

广东鼎湖山森林小气候的生态效应

王伯蓀 黄慶昌

(生物系)

摘 要

亚热带森林群落小气候具有巨大的生态效应,亚热带森林群落小气候影响着森林群落的組成、结构、更新和演替,以及森林植物的生态特性等諸方面。而且这种影响又是复杂的和深刻的。因此,对于亚热带森林群落小气候生态效应的研究,具有着重要的理論意义和实践意义。

前 言

森林群落的存在,在很大程度上改变着外界生境条件,并創造了独特的内部小气候条件。而这种独特的小气候条件,反过来也必然会作用和影响着森林群落本身,产生着巨大的生态效应。广东鼎湖山分布着許多不同类型的亚热带森林群落^[2],它們所形成的森林小气候又各具特色,并在很多方面有別于曠地小气候,即使和温带森林小气候相較也有着显著的差异^[1]。这样,在了解了鼎湖山森林群落小气候的特点及其变化规律的基础上,进一步来探討它們的生态效应,无疑地将有助于深入地認識和揭露鼎湖山亚热带森林的本質及其規律性,并将有助于森林群落的撫育、采伐和人工更新等生产实践。

一 森林小气候与森林植物的生态特性

森林小气候的差异,无论是在不同类型的森林群落小气候間,或是在同一森林小气候的不同垂直梯度間,都对森林植物的生态特征产生巨大的影响。而这种影响对于处于不同小气候条件下的同一森林植物來說尤为明显,往往会在某些生态特征上表现出显著的差异。

本文于1965年8月16日收到

在不同类型的森林群落間,由于森林群落的組成和結構等方面的不同,而通常会形成截然不同的小气候条件。这种截然不同的小气候条件,对于同一森林植物就具有极其不同的生态效应。例如在鼎湖山的馬尾松群落和生虫树群落間,前者具有类似于曠地的强光、高温、低湿和变幅大等特点的森林小气候,而后者却創造了不同于曠地的弱光、高湿和变幅小等特点的森林小气候^[1]。这两种截然不同的森林小气候对于生长在它們影响下的椎树 *Castanopsis chinensis*和桐树 *Schima superba*等森林植物的幼令植株具有完全不同的生态效应,塑造了完全不同的生态特征。如就叶子的形态解剖特性来說,生长在生虫树群落內的幼令植株,不管是椎树 *Castanopsis chinensis*或是桐树 *Schima superba*,其叶子的形态特征都是較薄而大些、全緣或近全緣而仅具有少数不明显的脉刺或鋸齿、顏色深些、在单位面积內的叶脉和气孔的数目都較少些,表皮和角質层都极薄、叶肉組織的分化不甚强烈,仅有一层排列疏松而不甚整齐的柵状組織。而生长在馬尾松群落內的幼令植株,它們的叶子形态特征則是厚而小些,叶緣具有多数而明显的脉刺或鋸齿,顏色淺些,单位面积內的叶脉和气孔的数目多些、表皮和角質层較厚些,尤其是角質层較生长在生虫树群落內者厚达2倍左右,叶肉組織的分化亦較强烈,具有排列較紧密的柵状組織2-3层(表1)。这种叶子形态特征上的差异,显然是不同的森林小气候,尤其是光因子和水湿条件差异性的直接效应。而前者近似于阴生叶的形态特征应是对弱光和高湿,后者类似于阳生叶或旱生叶的形态特征則应是对强光和低湿的适应結果^[5,6]又如就叶綠素含量来說,生长在生虫树群落內的幼令植株較生长在馬尾松群落內者高达1/3左右(表1),这种叶綠素含量上的差异显然是光因子的直接效应,由于“植物对弱光的适应性具体表现在叶綠素含量很高上面”^[5]因而,生长在生虫树群落內的幼令植株含有高量的叶綠素,也正是对生虫树群落內弱光适应的具体表现。另就水分代謝的状况来說也有明显的差异,其中馬尾松群落內幼令植株的叶子含水量較生虫树群落內者低些,而蒸騰强度却較大1.5-2倍(表I),这种差异显然与湿度条件和温度条件的差异直接相关。此外,在植物的外貌形态上亦表现出明显的差异,如胸径同是9厘米的椎树 *Castanopsis chinensis*,在生虫树群落內者树皮較薄而光滑些,高及9.5米、枝下高亦达4米左右,树冠呈伞形、冠幅达4×3.5米,而在馬尾松群落內者树皮則較厚而粗糙、高仅及5米,枝下高也仅有1.5米,树冠呈园锥形、冠幅达3×3.5米。这种差异显然与小气候条件的差异,尤其是光条件的差异直接有关。由此可见,生长在不同的森林小气候条件下的同种森林植物,无论是在叶子的形态特征上,或是在叶綠素的含量上、或是在水分代謝方面,或是在外貌等特征上都有着显著差异,而这种差异无疑地是对不同森林小气候影响或作用的适应結果。

