

两种浮萍植物的叶绿体超微结构 对模拟酸雨的敏感性

林植芳, 彭长连, 徐信兰, 林桂珠

(中国科学院华南植物园, 广东数字植物园重点实验室, 广州 510650)

摘要: 用蒸馏水和不同 pH 值(5.5, 4.5, 3.5 和 2.5) 的模拟酸雨培养浮萍(*Lemna minor* L.)和紫萍(*Spirodela polyrrihiza* (L.) Schleid) 48 h 后, 测定叶状体膜系统渗漏率, 观察叶绿体超微结构的变化。结果表明, 随酸雨 pH 的下降, 两种浮萍叶状体的膜系统渗率增大, 叶绿体超微结构受损。浮萍和紫萍对酸雨的敏感性和伤害时细胞与叶绿体形态变化显示一定的种间差别。浮萍的结构性损伤始于 pH 4.5, 原生质体收缩, 出现质壁分离, 基粒结构混乱; pH 3.5 时叶绿体肿胀呈球状, 片层结构破坏并出现许多空泡。紫萍在 pH 3.5 时膜系统的外渗率仍较低, 基粒和基质类囊体结构无明显改变; pH 2.5 时叶绿体结构才出现严重伤害, 但未见明显的肿胀与质壁分离现象。因此认为在两种浮萍的共生水体中, 紫萍对酸雨污染有较强的生存竞争能力, 而浮萍则可用作 pH<4.5 水体的灵敏指示植物。

关键词: 浮萍; 紫萍; 模拟酸雨; 叶绿体超微结构; 膜渗漏率

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2005)03-0217-07

The Sensitivity of Chloroplast Ultrastructure of Two Duckweed Species to Simulated Acid Rain

LIN Zhi-fang, PENG Chang-lian, XU Xin-lan, LIN Gui-zhu

(South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangdong Key Laboratory of Digital Botanical Garden, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The membrane leakage rate and chloroplast ultrastructure were investigated in the fronds of two duckweeds, *Lemna minor* L. and *Spirodela polyrrihiza* (L.) Schleid, cultured in distilled water and in different pH values (5.5, 4.5, 3.5, 2.5) of simulated acid rain for 48 h. The membrane leakage rate and alteration of chloroplast ultrastructure in two duckweeds were enhanced with the decreasing pH value. A different sensitivity to acid rain and changing pattern of injured chloroplast morphology were found between two species. In *L. minor*, the damages of chloroplast and membrane system began at pH 4.5, subsequently, severe plasmolysis, circular dilated chloroplast and the confused structure of grana with numerous vesicles were observed, as pH value of acid rain was dropped down to 3.5. However, in *S. polyrrihiza* under pH 3.5, less membrane leakage rate (17%) was accompanied by partial break in the outer envelope of chloroplast, while the structures of grana and stroma thylakoid showed no obvious change. The evident damage of chloroplast ultrastructure in *S. polyrrihiza* appeared at pH 2.5, but no severe plasmolysis and chloroplast swelling were seen. It is postulated that in the freshwater body, *S. polyrrihiza* may exhibit a stronger ability of existence competition to acid pollution than *L. minor*, and *L. minor* may be used as a sensitive plant indicator for water body with pH value less than 4.5.

Key words: *Lemna minor*; *Spirodela polyrrihiza*; Simulated acid rain; Chloroplast ultrastructure; Membrane leakage rate

收稿日期: 2004-10-13 接受日期: 2005-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470282); 中国科学院知识创新前沿领域项目—华南植物园园主任基金资助

近年来,酸雨的频率、强度和分布地区日益增大,已成为威胁世界各国生态环境的重要问题之一。天然未污染雨水呈弱酸性, pH 约 5.6, 接近于被 CO_2 饱和的蒸馏水的 pH^[1]。低于 pH 5.6 的降水称为酸雨, 其中两个重要的污染成分是空气中的 NO_x 和 SO_2 与 H_2O 反应形成的硝酸和硫酸的混合物。据报道, 西欧的酸雨 pH 为 4.0–4.5, 北美的东北大部份地区的湖水受酸雨的影响, 已丧失其原初碱性的 40% 以上^[1]。朝鲜半岛降水的年均 pH 值为 4.6–4.8^[2]。我国 40% 的国土, 广东省 80% 的地区受到酸雨的影响^[3,4]。甚至在工业不甚发达的韶山森林地区, 年酸雨频率也达 70%, 酸雨的 pH 为 4.3–5.5 之间, 平均 pH 4.72^[5]。据统计, 全国 11 个省、自治区由酸雨引起的生态效益经济损失约高达 459 亿元^[6]。因此, 研究酸雨对森林、农田和水体生态系统的影响, 可为制订相应的对策减少酸雨造成的经济损失提供依据, 而阐明酸雨伤害植物的机理, 尤其是伤害直接生长于酸雨污染的水体中的水生植物的机理, 并寻找对酸雨敏感的指示植物和抗酸雨性能较强的植物种, 具有重要的科学意义和实用价值。

