖生态恢复为例[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2007.
- [5] Larson D. Growth of three submerged plants below different densities of *Nymphaoides peltata* (S. G. Gmel.) Kuntze. *Aquatic Botany*, 2007, **86**(3): 280-284.
- [6] 黄俊雄, 徐宗学. 太湖流域 1954—2006 年气候变化及其演变趋势. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(1): 33-40.
- [7] 姜彤, 苏布达, 王艳君等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势. 气候变化研究进展, 2005, **1**(2): 65-68.
- [8] 王谋, 李勇, 黄润秋等. 气候变暖对青藏高原腹地高寒植被的影响. 生态学报, 2005, **25**(6): 1275-1281.
- [9] 肖春旺, 张新时. 鄂尔多斯高原 3 种优势灌木幼苗对气候变暖的响应. 植物学报, 2001, **43**(7): 736-741.
- [10] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, 1995, **50**(5): 402-410.
- [11] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠等. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, **26**(3): 923-929.
- [12] 谭芳林, 薛建辉, 张水松等. 不同混交模式防护林中湿地松的光合特性. 南京林业大学学报, 2003, **27**(4): 35-38.
- [13] 庄猛, 姜卫兵. 金叶女贞与小叶女贞光合特性的比较研究. 南京农业大学学报, 2007, **30**(2): 75-78.
- [14] 龚伟, 宫渊波. 湿地松幼树冠层光合作用日变化及其影响因素. 浙江林学院学报, 2006, **23**(1): 58-61.
- [15] 梁开明, 曹洪麟, 徐志防等. 台湾青枣及野生种的光合作用日变化及光响应特征. 园艺学报, 2008, **21**(6): 95-99.
- [16] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀等. 毛竹光合动态研究. 林业科学研究, 2005, **18**(5): 551-555.
- [17] 陈维. 探究环境因素对光合作用强度的影响. 生物学通报, 2008, **43**(2): 55-57.
- [18] 叶子飘, 康华靖, 陶月良等. 以“光合助手”计算光合参数的一些问题. 植物生理学通讯, 2010, **46**(1): 67-70.
- [19] 王勋陵, 王静. 植物形态结构与环境. 兰州: 兰州大学出版社, 1989: 1-90.
- [20] 张其德, 卢从明, 匡廷云. 大气 CO₂ 浓度升高对光合作用的影响. 植物学通报, 1992, **9**(4): 18-23.
- [21] 李伏生, 康绍忠. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对作物生理生态的影响. 应用生态学报, 2002, **13**(9): 1169-1173.
- [22] 屠曾平. 水稻光合特性研究与高光效育种. 中国农业科学, 1997, **30**(3): 28-35.
- [23] 张厚玻, 张翼. 中国活动积温对气候变暖的响应. 地理学报, 1994, **49**(1): 27-36.
- [24] 张宇, 王石立. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. 应用气象学报, 2000, **11**(3): 264-270.
- [25] 赵峰, 千怀遂. 全球变暖影响下农作物气候适宜性研究进展. 中国生态农业学报, 2004, **12**(2): 134-137.
- [26] 缪启龙, 丁园圆, 王勇等. 气候变暖对中国热量资源分布的影响分析. 自然资源学报, 2009, **24**(5): 934-944.