

## 三江平原毛果苔草湿地光辐射能的利用与分配

何池全 李 蕾 顾 超 陆晓怡

(上海大学环境科学与工程系, 上海 200072)

**摘要:** 毛果苔草湿地的物理过程观测设在中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站内, 用美国 CID 公司出品的光合仪对典型湿地中几种优势植物的光合能力进行测定; 在 80℃ 干燥的植物样品(含各种不同的构件), 粉碎后, 分别称量约 1g 左右, 用美国公司 Parr 型氧弹式热量计测定; 研究发现毛果苔草湿地建群种中毛果苔草的净光合速率最大, 为 47.41 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 。以太阳总辐射能和生长季内光合有效辐射为基础计算出各器官的能量利用效率, 极大值是细根, 分别为 1.3945% 和 3.1879%, 极小值是穗, 分别为 0.0020% 和 0.0046%, 毛果苔草种群的能量利用率为 2.54%。湿地不同植物群落地下部分的能量含量分布中毛果苔草群落的地下部分能量含量的平均值最大。这说明毛果苔草种群具有较高的能量转化效率, 并将大部分能量储存在地下部分。在不同层次的能量含量分配中, 随着土壤深度的增加, 地下部分的能量含量趋于递减。

**关键词:** 毛果苔草; 湿地生态系统; 光合作用; 初级生产效率; 地下器官能量含量  
**中图分类号:** Q948.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1006-3207(2003)05-0502-005

生态系统的能量流动过程系指生态系统中, 生物与环境之间、生物与生物之间的能量传递过程<sup>[1]</sup>。能量流动是生态系统最基本的功能之一, 它直接影响到生态系统的结构和动态, 影响到生态系统的物质循环和信息传递<sup>[2]</sup>。太阳辐射能进入毛果苔草湿地生态系统后, 只有一小部分能量被植物光合作用所固定。其中, 又有一半以上的能量被植物的呼吸作用所消耗, 余下的部分以有机物的形式积累下来, 成为可被利用的生物潜能<sup>[3,4]</sup>。湿地环境系统的太阳辐射能不仅为生态系统的生存和繁衍提供动力并发挥多种效应, 而且也推动着环境系统各要素的变化和发展。这方面的研究在森林、湖泊和草地已有报道<sup>[5-7]</sup>。笔者旨在分析、探讨毛果苔草湿地群落的光合作用过程、初级生产效率及其积累于地下器官进而形成各种含能产品的光合生产过程。

### 1 材料与方法

**1.1 采样点设置** 毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)湿地的物理过程观测样地设于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站试验场, 该区地势平坦, 在 1998—

1999 两年间, 在实验区内选取典型的毛果苔草湿地植物分布均匀的样地, 样地面积为 200m<sup>2</sup> × 450m<sup>2</sup>, 样地内分 3 个小区(生物量测定区、凋落物测定区、凋落物分解实验区), 每小区分别设置不同的样区, 用以采样和观测试验, 每年 5—10 月取样, 每 30d 左右一次, 样方面积 1m<sup>2</sup> × 1m<sup>2</sup>, 2—3 次重复。

**1.2 光合能力的测定** 美国 CID 公司出品的光合仪对典型湿地中几种优势植物的光合能力进行测定。

**1.3 植物热值的测定** 在 80℃ 干燥的植物样品(含各种不同的构件), 粉碎后, 分别称量约 1g 左右, 用美国公司 Parr 型氧弹式热量计测定<sup>[8]</sup>, 粗灰分的测定是采用干灰分法。该区气象数据来自中国科学院生态系统网络定位研究的三江平原湿地生态试验场自动气象观测站。

### 2 结果与分析

#### 2.1 光合作用与初级生产效率

植物的光合作用是推动和支撑整个生态系统的原初动力, 冠层蒸腾是与光合过程相伴随的植物体及土壤水分的散失过程, 前者是以生化过程为主, 后

收稿日期: 2002-07-30; 修订日期: 2002-10-12

基金项目: 中国科学院“九五”重大 B 项目(KZ95B-B1201), 中国科学院百人计划项目“我国重要湿地的生态过程和生态管理”项目、上海市高等学校青年基金(01-QN-68); 211 重点学科建设基金资助

作者简介: 何池全(1968—), 男, 汉族, 江西省九江市人; 博士, 副教授; 主要从事环境生物学、湿地工程设计及植物修复研究, hechiquan@sina.com. 本文承蒙赵魁义研究员的指导, 野外及实验工作得到杨青老师、赵志春、王双丽同志的帮助和中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站的全体老师的支持, 特此致谢!