浮萍植物(duckweed)是水生飘浮的维管束植物, 共有 4 属 40 种, 广布于热带到温带地区的淡水和含盐的港湾中^[7]。我国的浮萍科植物有 3 属 6 种^[8]。由于浮萍类体积小, 生长快, 易培养且能适应于多种水生环境, 因而已被广泛应用于研究水体的各种毒性和植物抗性试验, 包括重金属、煤渣、营养物、有机物及毒性有机体等, 作为一种灵敏的植物毒性监测工具^[7,9,10]。最常用作试验材料的有浮萍属 *Lemna* 和紫萍属 *Spirodela* 植物。但迄今对这些重要的浮萍植物在酸雨污染条件下的生长和生理生化特性研究甚少^[11], 亚细胞结构特征则未见报道。叶绿体是细胞中对外界环境条件变化最敏感的细胞器, 环境胁迫如高温^[12]、低温^[13]皆可导致叶绿体超微结构的破坏和光合功能丧失。对木本植物龙眼的研究也初步观察到模拟酸雨作用下叶绿体膜系统出现崩解现象^[14]。然而植物不同的物种、生活型和生态型对不良环境的响应和耐受性程度往往不尽相同。本文以叶绿体超微结构的变化为切入点, 利用不同 pH 值的模拟酸雨研究其对两种浮萍植物叶绿体结构的影响, 结合对细胞渗漏率的测定, 比较其叶绿体超微结构对酸雨响应的敏感性的差异, 为浮萍作为酸雨的生物监测工具的可能性及酸雨对水生植物的影响提供依据。

1 材料和方法

材料和处理 浮萍(*Lemna minor* L.)和紫萍(*Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid)采自中国科学院华南植物园的水塘中, 两者混生成覆盖水面的飘浮植物群落。植株经自来水漂洗后, 置于含不同 pH 溶液的培养皿中。酸雨按广州地区 1997 年酸性降水中的 SO_2 与 NO_2 的摩尔浓度比 2.75:1 配制, 用 pH 计测定, 调节 pH 值为 5.5, 4.5, 3.5 和 2.5, 以蒸馏水为对照。每个培养皿中放入 15 株紫萍和 30 株浮萍, 室温(约 30°C)和室内漫射光(约 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-2}$)下培养 48 h, 两次重复培养试验。

细胞膜渗漏率测定 取 8 个植株洗净去根, 加 15 ml 重蒸水, 25°C 浸泡 2 h, 用电导仪(DDS-11A 型)测定浸出液的电导度, 随后煮沸 15 min, 冷却后再次测定, 以煮沸前后的相对电导率%表示细胞膜渗漏率。

叶绿体超微结构观察 将叶状体于冰浴上切成约 3 mm×1 mm 的片段, 经 4%戊二醛和 1%锇酸固定, 系列乙醇溶液脱水, Epon812 树脂包埋。超薄切片后用 2%乙酸双氧铀及 6%柠檬酸铅染色, 叶绿体超微结构以 JEM-1010(日本)透射电镜观察和拍照。

叶绿素吸收光谱测定 叶状体用 80%丙酮提取, UV-Vis 分光光度计(Beckman DU-7, USA)于 400–700 nm 波段扫描。

数据处理 用 t 值检验所得细胞渗漏率数据差异的显著性。

2 结果

2.1 外观, 叶绿素吸收光谱和细胞膜渗漏率

浮萍与紫萍的叶状体大小、根数及叶背颜色有明显的不同。浮萍的叶状体两面皆呈绿色, 宽约 2–3 mm, 只有一条根。紫萍的叶状体宽 4–6 mm, 且厚度比浮萍大, 有 5 条以上的根, 叶状体背面紫色^[7]。两种植物经不同 pH 的模拟酸雨处理后, 叶状体出现不同程度的失绿现象, 以 pH 3.5 和 2.5 者较明显, 并伴以部分根的脱落。浮萍在 pH 2.5 时叶色已呈黄白色, 而紫萍仍保持淡绿色, 这表明此时浮萍已完全失去吸收光能进行光合作用的能力, 紫萍则保持部分光能吸收、转化的能力。