然而,在一个森林群落的內部,由于“存在着一个十分显著的垂直的环境梯度”,或至少“是存在着两个十分不同的小气候的迭置型式,^[4]这种小气候的垂直梯度对于森林植物中那些較高的成分或大多数藤本植物来說是具有重要的生态意义。

表1.不同森林小气候对森林植物生态特征的影响

| 森林植物 | | 椎 树 ¹⁾ | | 栲 树 ²⁾ | | |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----|
| | | Castanopsis chinensis | | Schima superba | | |
| 森林小气候 | | 馬尾松群落 | 生虫树群落 | 馬尾松群落 | 生虫树群落 | |
| 叶 子 的 形 态 特 征 | 叶 长 (厘米) | 10.7 | 12.1 | 12 | 15 | |
| | 叶 寬 (厘米) | 2.4 | 2.9 | 3.6 | 4.5 | |
| | 叶 厚 (微米) | 198 | 156 | 212 | 177 | |
| | 表皮厚 (微米) | 上 | 16 | 14 | 16 | 14 |
| | | 下 | 12 | 10 | 10 | 8 |
| | 角質层厚(微米) | 4 | 2 | 4 | 3 | |
| | 柵状組織厚(微米) | 128 | 74 | 80 | 64 | |
| | 海綿組織厚(微米) | 62 | 56 | 102 | 88 | |
| | 叶脉长 (毫米/厘米 ²) | 715 | 506 | 124.5 | 102 | |
| | 气孔数 (下表皮个/毫米 ²) | 703 | 436 | 628 | 471 | |
| 叶綠素含量 (毫克/克干重) | | 6.8 | 10 | 9.6 | 14.7 | |
| 叶含水量(%) 1月 | | 50.25 | 51.33 | 61 | 65 | |
| 蒸騰强度 (毫克/克小时) 1月11时 | | 350 | 160.9 | 320 | 248 | |

这些森林植物必須能以适应这种小气候的垂直梯度变化,至少在它們的生长发育过程中,在幼令期必須能以适应較阴蔽、湿润和日变化及季节变化都較稳定的林下小气候条件。而当它們成长时,又必須能以适应强光、高温、低湿和多变的較高层次的小气候条件。这样,它們的各种特征也必須在很大程度上密切地与小气候条件的垂直梯度变化相协调相统一。例如,对生虫树群落小气候垂直梯度变化具有良好适应关系的生虫树 *Cryptocarya concinna*, 位于林下小气候条件控制下的幼令植株

1) 王伯森·张显华:广东鼎湖山森林植物生态学研究 I,椎树 *Castanopsis chinensis* Hance 的比較生态学研究(未刊稿)摘要見中山大学第七次科学报告討論会論文摘要 1964年(油印本)

2) 王伯森·郑锡明:广东鼎湖山森林植物生态学研究 II,栲树 *Schima superba* Gardn & Champ. 的比較生态学研究(未刊稿)

具有着較典型的阴生叶形态特点、較高的叶綠素含量和叶子含水量、較低的吸水压和蒸騰强度。位于下层林冠(第三层林冠)的小气候条件控制下的成年植株,具有类似中生叶形态特点,較低的叶綠素含量和叶子含水量、較强的吸水压和蒸騰强度。而位于上层林冠或林緣等完全暴露于日光和风的全部势力下的成年植株,則相反地具有着近似于阳生叶或旱生叶的形态特点,最低的叶綠素含量和叶子含水量、最强的吸水压和蒸騰强度(表2)。¹⁾ 位于不同垂直空間的生虫树 *Cryptocarya concinna* 异令植株間的叶子形态特征的差异,無疑地是取决于光和水湿条件的垂直梯度变化,随着光条件自下而上的增强和水湿条件的自下而上的减弱,生虫树 *Cryptocarya concinna* 异令植株的叶子相应地由阴生型到中生型以至于呈現阳生型或旱生型的形态特征,而叶綠素含量的差异則首先是取决于光条件的垂直梯度变化,随着光强度自上而下的逐层弱化的,叶綠素含量則相应地增高。至于吸水压和蒸騰强度的差异,則首先是取决于大气湿度的垂直梯度变化,随着大气湿度自下而上的减弱,吸水压和蒸騰强度則相应地增强。这样看来,生虫树 *Cryptocarya co-*