者是以物理过程为主<sup>[9]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来, 随着红外气体分析技术的发展, 叶片的 CO<sub>2</sub> 和水汽交换可直接测量, 因而叶片水平的生理因子对环境

因子的响应的实验进展较快, 推动了该项研究的发展。环境因子对叶片生理过程的影响, 包括以下几个物理过程:

表 1 典型湿地中几种优势种的光合作用参数

Tab. 1 The photosynthesis parameter of some predominance species in *C. lasiocarpa* wetland

INDEX	Area (cm <sup>2</sup> )	T (Air)	T (Leaf)	PAR (mol/m <sup>2</sup> /s)	hr in (%)	hr out (%)	CO <sub>2</sub> in (μg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> out (μg/m <sup>3</sup> )	P (mol/m <sup>2</sup> /s)
毛果苔草	1.04	25.96	22.86	350.45	41.20	71.81	419.25	405.63	47.41
标准差	0.16	0.26	0.98	168.10	0.55	23.04	6.26	2.14	14.44
变异系数	0.15	0.01	0.04	0.48	0.01	0.32	0.01	0.01	0.30
样本数	8	8	8	8	8	8	8	8	8
狭叶甜茅	4.02	27.18	24.42	165.90	38.12	31.73	410.70	395.92	13.13
标准差	0.92	0.93	1.69	8.91	2.38	1.07	10.71	6.40	7.69
变异系数	0.23	0.03	0.07	0.05	0.06	0.03	0.03	0.02	0.59
样本数	9	9	9	9	9	9	9	9	9
漂筏苔草	1.22	25.36	24.12	289.36	41.62	35.74	409.58	405.92	10.17
标准差		0.18	0.81	26.14	0.88	0.46	0.67	1.77	5.65
变异系数		0.01	0.03	0.09	0.02	0.01	0.00	0.00	0.56
样本数	5	5	5	5	5	5	5	5	5
小叶章	1.87	30.43	30.70	653.08	31.65	26.80	408.32	406.28	3.75
标准差	0.59	1.25	1.11	227.10	1.79	1.25	0.95	1.11	1.51
变异系数	0.32	0.04	0.04	0.35	0.06	0.05	0.00	0.00	0.40
样本数	6	6	6	6	6	6	6	6	6

(1) 能量传输过程 太阳辐射除为光合作用提供能源外, 也是叶片热量平衡中的输入项。叶片接受到的太阳辐射能, 以显热和潜热两种方式向大气输送, 前者以热传导或湍流等方式进行, 后者以蒸腾的方式进行; 作为叶片能量平衡的结果的叶温影响光合系统中酶的活性, 从而影响光合作用速率。

(2) 物质交换过程 CO<sub>2</sub> 通过气孔进入植物体, 同时植物体内的水分通过气孔逸失于空气中。CO<sub>2</sub> 和水汽输送的流量取决于气孔导度、边界层导度以及气孔下腔与大气中的 CO<sub>2</sub> 或水汽的浓度差。

(3) 生理调节过程 光合作用是由太阳辐射、叶温和气孔下腔 CO<sub>2</sub> 浓度等因子决定的。气孔导度是通过影响 CO<sub>2</sub> 向叶绿体的输送而影响光合作用, 光合作用也通过合成 ATP, 推动保卫细胞中的离子的运移, 而影响保卫细胞的含水量和水势, 从而影响气孔导度; 同时, 气孔导度对蒸腾作用以及热量平衡均有影响。

笔者用美国 CID 公司出品的光合仪对典型湿地中几种优势植物的光合能力进行测定, 结果如下: (1999, 08, 03, 13:00 左右)