细胞膜渗漏率是表示膜系统稳定性的重要指标。从图 1 可见, 随酸雨 pH 值的下降, 叶状体的细

胞膜渗漏率提高,浮萍在 pH 3.5 时细胞膜渗漏率已超过 50%,而紫萍在同一条件下的渗漏率约为 17% (图 1)。除对照外,在 3 种 pH 值的酸雨中,浮萍的细胞膜渗漏率极显著地高于紫萍,结果显示紫萍对酸雨的抗性高于浮萍。此外,对紫萍叶状体中叶绿素吸收光谱的测定,可见到以水作对照和 pH 5.5 下有 665, 456 和 434 nm 3 个吸收峰, pH 2.5 处理者的 456 nm 峰消失,出现 608 nm 和 412 nm 的新吸收峰(结果未作图示),说明此时叶绿素已明显发生降解。

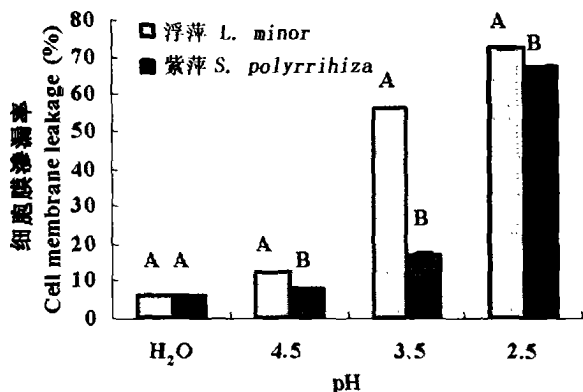


图 1 模拟酸雨处理 1 d 对浮萍和紫萍细胞膜渗漏率的影响

Fig. 1 Effect of simulated acid rain on cell membrane leakage rate in the fronds of *L. minor* and *S. polyrrhiza* after treatment for 1 day

每个柱上同一 pH 值不同大写字母表示差异显著性为 $p < 0.01$ 。

Each pair of bars with different letters are significantly different at $p < 0.01$.

2.2 叶绿体超微结构

对照(H₂O)和 pH 5.5 酸雨中的浮萍细胞和叶绿体结构与典型的陆生高等维管束植物相似。叶绿体排列于近胞壁的质膜旁,富含淀粉粒,基粒由 5-12 个类囊体垛叠而成(图版 I:1-6)。pH 4.5 处理后,原生质体收缩出现质壁分离,叶绿体外膜局部破裂,基粒结构混乱,类囊体开始肿胀(图版 I:7-9)。经 pH 3.5-2.5 处理后,原生质体收缩堆积于细胞中央,叶绿体肿胀成圆球形,片层结构完全瓦解,出现许多空泡(图版 I:10-12)。

在 pH 5.5 酸雨中培养的紫萍叶肉细胞和叶绿体(图版 II:4-6)结构正常,与水对照(图版 II:1-3)的相似。pH 4.5 的酸雨处理引起轻微的质壁分离,但叶绿体结构完整(图版 II:7-9)。pH 3.5 的酸雨处理后质壁分离加剧,部分叶绿体被膜破裂,而基粒垛叠和基质类囊体结构正常(图版 II:10-12)。pH 2.5 酸雨处理则使叶绿体结构受到明显的伤害,类囊体粘连或降解,排列无序(图版 II:13-15)。

比较浮萍和紫萍的叶绿体结构对酸雨的响应可见,浮萍对酸雨伤害的敏感性高于紫萍。在 pH 4.5 时即出现明显的结构伤害, pH 3.5 时结构完全破坏。而紫萍叶绿体在 pH 3.5 才开始出现局部可见伤害, pH 2.5 时出现严重伤害,但此时其受损程度仍不如浮萍。

