

## 水体浊度对苦草光合荧光特性的影响

徐瑶, 王国祥\*, 李强

(南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 南京 210097)

**摘 要:** 用粒径小于 100  $\mu\text{m}$  的泥沙分别配置浊度为 30、60、90 NTU (nephelometric turbidity units) 的混浊水体, 将苦草 (*Vallisneria natans*) 成株分别种植于上述水体中, 利用水下饱和脉冲荧光仪 (DIVING-PAM) 测定植株最长叶片水下 10 cm 处  $\Delta F_v/F_m$  的光合日变化及快速光响应曲线 (RLC)。结果表明, 1 个月后, 水体浊度对苦草成体植株  $F_v/F_m$  和光合系统 II (PS II) 无显著影响, 叶片  $\Delta F_v/F_m$  的日变化曲线呈“V”形; 泥沙浊度  $\geq 60$  NTU 时,  $\Delta F_v/F_m$  降低幅度较小, 光强降低时恢复较快, 植株受光抑制的程度变小。快速光响应曲线结果显示, 实验期间苦草开始衰老, 光响应能力下降; 随水体混浊度的升高, 叶片光响应能力下降减慢。表明在浅 (水深 1.0 m) 而浑浊的水体中, 短时间内混浊水体对苦草成株叶片 PS II 的影响较小。

**关键词:** 苦草; 悬浮泥沙; 光合荧光特性

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2007)01-0070-05

## The Influences of Suspended Sands on Photosynthetic Fluorescence Characteristics of *Vallisneria natans* in Turbidity Waters

XU Yao, WANG Guo-Xiang\*, LI Qiang

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** Mature *Vallisneria natans* were planted in 30 NTU, 60 NTU and 90 NTU turbid waters made by suspend sands with less than 100  $\mu\text{m}$ , respectively. After one month, the longest leaf under 10 cm water were measured by a developed, submersible, pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometer, and diving-PAM, and diurnal variation of  $\Delta F_v/F_m$  and rapid-light curves (RLC) were also measured. The results indicated that the turbid water had not significant influence on  $F_v/F_m$ , which indicated that photosystem II of *V. natans* hadn't been influenced apparently. The diurnal variation of *V. natans*'s  $\Delta F_v/F_m$  in irradiance looked like "V" shape. When turbidity of water was more than 60 NTU,  $\Delta F_v/F_m$  of these plants decreased slightly, and restored quickly as irradiance became small. The results of RLCs suggested that *V. natans* began caducity, and their light responding ability of leaves decreased during the experimental period. With turbidity of water increasing, light responding ability of their leaves decreased slowly. All results indicated that the water turbidity had little influence on photosystem II of these plants during the experiment.

**Key words:** *Vallisneria natans*; Suspended sands; Photosynthetic fluorescence characteristics

水体中的各种悬浮颗粒物直接影响光照在水体中的垂直分布, 从而影响沉水植物的生长繁殖<sup>[1]</sup>与分布。水体悬浮颗粒物主要包括藻类等微型生物残体、泥沙等无机颗粒物, 前者主要出现在藻型富营养化湖泊中, 其对沉水植物的影响已有较多研究; 后者出现在一些通江湖泊及河流中, 其对沉水植物的影响研究较少。饱和脉冲调制 (PAM) 荧光仪是研究植物光合作用的快速、无损伤探针<sup>[2]</sup>, 在陆生植物光合作用的研究中得到了广泛的应用<sup>[3,4]</sup>。近年来

水下饱和脉冲荧光仪 (DIVING-PAM) 的出现使原位、无损伤测定沉水植物的光合作用成为可能<sup>[5,6]</sup>, 在海草<sup>[7]</sup>和珊瑚虫的研究中应用较多。苦草 (*Vallisneria natans*) 是一种多年生的沉水植物, 广泛生长于湖泊、池塘、沟渠及河流水体<sup>[8]</sup>。本研究将苦草的成株种植于不同浊度的悬浮泥沙水体中, 使用 DIVING-PAM 测定植株叶片的快速光响应曲线 (RLC) 和光合日变化, 研究在悬浮泥沙水体中苦草叶片光合荧光特性的变化, 为苦草在悬浮泥沙水体