从表 1 中可以看出, 叶面积的大小依次是狭叶甜茅、小叶章、漂筏苔草和毛果苔草, 光合有效辐射(PAR)的极大值是小叶章, 为 650.08 μmol/m<sup>2</sup>/s, 其次是毛果苔草, 为 350.45 μmol/m<sup>2</sup>/s, 漂筏苔草为 289.36 μmol/m<sup>2</sup>/s, 而狭叶甜茅达极小值, 为 165.90 μmol/m<sup>2</sup>/s, 直接影响光合作用的光合有效辐射的物理环境变量, 有光质、光照瞬时量和光照持续期, 这些将与日照角、云量、植冠深度或水深度有关。而它们的净光合速率(P)的极大值是毛果苔草, 为 47.41 μmol/m<sup>2</sup>/s, 其次是狭叶甜茅, 为 13.13 μmol/m<sup>2</sup>/s, 极小值是小叶章, 仅为 3.75 μmol/m<sup>2</sup>/s; 净光合速率是与细胞间隙的二氧化碳浓度以及气孔的开放程度直接有关。同时发现毛果苔草和狭叶甜茅的细胞间隙二氧化碳输入输出浓度差分别为 13.62 μg/m<sup>3</sup> 和 14.78 μg/m<sup>3</sup>, 而漂筏苔草和小叶章仅为 3.66 μg/m<sup>3</sup> 和 2.04 μg/m<sup>3</sup>, 这与毛果苔草和狭叶甜茅具有适应旱生结构的内卷叶片有关, 同时也是对深水环境低温的一种生态适应, 因为本区域深水区即使是在夏季, 土壤下的 70cm 左右还有冰层; 而毛果苔草和狭叶甜茅恰恰大多分布在此区域。

## 2.2 毛果苔草湿地植物各器官能量转化效率

在能量生态学的研究中,将植物在能量转化过程中形成的各种含能产品的速率与入射的太阳辐射强度相比较,所计算出的比值称为植物的能量转化

效率,也叫植物的光能利用率。笔者以生长季节内的总辐射和光合有效辐射为基础,计算了三江平原毛果苔草湿地的能量转化效率(表2)。

结果表明,三江平原毛果苔草湿地植物在生长

表2 毛果苔草湿地植物各器官能量转化效率(1999, 7, 16)

Tab. 2 The energy transform efficiency of each organ in *C. lasiocarpa* wetland

器官	能量含量 (J/g)	净生产力 (g/m <sup>2</sup> /a)	能量值 (J/m <sup>2</sup> )	总辐射 (MJ/m <sup>2</sup> )	能量转化 效率(%)	光合有效辐射 (MJ/m <sup>2</sup> )	能量转化 效率(%)
叶片	16271.70	199.23982	3241969.96	2673.06	0.1206	1175.581	0.2758
叶鞘	19075.72	93.61	1785678.19	2673.06	0.0664	1175.581	0.1519
花序萼	31468.85	38.57707	1213975.95	2673.06	0.0452	1175.581	0.1033
穗	21754.36	2.5	54385.9	2673.06	0.0020	1175.581	0.0046
根茎	16370.51	987.52	16166209.1	2673.06	0.6016	1175.581	1.3752
细根	17355.35	2159.32	37475764.3	2673.06	1.3945	1175.581	3.1879
立枯物	14328.54	44.51	637763.315	2673.06	0.0237	1175.581	0.0543
死根	21354.68	359.37	7674231.35	2673.06	0.2856	1175.581	0.6528
平均值	19747.46	485.58	8531247.27	2673.06	0.32	1175.58	0.73
总和	157979.71	3884.65	68249978.1	2673.06	2.54	9404.65	5.81

季节内(5—9月)的太阳总辐射能为2673.06MJ/m<sup>2</sup>,分别计算出毛果苔草各器官的能量转化效率,极大值是细根,为1.3945%,极小值是穗和立枯物,分别为0.0020%和0.0237%;而在生长季内光合有效辐射为1175.581MJ/m<sup>2</sup>,以它为基础计算出各器官的能量转化效率,均大于前种方法计算的结果,但它的极大值仍是细根,为3.1879%,极小值仍是穗和立枯物,分别为0.0046%和0.00543%,毛果苔草种群的能量利用率为2.54%。说明毛果苔草地下部分的能量利用效率较高,而有性生殖(穗)的能量利用效率最低,为进一步克隆繁殖准备了条件。

表3和表4列出了有关学者对不同植被类型能量转化效率的计算结果,从中可以看出,不同植被类型的能量转化效率差异很大,将毛果苔草湿地中毛果苔草种群的能量转化效率与以上几种比较,发现毛果苔草种群具有较高的能量转化效率,反映出其具有较高的净初级生产力。同时可以看出,毛果苔草将大部分能量储存在地下部分,一方面可以保证毛果苔草群落在生长季结束后地下部分的安全过冬;另一方面也为第二年生长季节开始时毛果苔草群落地上部分的萌发,提供了足够的能量。毛果苔草的这种能量分布格局是毛果苔草群落在能量转化