3 讨论

两种浮萍植物的叶绿体超微结构对酸雨耐受性程度和受伤害时的形态变化模式显示出一定的种间差别。浮萍 *L. minor* 对酸雨的敏感性较高,其耐受性下限为 pH 4.5 左右,低于此值即引起叶绿体超微结构的明显变化,叶绿体肿胀,类囊体排列混乱和降解,质壁分离强烈(图版 I:7-15)。紫萍对酸雨的耐受性下限为 3.5 左右,即使在 pH 2.5 时,类囊体仍保留部分片层结构,叶绿体并未肿胀成圆球状且不出现明显的质壁分离(图版 II:10-15)。种云霄等报道细脉浮萍 *L. aequinoctialis* 在无机氮化合物介质中生长最适 pH 为 5.6, pH 耐受低限在 4-5 之间;并观察到小浮萍和紫背浮萍倾向于生长在中性的水体中^[11]。在研究植物毒性的诸多工作中,虽然对不同的浮萍植物种间的相对敏感性尚不很清楚^[9],但已看到不同的浮萍如 *L. gibba*, *L. valdiviana* 和少根浮萍(*S. oligorhiza*)的叶片生长对 SO₃²⁻ 的抗性差异,以及 *L. gibba* 和 *L. minor* 的不同品系之间的生长量对一些有机化合物敏感性之间的差别^[15,16]。本文未对供试的两种浮萍的生长量作比较,但从微观角度和叶片外观色泽的变化证明了两个种之间的敏感性的差异。结构的变化与功能的改变密切相关,叶绿体结构的损伤必然影响其光合性能从而影响其光合产物的积累和生长。从此角度来看,在酸性水体中紫萍具有较强的生存竞争能力,而浮萍则可能用作水体酸性污染在 pH < 4.5 时的灵敏而方便的监测指示植物。此外,推测当水体的 pH 下降后,在紫萍与浮萍的混生系统中,紫萍将逐渐成为优势种从而改变此混生系统的组成成分。

高等植物的膜和贮藏脂类可被一系列环境因子所改变^[17]。酸是蛋白质变性失活的重要因子之一, pH 降低导致蛋白质某些侧链基团处于解离状态,使构象和四级结构改变或分子聚集出现沉淀^[18]。低 pH 下一些水解酶类也增强活性。因此,酸对叶绿体结构的影响可能包括直接和间接的作用。淀粉和蛋白质的降解增大叶绿体的渗透物质浓度,使大量水

分进入引起叶绿体和类囊体腔膨胀变形,而膜蛋白和膜脂的变性则使叶绿体结构瓦解,形成大量嗜铁颗粒和空泡。对陆生植物的研究证明模拟酸雨低于 pH 4.0-4.5 时可引起细胞膜渗漏率和膜脂过氧化产物 MDA 含量增高^[3];光合电子传递速率和净光合速率下降,叶绿体中部分重要多肽如 Rubisco 大亚基减少^[19];叶片细胞汁液 pH 值降低。在模拟酸雨为 pH 3.5 下龙眼的细胞开始瓦解,叶绿体和类囊体膜崩解,基粒片层结构混乱,抗氧化能力下降^[4]。酸雨处理水稻种子和幼苗引起其光系统 II 的叶绿素荧光非光化学猝灭系数 NPQ 下降,使植物更易于遭受光抑制和光破坏^[4]。

从上述的生理生化与细胞结构变化指标可以推测,造成本文中供试的两种浮萍叶绿体超微结构对酸性逆境响应特性的种间差别的原因可能取决于其细胞汁液的对 H⁺ 的缓冲能力,细胞和叶绿体膜系统的稳定性程度,以及抗氧化能力的不同。酸雨中较高水平的 H⁺ 进入细胞后如超过细胞本身的缓冲能力,则这些 H⁺ 将会改变酶类和蛋白质的带电性及许多物质的电离状况,破坏酶的结构^[4],并可能由于膜结构组分上的蛋白质和类脂的变构及胞内氧化还原状态的改变而使细胞膜和叶绿体膜结构受到伤害。有报道指出与 *Lemna gibba* 和 *L. valdiviana* 相比, *Spirodela oligorhiza* 有较高的 Rubisco 活性和光合速率,而较高的碳水化合物水平有助于增强对 SO₃²⁻ 的抗性^[16]。因此,与 *Spirodela oligorhiza* 同属的紫萍(*S. polyrrhiza*)也可能因其含较多叶绿素(外观深绿色,Chl a+b 约为 3.57 μg cm⁻²,而浮萍 *L. minor* 的 Chl a+b 仅为 2.79 μg cm⁻²),能吸收和利用较多的光能形成较多的碳水化合物等而提高其对酸雨的抗性。此外,紫萍叶背含紫色的花色素苷,而花色素苷具有抗氧化性^[20],有助于减轻较强酸性引发的膜脂过氧化,这可能也是紫萍对酸性水体抗性比浮萍高的原因之一。此外,自然条件下水体 pH 下降可促进重金属如 Al, Zn 等的解离,从而增强对水生生物的毒害作用^[21]。本文中的培养介质为蒸馏水,与自然水体有所不同,可以排除不同植物种类对重金属抗性差异的影响。然而,要揭示酸雨对植物的伤害和植物间不同抗性的机制尚有待于深入的研究。