收稿日期: 2006-07-26, 修回日期: 2006-09-29。

基金项目: 教育部科技创新工程重大项目培育基金项目 (#705824-2) 和国家 863 专项 (2003AA601100-2) 联合资助。

作者简介: 徐瑶 (1982 -), 男, 汉族, 江苏邳州人, 在读硕士, 研究方向为水环境修复和藻类研究 (E-mail: paradise8207@yahoo.com.cn)。

\* 通讯作者。

中的生物重建提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2004年7月自江苏东太湖湖区引种苦草(*Valisneria spiralis*),种植于南京师范大学仙林校区月亮湾池塘中。实验前30d自月亮湾池塘中选取发育程度较为一致的植株移植于实验池中,实验前植株株高约为70cm。

### 1.2 实验设计

实验在南京师范大学水环境生态修复中试平台的4个露天水池中进行。水池池长9.4m,宽1.1m,水深调节为1.0m,蓄满自来水,蓄水后曝晒1周。其中1个水池的水体不含泥沙,为对照池;池尾设置一抽水泵,将水从池尾抽到池前端,以使池内水流循环流动。另3个水池为实验池,池尾水先流入尾端的沉沙池,然后将水用泵抽到池前端的混沙池中,再流入各实验池;调节各水池入水管水流,使各池水体悬浮泥沙浊度分别为30、60、90 NTU (nephelometric turbidity units)左右。在实验池和对照池中分别放置3个装满砂土(沙:土=1:3)的塑料整理箱(53cm×41cm×24cm),每箱均匀植入30株苦草,共90株。实验从2005年8月20日开始,各池随机选择测定10株苦草最长叶片水面下40cm处的快速光响应曲线(RLC)。1个月后,各池再次随机选择10株苦草,分别测定最长叶片水面下40cm处的快速光响应曲线和光合日变化,所得数值取平均值与对照池植株作比较并采用SPSS 11.5软件包进行差异显著性分析。

### 1.3 泥沙制备

实验泥沙为江苏省镇江段的长江泥沙,以孔径100μm筛网滤掉粗颗粒,滤液静止2h后选上层悬浮液作为实验用的悬浮泥沙溶液。悬浮泥沙溶液中粒径1~1.5μm的泥沙约占40%,2.5~5μm、25~50μm和50~100μm粒径的泥沙分别占13.4%、12.4%和25%。因而,实验用泥沙主要由粒径较小的颗粒组成。

### 1.4 泥沙浊度测定

采用美国HACH公司2100P浊度仪测定水体中的悬浮泥沙浊度。

### 1.5 光照强度的测定

实验期间采用德国(Walz GmbH, Effeltrich,

Getmany)微型Li-Cor质子探头于晴朗无云天中午12:00时左右测定不同水深处的光照强度,取平均值绘成不同水深处光照强度的变化图。

### 1.6 水体悬浮泥沙对苦草快速光响应曲线的影响

早晨7:00~8:00时之间开始用水下饱和脉冲荧光仪DIVING-PAM(德国WALZ公司)和数据采集软件Wincontrol(Walz GmbH, Effeltrich, Germany)进行测定。Diving-PAM配备了一个发射峰为650nm的红外二极管,所发射的红外光为测量光;一个内置的卤素灯提供光化光照明和饱和脉冲光。光强使用上述的Li-Cor质子探头测定,该探头已用Li-Cor质子(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)探头校正。

连体叶片经暗适应10min后,迅速打开叶夹,开启检测光( $0.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )得到 $F_o$ ,再由饱和脉冲光( $4000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 0.8s)测得 $F_m$ ;随后,逐渐开启光强度分别为17、49、103、174、246、339、500、685  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光化光,每个强度的光化光照射10s后,经检测光和饱和脉冲光测得 $F_t$ 、 $F'_m$ ,分别计算得到8个相对光合电子传递速率(ETR)值,绘出它们各自平均值的快速光响应曲线<sup>[9]</sup>。计算公式如下:

$$F_v/F_m(\text{光化学最大量子产量}) = (F_m - F_o)/F_m;$$

$$\text{ETR}(\text{相对光合电子传递速率}) = (F'_m - F_t)/$$

$$F'_m \times \text{PAR}(\text{光合有效光强}) \times 0.84 \times 0.5^{[9]}。$$

### 1.7 水体悬浮泥沙对苦草 $\Delta F_v/F'_m$ 光合日变化的影响

在对照池和实验池中分别随机选择5株植株,做好标记。用DIVING-PAM于早晨7:00时开始测定,如1.6所述先测得 $F_o$ 、 $F_m$ ;然后,用饱和脉冲光( $4000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 0.8s)测得连体叶片的 $F_t$ 和 $F'_m$ ,计算得到有效荧光产量( $\Delta F_v/F'_m$ );每隔2h重复测定1次,至17:00时结束。计算公式为:

$$\Delta F_v/F'_m = (F'_m - F_t)/F'_m^{[9]}。$$

## 2 实验结果

### 2.1 各池不同水深处的光强变化

实验期间,在对照、30、60、90 NTU水体中晴天正午水下光照强度平均值的变化情况见图1。在悬浮泥沙的水体中,悬浮泥沙颗粒阻碍了光在水体中的前进,水体透明度低,水下光照弱。在60、90 NTU水体中,光照强度在水下衰减较快,植株叶片接收的

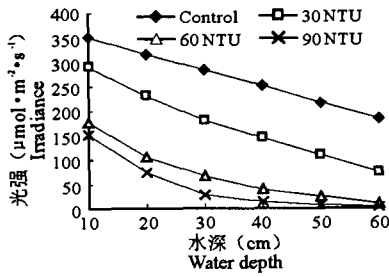


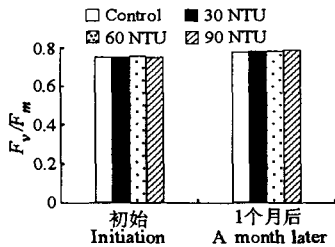
图1 正午各池水下光照强度的变化

Fig. 1 Irradiance changes under water in 4 pools at noon

光照强度快速降低。

## 2.2 水体悬浮泥沙对苦草光合系统 II (PS II) 的影响

光合作用是一系列光化学、光物理和生物化学转变的复杂过程,包括光反应和暗反应。光反应包括原初反应、电子传递与光合磷酸化过程。原初反应首先通过聚光色素收集光能并以诱导共振的方式将其传递给中心色素分子,中心色素分子发生光化学反应,把光能转化为电能,以高能电子的形式存在。这个过程是在 PS II 中完成的。 $F_v/F_m$  反映了当所有的 PS II 反应中心均处于开放态时的量子产量,可以直接作为最适状态下光合作用光化学反应效率的指标<sup>[10]</sup>。由图 2 可知,实验所用植株叶片的  $F_v/F_m$  差异不显著。1 个月 after, 对照和 30、60、90 NTU 植株叶片的  $F_v/F_m$  均有所增加,分别增加了 3.7%、4.5%、3.85% 和 4.8%; 在 30、60、90 NTU 混浊水体中植株叶片的  $F_v/F_m$  分别为对照植株的 1.011、1.012 和 1.014 倍,差异不显著( $p > 0.05$ )。表明悬浮泥沙对苦草叶片 PS II 的  $F_v/F_m$  影响不显著,对 PS II 没有显著的影响。

图2 各池苦草  $F_v/F_m$  的变化Fig. 2  $F_v/F_m$  changes of *Vallisneria spiralis* in 4 pools

## 2.3 水体悬浮泥沙对苦草 $\Delta F_v/F_m$ 光合日变化的影响

为了进一步了解水体悬浮泥沙对苦草植株叶片 PS II 的影响,测定了各水池中光强和苦草  $\Delta F_v/F_m$  的日变化。早晨 7:00 时后水下 10 cm 处光照强度

逐渐升高,至 13:00 时达最高值;随后逐渐下降。在对照水体中,水下光照强度显著高于各混浊水体;水体浊度越高水下光照强度越低(见图 3)。因而,各池苦草叶片接受的光照强度也随水体浊度的升高而显著下降。