表3 印度拉贾斯坦地区草本植被的能量转化效率

Tab. 3 The energy transform efficiency of herbage vegetation in India

样地号	地上部分			地下部分			总计		
	生物量 (g/m <sup>2</sup> )	能量现存量 (kcal/m <sup>2</sup> )	能量转化 效率(%)	生物量 (g/m <sup>2</sup> )	能量现存量 (kcal/m <sup>2</sup> )	能量转化 效率(%)	生物量 (g/m <sup>2</sup> )	能量现存量 (kcal/m <sup>2</sup> )	能量转化 效率(%)
I	154.3	629.55	0.212	43.79	191.71	0.065	198.09	821.26	0.277
II	131.04	556.11	0.188	31.15	132.61	0.045	168.19	688.72	0.233
III	139.06	569.73	0.192	34.66	148.38	0.05	174.82	718.11	0.242
IV	202.99	840.99	0.284	73.01	319.49	0.108	276	1160.48	0.392
V	218.13	913.53	0.308	80.03	351.5	0.119	298.16	1265.03	0.427

表4 毛果苔草湿地生态系统太阳辐射能利用率与其他类型比较

Tab 4 The utilization ratio of sunshine radiant energy in *C. lasiocarpa* wetland ecosystem

生态系统类型 The type of ecosystem	太阳能利用率 The utilization ratio	备注 Note	资料来源 Data source
松嫩平原羊草草地	2.3	生长季光合有效辐射	祖元刚, 1987
三江平原小叶章湿草甸	2.73	生长季光合有效辐射	马克平, 1991
三江平原毛果苔草湿地	2.54	生长季光合有效辐射	何池全, 2001
热带杂草地	1.66	年光合有效辐射	Singh et al., 1968
热带画眉草低湿草地	1.41	年光合有效辐射	Singh et al., 1969
加拿大矮草草地	0.3	年总辐射能	Coupland et al., 1978
加拿大杂草地	0.5	年总辐射能	Coupland et al., 1979

过程中为适应漫长的冬季而采用的一种储能对策。

### 2.3 毛果苔草湿地不同植物群落地下部分的能量含量比较

毛果苔草湿地不同植物群落地下部分的能量含量分布结果(主要是根据野外采样观察的方便和便于比较而划分为五个相同的层次(0—50cm), 从上至下依次是 SA、SB、SC、SD、SE)。毛果苔草湿地不同植物群落地下部分的能量含量分布规律是毛果苔草群落的地下部分能量含量的平均值最大, 其次是毛果苔草-漂筏苔草群落, 最小的是小叶章群落。在不同层次的能量含量分配中可以看出, 随着土壤深度的增加, 地下部分的能量含量是趋于递减趋势的, 上层能量含量最高, 依次逐渐降低, 最下层最低。毛果苔草群落的波动性最大, 变异系数最大, 为0.2308, 而小叶章群落的波动性较小, 变异系数仅为0.0457。

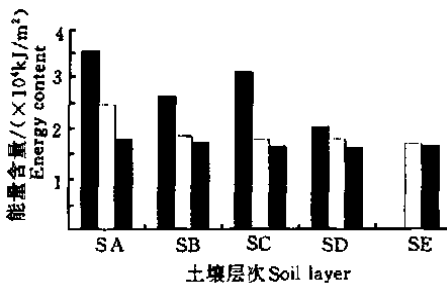


图1 毛果苔草湿地不同植物群落地下部分的能量含量分布

Fig. 1 The energy distribution of the underground part in different plant Community in *C. lasiocarpa* wetland

- 毛果苔草群落
- 毛果苔草-漂筏苔草群落
- 小叶章群落

这种分布格局与湿地水分条件的分布格局相一致, 毛果苔草群落分布在深水区, 富含土壤有机质, 根系较深; 其次是毛果苔草-漂筏苔草群落分布于较

浅的区域, 根系相对较浅, 土壤有机质较少; 小叶章群落分布在季节性积水区域, 根系相对最浅, 土壤有机质最少。因此, 苔草类湿地植物均能将大部分能量储存于地下部分, 使土壤底质中的有机质含量增多, 改变了土壤的物理化学形态; 同羊草群落、小叶章草地的土壤结构及地下部分相比, 毛果苔草群落地下部分储存的能量最大, 土壤底质的有机质最丰富, 使其适应在高寒冷湿的湿地环境下生长的一种生态适应现象, 这也是湿地植物的一种特殊的适应机制。