参考文献

- [1] Schindler D W. Effect of acid rain on freshwater ecosystems [J]. Science, 1988, 229:149-157.
- [2] Fan H B(樊后保). On worldwide acid rain research [J]. J Fujian Coll For(福建林学院学报), 2002, 22(4):371-375.(in Chinese)
- [3] Xiao Y(肖艳), Huang J C(黄建昌). Stress effects of simulated acid rain on three fruit species [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2004, 12(4):351-354.(in Chinese).
- [4] Peng C X(彭彩霞), Peng C L(彭长连), Lin G Z(林桂珠), et al. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of three crops [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2003, 11(4):400-404.(in Chinese)
- [5] Jiang Y M(蒋益民), Zeng G M(曾光明), Zhang Z(张龚), et al. Leaching of base cations (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) from forest canopy during acid rain [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2004, 12(5):425-430.(in Chinese)
- [6] Chen F(陈复), Cai F H(柴发合). Control strategy of acid deposition in China [J]. Res Environ Sci(环境科学学报), 1997, 10(1):27-31.(in Chinese)
- [7] Wang W C. Literature review on duckweed toxicity testing [J]. Environ Res, 1990, 52:7-22.
- [8] Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita (中国科学院中国植物志编辑委员会). Flora Reipublicae Popularis Sinicae Tomus 13 (2) [M]. Beijing: Science Press, 1979. 207-210.(in Chinese)
- [9] Lewis M A. Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: A review [J]. Environ Pollut, 1995, 87:319-336.
- [10] Teisseire H, Couderchet M, Vernet G. Toxic responses and catalase activity of *Lemna minor* L. exposed to folpet, copper, and their combination [J]. Ecotox Environ Safe, 1998, 40(3):194-200.
- [11] Chong Y X(种云霄), Hu H Y(胡洪营), Qian Y(钱易). Effects of inorganic nitrogen compounds and pH on the growth of duckweed *Lemna aequinoctialis* [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2003, 23(11):2293-2298.(in Chinese)
- [12] Lin Z F(林植芳), Peng C L(彭长连), Xu X L(徐信兰), et al. Thermostability of photosynthesis in two new chlorophyll b-less rice mutants [J]. Sci China Ser C. Life Sci(中国科学 C 辑, 生命科学), 2004, 34(5):395-401.(in Chinese)
- [13] Kratsch H A, Wise R R. The ultrastructure of chilling stress [J]. Plant Cell Environ, 2000, 23(4):337-350.
- [14] Qiu D L(邱栋梁), Liu X H(刘星辉), Wang X P(王湘平). Injury effects of simulated acid rain on chloroplasts of longan leaves [J]. Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报), 2002, 8(2):154-158.(in Chinese)
- [15] Cowgill U M, Milazzo D P, Landenberger B D. The sensitivity of *Lemna gibba* G-3 and four clones of *Lemna minor* to eight common chemicals using a 7-day test [J]. Res J Water Pollut Cont Fed, 1991, 63:991-998.
- [16] Takemoto B K, Noble R D, Harrington H M. Differential sensitivity of duckweeds (Lemnaceae) to sulphite. 1. Carbon assimilation and frond replication rate as factors influencing sulphite phytotoxicity under low and high irradiance [J]. New Phytol, 1986, 103:525-539.
- [17] Harwood J L. Effect of the environment on the acyl lipids of algae and higher plants [A]. In: Kacperska A, Kubacka-zebalska M. Structure, Function and Metabolism of Plant Lipids [M]. Amsterdam, New York, Oxford: Elsevier, 1984. 543-550.