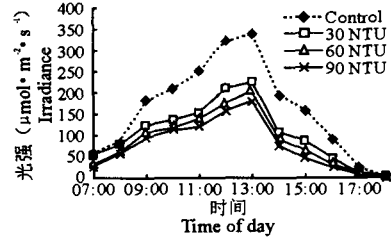
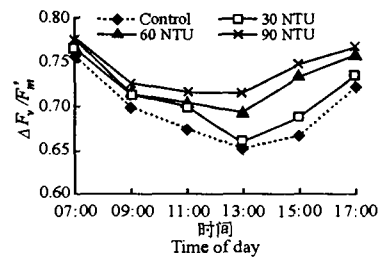


图3 各池水下 10 cm 光强的日变化

Fig. 3 The diurnal irradiance variation under 10 cm water in 4 pools

在 7:00 ~ 17:00 时之间,苦草的  $\Delta F_v/F_m$  相应地也呈日动态变化。对照植株  $\Delta F_v/F_m$  的日变化呈“V”形,与光强的日变化呈相反趋势,下午 13:00 时前呈逐渐下降趋势,至 13:00 时下降了 14.0%;然后,随光照强度的降低, $\Delta F_v/F_m$  逐渐升高,17:00 时恢复了 95.4%,接近早晨 7:00 时的水平。在浊度 30、60、90 NTU 的水体中,苦草植株  $\Delta F_v/F_m$  的日变化也呈“V”字形。与对照池植株相似,在悬浮泥沙浊度为 30 NTU 的水体中, $\Delta F_v/F_m$  的日变化与对照差异不显著( $p > 0.05$ ),其最低值也出现在 13:00 时,下降了 13.6%;17:00 时  $\Delta F_v/F_m$  值恢复到早晨的 95.9%。在 60、90 NTU 的池中, $\Delta F_v/F_m$  的变化幅度比对照小,13:00 时分别下降了 10.7% 和 7.7%;  $\Delta F_v/F_m$  的恢复较快,17:00 时  $\Delta F_v/F_m$  值分别恢复了 97.7%、98.9% (见图 4)。表明随悬浮泥沙水体浊度的增高,光照强度降低,苦草光合作用受到的抑制程度减小。

图4 各池苦草  $\Delta F_v/F_m$  的光合日变化Fig. 4 The diurnal  $\Delta F_v/F_m$  variation of *V. spiralis* in 4 pools

## 2.4 水体悬浮泥沙对苦草光响应能力的影响

悬浮泥沙对苦草叶片 PS II 的影响还体现在叶

片对光的响应能力上。在光响应曲线中,刚开始几分钟光照时间内的曲线变化具有重要的决定意义<sup>[9]</sup>。测定快速光响应曲线(RLC)可以确定苦草叶片的实际光化学效率。实验前各池苦草植株叶片的快速光响应曲线差异不显著(见图5),光响应能力差异不显著( $p > 0.05$ )。

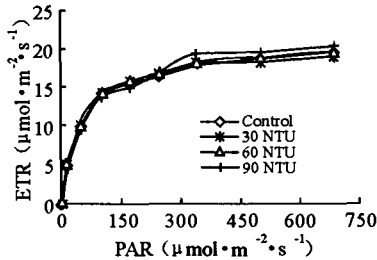


图5 各池苦草实验前的快速光响应曲线  
Fig. 5 Rapid-light curves of *V. natans* before the experiment in 4 pools

实验1个月后,对照和混浊水体中植株叶片的光响应能力均显著降低,光合作用能力显著降低(见图6),表明植株均开始出现衰老现象。在对照和混浊水体中饱和光强显著降低,均为  $176 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;在30、60、90NTU水体中最大光合电子传递速率( $\text{ETR}_{\text{max}}$ )分别为对照的1.07、1.16和1.97倍,均显著高于对照( $p < 0.05$ )。表明水体浊度越高植株叶片在衰老阶段光响应能力降低程度越小。

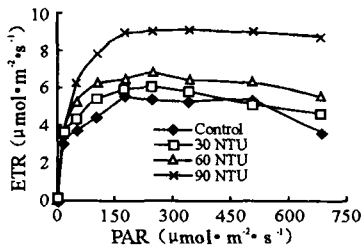


图6 各池苦草起始的快速光响应曲线  
Fig. 6 Rapid-light curves of *V. natans* after one month in 4 pools