表2. 生虫树群落小气候垂直梯度变化对生虫树
Cryptocarya Cconcinna 生态特征的影响

| 小气候的垂直梯度 | | 林 下 | 下层林冠 (第三层林冠) | 上层林冠 (林緣) | |
|----------------------------|-------------------|-------|-----------------|--------------|------|
| 叶 子 形 态 特 征 | 叶 长 (厘米) | 10.5 | 7.2 | 7.0 | |
| | 叶 寬 (厘米) | 3.2 | 2.4 | 1.8 | |
| | 叶 厚 (微米) | 135.6 | 145.7 | 154.2 | |
| | 表皮厚 (微米) | 上 | 10 | 14 | 15.4 |
| | | 下 | 7.4 | 8 | 10 |
| | 角質层厚(微米) | 2 | 4.5 | 5 | |
| | 柵状組織厚(微米) | 25.2 | 54 | 64.6 | |
| | 海綿組織厚(微米) | 91 | 65.2 | 59.2 | |
| | 叶綠素含量 (毫克/克干重) | 10.75 | 5.95 | 4.75 | |
| | 叶含水量(%) 夏季 | 72.75 | 72.13 | 63.61 | |
| 蒸騰强度夏季13时 (毫克/克小时) | 334.6 | 468.6 | 529.2 | | |
| 吸水压(大气压) | 9.03 | 12.08 | 12.18 | | |

- 1.) 王伯蓀, 林耀汉: 广东鼎湖山森林植物生态学研究 I. 生虫树 *Cryptocarya concinna* Hance 的生态学研究 (未刊稿) 摘要見中山大学第七次科学报告 討論会 論文摘要, 1964年(油印本)

ncinna 异合植株间的上述生态特征的差异,完全是小气候垂直梯度变化的综合影响的结果,完全是依其所属层次小气候条件的特点而有规律地相应变化的结果。

这样,属于同一森林植物的不同个体或种群,由于它们所处的森林小气候条件的差异,就形成了它们在形态结构上和生理功能上各方面的差异,以达到它们对不同森林小气候条件的最大适应。可见,森林小气候对于森林植物生态特性的巨大影响。

二 森林小气候与森林群落的组成和结构

森林群落所形成的小气候条件,既然影响着森林植物的生态特性,那么也必然会影响着森林群落的组成和结构,而对森林群落林下植物组成和结构,在很大程度上起着决定性的作用。

广东鼎湖山的鱼尾葵群丛 *Caryota ochlandra* Association、拟桫欏群丛 *Cyathea podophylla* Association 等森林群落,由于林冠结构复杂,盖幕作用大,致使林下光强度仅及旷地全光照的2—3%,大气湿度经常处于饱和状态,相对湿度平均达90%以上,温差小,即是夏季日温差亦仅及3—4°C左右,林下小气候的特点是浓荫、高湿而稳定^[1]。这在很大程度上促进了林下阳湿生类型草本植物的繁茂。这类草本植物大都具有比较肉质的地上茎和叶子,它们常占优势构成特殊的林下植被。其中尤其是种类繁多的阴湿生的蕨类植物,如同拟桫欏 *Cyathea podophylla*、观音座莲 *Angiopteris* spp, 三叉蕨 *Tectaria* spp, 短肠蕨 *Allantobia* spp, 卷柏 *Selaginella* spp, 铁角蕨 *Asplenium* spp, 华南实蕨 *Bolbitis subcordata* 和沙皮蕨 *Hemigerama decurrens* 等常占优势并构成林下草本层中的优势层片。而象大戟科,茜草科,山欏科、棕欏科以及桃金娘科等热带成分的乔灌木种类在林下的丰富,也与这种高湿高温而稳定的小气候特点直接相关。又如在林下常见的斑駁性叶子,象具有铜绿色光泽叶子的翠云草 *Selaginella uncinata*、缙有白色或灰绿色等斑点叶子的桑勒草 *Soneila contoniensis* 和秋海棠 *Begonia* spp. 以及饰有金黄色条纹的天鹅绒般碧蓝绿色泽叶子的开唇兰 *Anoectochilus roxburghii* 等,显然也是对林下弱光的一种积极适应。

但是在马尾松群落中,由于类似于旷地的强光、低湿和变幅大等特点的森林小气候作用下,岗稔 *Rhodomyrtus tomentosa*、岗松 *Baeckia frutescens*、野牡丹 *Melastoma candidum* 和芒萁 *Dicranopteris dichotoma* 等植物仍能在林下正常地繁茂生长,使林下植物组成和结构特点都充分地保留着荒山灌丛草地植被的原貌。同时,在这种森林小气候作用下,象椎树 *Castanopsis chinensis* 和栲树 *Schima superba* 等阳性植物也能以在林下正常地生长发育。