- [18] Lu Z X(鲁子贤). Chemistry of Protein [M]. Beijing: Science Press, 1983. 125-126.(in Chinese)
- [19] Kumaravelu G, Ramanujam M P. Changes in CO₂ exchange rate, stomatal conductance, activities of photosystem 1 and 2, and chloroplast polypeptide profile induced by simulated acid rain [J]. Photosynthetica, 1998, 35(3):353-359.
- [20] Chalker-Scott L. Environmental significance of anthocyanins in plant stress [J]. Photochem Photobiol, 1999, 70:1-9.
- [21] Liu H(刘华), Wu G R(吴国荣), Zhou Y M(周耀民), et al. Effect of Zn toxicity on *Ceratophyllum demersum* L. under low pH value [J]. Acta Sci Circumst(环境科学学报), 2003, 23(4):525-529.(in Chinese)

图版说明

图版 I

- 1-3. H₂O 中培养的浮萍细胞(1), 叶绿体(2)和基粒(3)结构;
 4-6. pH 5.5 酸雨中的正常细胞(4), 叶绿体(5)和基粒(6)结构;
 7-9. pH 4.5 酸雨中的细胞出现质壁分离(7), 叶绿体肿胀, 外膜局部破裂, 基粒结构混乱 (8, 9);
 10-12. pH 3.5 酸雨中的原生质体堆积于细胞中央(10), 叶绿体肿胀呈圆球状(11), 内部结构完全瓦解, 出现许多空泡(12);
 13-15. pH 2.5 酸雨中的叶绿体结构变化与 pH 3.5 者相似;
 细胞 (图 1, 4, 7, 10, 13) ×2 500; 叶绿体 (图 2, 5, 8, 11, 14) ×15 000; 基粒 (图 3, 6, 9, 12, 15) ×60 000

图版 II

- 1-3. H₂O 中培养的紫萍细胞(1), 叶绿体(2)和基粒 (3)结构;
 4-6. 经 pH 5.5 酸雨处理的细胞(4), 叶绿体(5)和基粒 (6)结构;
 7-9. pH 4.5 酸雨处理后出现轻度质壁分离(7), 叶绿体和基粒结构正常(8, 9);
 10-12. pH 3.5 酸雨处理后部分叶绿体外膜破裂(10, 11), 基粒保持正常结构(12);

13-15. pH 2.5 酸雨处理的叶绿体内部结构异常(13, 14), 基粒粘连或降解, 排列无序(15).

细胞 (图 1, 4, 7, 10, 13) ×3 000; 叶绿体 (图 2, 5, 8, 11, 14) ×12 000-20 000; 基粒 (图 3, 6, 9, 12, 15) ×60 000

Explanation of plates

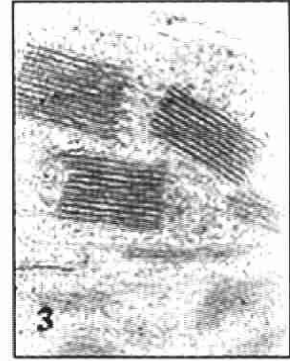
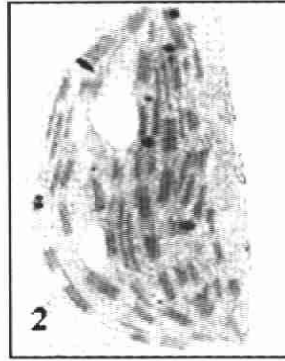
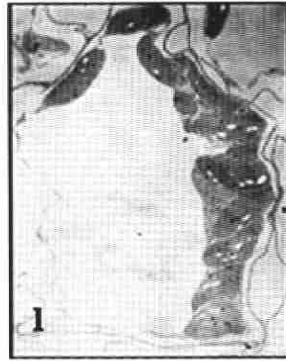
Plate I