### 3 讨论

在含悬浮泥沙的水体中,水体透明度低,水下光照弱。悬浮物沉积在叶片表面上后,进一步削减了进行光合作用的光,并可能导致植株与水体间气体交换和营养物质交换的改变,不利于沉水植被的生长,植株光合作用也会发生变化<sup>[11]</sup>。在过去的16年,叶绿素a荧光测定在评估光合器官性质上已经证明是一种有效的方法<sup>[12]</sup>。研究表明,1个月后各池植株叶片的  $F_v/F_m$  差异不显著,表明实验期间悬浮泥沙水体对苦草PS II没有显著的影响。

光合作用与光强的日变化紧密相连已被广泛地证明<sup>[13]</sup>。通常光合作用随光强增大而增强,到中午达到峰值,午后又逐渐下降。但是,在高光强下将产生光抑制现象,在夏季中午为了保护光合器官免受过量光强的伤害将会出现低潮点<sup>[14]</sup>。PS II效率的下降常用于解释光抑制和光化学调节能力下降<sup>[15]</sup>。结合各水体中光照强度变化和植株  $\Delta F_v/F'_m$  光合日变化可知,在混浊水体中苦草接收的光照强度显著低于对照,光合作用受到的抑制程度小于对照。在对照和混浊水体中,苦草  $\Delta F_v/F'_m$  的白昼变化曲线呈明显的“V”形;随着光照强度的降低,  $\Delta F_v/F'_m$  迅速恢复。水体浊度越高  $\Delta F_v/F'_m$  恢复越快,植株叶片PS II未受到显著的不可逆伤害。

为了进一步了解悬浮泥沙水体对苦草植株叶片光合作用能力的影响,测定了植株叶片的快速光响应曲线(RLCs)。RLC和传统关于氧的光合曲线(photosynthesis-irradiance curve,即P-E曲线<sup>[15]</sup>)一样,测定了光对光合作用的影响。然而,RLC反应的是实际光合作用状态,而不是如P-E曲线(不依赖于光)所示的最佳状态<sup>[16]</sup>。苦草RLC的研究表明,植株的光合作用能力在实验期间均显著下降。1个月后,在对照和悬浮泥沙水体中植株的饱和光强均下降为  $176 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;随悬浮泥沙水体浊度升高,植株的  $\text{ETR}_{\text{max}}$  呈显著升高趋势,特别在90 NTU的水体中,植株  $\text{ETR}_{\text{max}}$  显著高于其它水体的植株。表明在苦草植株衰老的过程中,悬浮泥沙水体植株的光合作用能力比对照的降低程度小;水体浊度( $\leq 90$  NTU)越高,植株接收的光照强度越低,植株光合作用能力降低程度越小。

综上所述,在浅(水深1.0 m)而浑浊的水体中,短时间内混浊水体对苦草成株叶片PS II的影响较小。因而,在我国一些通江湖泊及河流中重建苦草群落时,引种成体植株有利于其在混浊水体中较为正常的生长。

### 参考文献:

- [1] 由文辉,宋永昌.淀山湖3种沉水植物的种子萌发生态[J].应用生态学报,1995,6(2):196-200.
- [2] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis[J]. *Ecol Studies*, 1994, 100: 49-70.
- [3] Wodala B, Deák Z, Vass I, Erdei L, Horváth F. Nitric oxide modifies photosynthetic electron transport in pea leaves[J]. *Acta Biol Szeg*, 2005, 49: 7-8.
- [4] Wen X, Gong H, Lu C. Heat stress induces an inhibition of excitation energy transfer from phycobilisomes to photosystem II but