### 参考文献:

- [1] Zhu T C. The energy flux and material circle in ecology [J]. Beijing: Science Popularization Press. 1984, 33—44 [祝廷成, 生态系统的能量流动和物质循环. 北京: 科学普及出版社. 1984, 33—44]
- [2] He C Q. The energy flux process about *Carex lasiocarpa* in Sanjiang plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1350—1353. [何池全, 三江平原毛果苔草湿地能量流动过程分析, 生态学报, 2002, 22(8): 1350—1353]
- [3] He C Q. The physical process of *Carex lasiocarpa* wetland in Sanjiang plain the basic characteristic of the energy environment [J]. *Environment Science Research*. 2001, 14(5): 57—60. [何池全. 三江平原毛果苔草湿地物理过程 I - 能量环境的基本特征. 环境科学研究, 2001, 14(5): 57—60]
- [4] He C Q. The physical process of *Carex lasiocarpa* wetland in Sanjiang plain the transport of the whole sunshine radiant energy in ecosystem [J]. *Chinese Environment Science*. 2001, 21(4): 376—379. [何池全. 三江平原毛果苔草湿地物理过程 II - 太阳辐射能在生态系统中的传输. 中国环境科学, 2001, 21(4): 376—379]
- [5] He C Q, Zhao K Y, Yu G Y. The advance of the wetland ecological process [J]. *Geoscience Advance*, 2000, 15(2): 165—171. [何池全, 赵魁义, 余国营. 湿地生态过程研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(2): 165—171]
- [6] Yu D. The study of the physiology ecology in *Batrachium bungei* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1994, 18(3): 254—262 [于丹. 水毛茛

- 生理生态学研究. 水生生物学报, 1994, 18(3): 254—262]
- [ 7 ] Li W. *et al.* The quantitative analysis of the plant community in Hong Hu lake I: Form. *potamogeton maackianus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(1): 53—57. [ 李伟等. 洪湖主要沉水植物群落的定量分析 I. 微齿眼子菜群落. 水生生物学报, 1999, 23(1): 53—57]
- [ 8 ] Zou Y G. The some technology problems about the determination of the plant calorie [J]. *Chinese Journal of ecology*. 1986, 5(4): 53—56]. [ 祖元刚. 植物热值测定中的若干技术问题. 生态学杂志, 1986, 5(4): 53—56]
- [ 9 ] Yu Q. The advance of the plant photosynthesis production and the simulation of the coronal layer braise separate [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 1999, 19(5) 744—753 [ 于强. 植物光合生产力与冠层蒸散模拟研究进展. 生态学报, 1999, 19(5) 744—753]

## THE UTILIZATION AND DISTRIBUTION OF THE SUNLIGHT RADIATION ENERGY IN CAREX LASIOCARPA WETLAND IN SANJIANG PLAIN

HE Ch2Quan LI Lei GU Chao and LIU Xiao2Yi

(Department of Environmental Science and Engineering, Shanghai University; Shanghai 200072)

**Abstract:** *Carex lasiocarpa* is a rhizomatous clonal species of mire wetland in Northeastern China. The field studies about physical process of *Carex lasiocarpa* wetland was carried out in the Shangjiang Plain Mire Wetlands Ecological Experiment Station (47°31'N, 133°31'E) of the Chinese Academy of Sciences. The sampling area is 200 @ 450m<sup>2</sup> and was divided into three areas including the determined area of biomass, the determined area of wither biomass and the decompose area. Samples were taken 30 days once during May and October in 1998 and 1999. Sampling area was 1 @ 1m<sup>2</sup> and 2 to 3 replicates for each. The plants were divided into different components including leaf, sheath, rhizome, inflorescence, spike, radicle and dead standing. All samples were ground into pieces and dried to constant weight at 80 °C for analysis. The energy content is determined by bomb calorimeter (Parr, USA). The photosynthesis is determined by photosynthesis meter (CID company, USA). The results showed that the net photosynthesis rate of *Carex lasiocarpa* (47141 L mol<sup>-1</sup>/m<sup>2</sup>/s) is faster than those of other plants in *Carex lasiocarpa* wetland. Based on the overall sunlight radiation and the efficient photosynthesis radiation, energy utilization rate in radicle was the highest (11.3945% and 31.1879%) While those in spike was the lowest (0.0020% and 0.0046%). Energy utilization efficiency of *Carex lasiocarpa* population is 2154%. The average energy content of underground components of *Carex lasiocarpa* community is bigger than those in other community. It showed that *C. lasiocarpa* had higher energy productive efficiency and most energy was stored in their underground part. Energy contents in underground components decreased with the increase in depth in soil.

**Key words:** *Carex lasiocarpa*; Wetland ecosystem; Photosynthesis; Energy content