- 1-3. Showing the ultrastructures of (*Lemna minor* L.) cell (1), chloroplast (2) and grana (3) in control (H₂O);
 4-6. Showing the normal ultrastructures of cell (4), chloroplast (5) and grana (6) treated by pH 5.5 acid rain;
 7-9. Showing plasmolysis (7), chloroplast swelling with partially broken outer envelope (8), and disorderly grana (9) in treatment with pH 4.5 acid rain;
 10-15. Showing the contracted protoplasm in the center of cell caused by severe plasmolysis (10, 13), the circular dilated chloroplasts (11, 14), and the numerous vesicles in collapsed thylakoid (12, 15) resulted from pH 3.5 and 2.5 acid rain stress, respectively;
 Cell (Figs. 1, 4, 7, 10, 13) ×2 500; Chloroplast (Figs. 2, 5, 8, 11, 14) ×15 000; Grana (Figs. 3, 6, 9, 12, 15) ×60 000

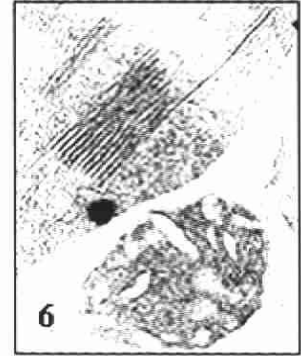
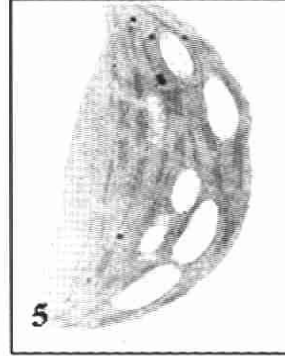
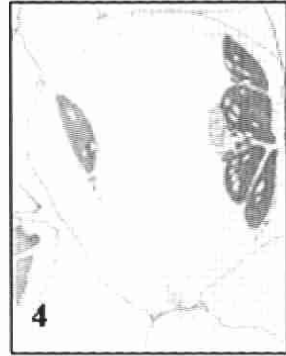
Plate II

- 1-3. Showing the (*Spirodela polyrrhiza*) cell (1), chloroplast (2) and grana (3) structure in control (H₂O);
 4-6. Showing no changes in structure of chloroplast treated by pH 5.5 acid rain;
 7-9. Showing slight plasmolysis and normal structure of chloroplast in treatment with pH 4.5 acid rain;
 10-12. Showing the outer broken envelope in some chloroplasts treated by pH 3.5 acid rain;
 13-15. Showing the disintegrated sticking thylakoids (15).
 Cell (Figs. 1, 4, 7, 10, 13) ×3 000; Chloroplast (Figs. 2, 5, 8, 11, 14) ×12 000-20 000; Grana (Figs. 3, 6, 9, 12, 15) ×60 000

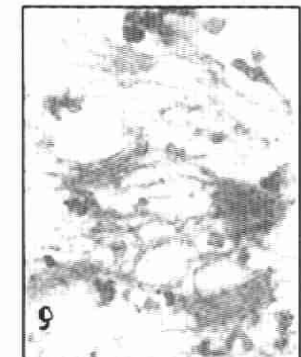
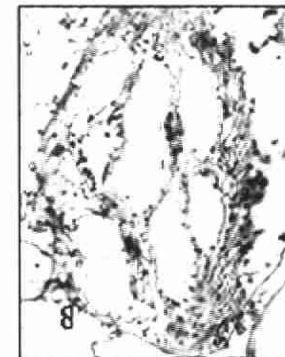
Control



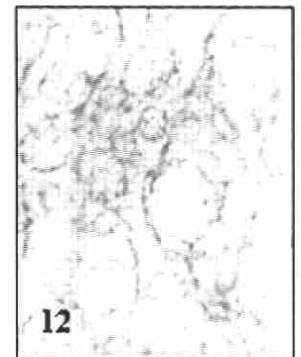
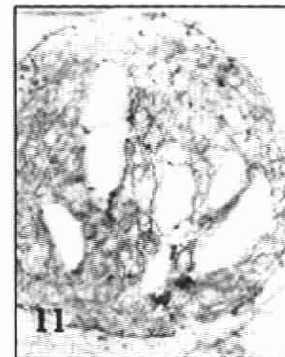
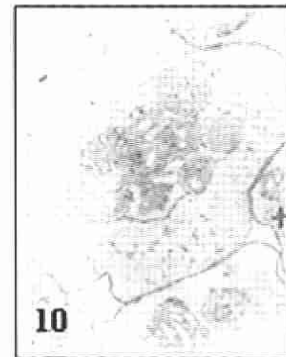
pH 5.5