- not to photosystem I in a cyanobacterium *Spirulina platensis* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2005, **43**: 389–395.
- [5] Takabayashi A, Kishine M, Asada K, Endo T, Sato F. Differential use of two cyclic electron flows around photosystem I for driving CO<sub>2</sub>-concentration mechanism in C4 photosynthesis [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, **102**: 16898–16903.
- [6] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquat Bot*, 2005, **82**: 222–237.
- [7] Durako M J, Kunzelman J I. Photosynthetic characteristics of *Thalassia testudinum* measured *in situ* by pulse-amplitude modulated (PAM) fluorometry: methodological and scale based considerations [J]. *Aquat Bot*, 2002, **1562**: 1–13.
- [8] 颜素珠. 中国水生高等植物图说 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. 237–238.
- [9] Schreiber U, Gademann R, Ralph P J, Larkum A W D. Assessment of photosynthetic performance of *Prochloron* in *Lissoclinum patella* in hospite by chlorophyll fluorescence measurements [J]. *Pl Cell Physiol*, 1997, **38**: 945–951.
- [10] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数意义及讨论 [J]. 植物学通报, 1999, **16**(4): 444–448.
- [11] Korschgen C E, Green W L, Kenow K P. Effects of irradiance on growth and winter bud production by *Vallisneria Americana* and consequences to its abundance and distribution [J]. *Aquat Bot*, 1997, **58**: 1–9.
- [12] Hanelt D, Huppertz K, Nultsch W. Daily course of photosynthesis and photoinhibition in marine macroalgae investigated in the laboratory and field [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1993, **97**: 31–37.
- [13] Henley W J. Measurement and interpretation of photosynthetic light-response curves in algae in the context of photoinhibition and diurnal changes [J]. *J Phycol*, 1993, **29**: 729–739.
- [14] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquat Bot*, 2005, **82**: 222–237.
- [15] Falkowski P G, Raven J A. *Aquatic Photosynthesis* [M]. Oxford: Blackwell, 1997. 375.
- [16] Sakshaug E, Bricaud A, Dandonneau Y, Falkowski P G, Kiefer D A, Legendre L, Morel A, Parslow J, Takahashi M. Parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results [J]. *J Plankton Res*, 1997, **19**: 1637–1670.

## 《武汉植物学研究》投稿须知

为了保证本学报稿件的质量,现将稿件中经常使用的数字、有关统计学符号的用法,及表格、图版、插图的绘制提出具体要求,请作者投稿时注意。

### 1 数字用法

数字执行 GB/T 15835–1995《关于出版物上数字用法的规定》。

公历世纪、年代、年、月、日、时刻和计数、计量均用阿拉伯数字。小数点前或后超过 3 个数字时,每 3 位数字一组,组间空 1/4 个汉字空,如“1,329.467,5”应写成“1 329.467 5”。但序数词和年份、页数、部队番号、仪表型号、标准号不分节。百分数的范围和偏差,前一个数字的百分符号不能省略,如:50%~95%不要写成 50~95%,(50.2±0.6)%不要写成 50.2±0.6%。附带尺寸单位的数值相乘,按下列方式书写:4 cm×3 cm×5 cm,不要写成 4×3×5 cm<sup>3</sup>。

### 2 统计学符号

统计学符号按 GB3358-82《统计学名词及符号》的有关规定书写,常用如下:

(1) 样本的算术平均数用英文小写斜体(中位数仍用  $M$ ) $\bar{x}$ ;

(2) 标准差用英文小写斜体  $s$ ;

(3) 标准误用英文小写斜体  $s_x$ ;

(4)  $t$  检验用英文小写斜体  $t$ ;

(5)  $F$  检验用英文大写斜体  $F$ ;

(6) 卡方检验用希文小写斜体  $\chi^2$ ;

(7) 相关系数用英文小写斜体  $r$ ;

(8) 自由度用希文小写斜体  $\nu$ 。

### 3 表格要求

文中列表是为了将统计资料简明准确地表达出来,使读者容易了解。因此,要简明扼要、栏目清楚、数字准确。如果表中数字不多,能在文中叙述清楚,就不必列表。表中栏目过繁,文字过多,也不宜列表。表格和文中的内容要避免重复,栏目的划分和层次应简明,次要的内容应省略。表中一律不用竖线。每栏的数字计量单位要一致。同一表中的小数位要统一,小数点后为 0 时不要空,以“0”补充。合计数字要横竖相符。统计学处理结果可在表中列出。列表一般以数字为主,必须用文字说明时,可用“\*”号标注,并于表格下以中英文说明。表格的位置应放在相应的文字之后。

(下转第 88 页)