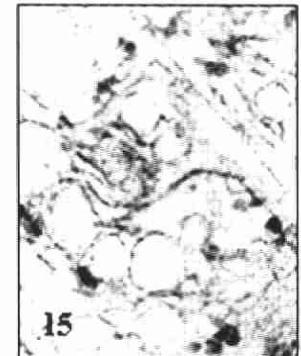
pH 4.5

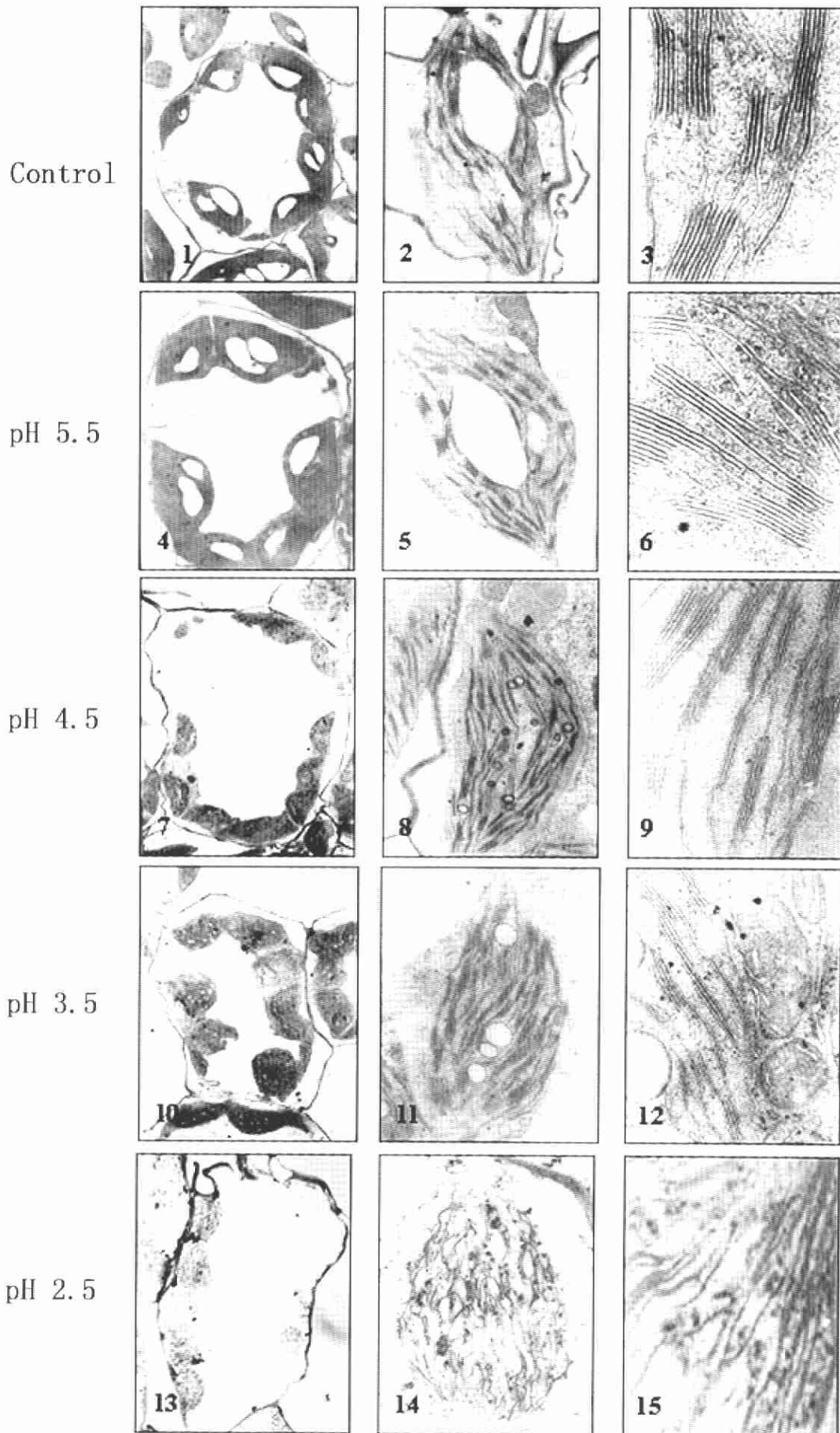


pH 3.5



pH 2.5





林植芳等:图版 II

LIN Zhi-fang et al.: Plate II