1) 中山大学植物专业1963年生产实习资料。

而在生虫树群落中, 林下草本植物組成和层片結構的变化也反映了小气候条件的局部变化。如在濃阴、高湿的山脚和山谷地段, 常見由沙皮蕨 *Hemigerma decurrens*、大羽双盖蕨 *Diplazium donianum* 或金粟兰 *Sarcandra glabra* 等为优势所构成的不同的草本层片。在林冠疏朗或林窗地段, 光强度較正常林下光条件增强了2-3倍, 相对湿度降低了10%左右, 在这种局部的林下小气候的主导下, 則出现了由鉄芒蕨 *Dicranopteris linearis* 占优势的草本层片。并可常見到在正常林蔭下很难見到的椎树 *Castanopsis chinensis* 和栲树 *Schima superba* 等阳性植物的幼令植株。“虽然在过去, 光在决定森林結構中的作用強調得太过分了”⁽⁴⁾, 但光条件的变化对于上述林下植物組成和結構上的差异, 无疑地仍具有重要意义。

此外, 在魚尾葵群丛 *Caryota ochlandra* Association 和糙什树+大沙叶+小盘木群丛 *Gironniera subaequalis*+*Aporosa chinesis*+*Microdesmis casearifolia* Association 等森林群落中, 具有較丰富的藤本、附生和絞杀植物、板根和茎花等雨林景色, 虽不能武断地說这全都是小气候的直接效应。但是, 这些森林群落所形成的濃阴、高湿的小气候条件, 对增强上述雨林特色至少也具有积极的作用。

三 森林小气候与森林群落的更新和演替

森林群落的更新和演替虽是一个极其复杂, 尚待深入地研討的問題。然而, 森林小气候在这方面显然也具有一定的积极意义。森林小气候影响着森林植物的生长发育, 进而会对森林群落的更新和演替起着巨大的影响。

如在广东鼎湖山的生虫树群落, 拟杪欏群落、魚尾葵群落以及糙叶树群落中, 椎树 *Castanopsis chinensis* 和栲树 *Schima superba* 等森林植物虽常高居林冠层, 并参与了林下小气候的形成。但是, 却很少見或甚至完全见不到它們的幼令植株在林下生存或正常地生长发育。尤其是在生虫树群落中, 它們虽以优势种的身份参与了林冠层, 并对生虫树群落小气候的形成起着巨大的作用。但是, 这种由它們积极参与而形成的森林小气候, 却成为它們在生虫树群落中自然更新的障碍, 濃蔭条件致使它們的幼株难以在正常的小气候条件下生存, 即使偶而在透光系数大于4-5%的局部地段見到一两株, 生长发育亦不佳而完全处于被抑制状态。这样, 它們在群落中一方面既然是不能正常地自然更新, 另一方面它們的立木枯倒了一株, 也就少了一株。它們在群落中的优势地位也必然受到影响, 并逐漸为其他森林植物所取代而处于衰退状态。例如, 根据1955年的資料⁽²⁾、在生虫树群落中的椎树 *Castanopsis chinensis* 的立木多度达8.5%, 平均每百平方米內有两株, 幼令植株的多度达2%弱, 平均每百平方米內有9株。而根据1963年的資料⁽¹⁾, 无论是立木或是幼株, 其多度和密度都显著地下降了, 如立木的多度仅及1%, 平均每百平方米內尚不到一株, 幼株的多度尚不到千分之一, 平均每百平方米內亦不过是一两株而已。以外, 象栲树 *Schima superba*, 藜蕨 *Castanopsis fissa*, 紅皮紫陵

Craibiodendron Kwangtungense 等森林植物也有类似的情况。与此相反, 象生虫树 *Cryptocarya concinna* 等森林植物的幼株具有较强的耐阴力, 并能以适应森林小气候的垂直梯度变化。这样, 不但保证了它们能以在群落中正常地生长发育和自然更新, 并在森林群落的更新和演替过程中日益取得优势。例如, 生虫树 *Cryptocarya concinna* 在生虫树群落中立木的多度由1955年的33%增长到1963年的34%, 而幼株的多度则由50%上升为60%, 它在群落中的地位和作用日益加强, 并取得绝对优势。即是在浓阴的鱼尾葵, 糙叶树或拟杪等群落中, 虽不见有它的立木存在, 但其幼令植株在林下却较普遍, 并占有一定的优势, 将会对群落的更新和演替起着积极影响。

但是, 在馬尾松群落中, 椎树 *Castanopsis chinensis*, 黎蒴 *C. fiisa* 以及桐树 *Sohima superba* 等森林植物却能正常地生长发育, 在馬尾松群落的更新和演替过程中起着巨大作用, 改变了单优针叶林状态, 构成针叶与闊叶混交林, 并将会排挤了馬尾松 *Pinus massoniana* 而向常綠闊叶林演替。然而, 生虫树 *Cryptocarya concinna* 在馬尾松群落中, 却从不見其踪迹。

为什么椎树 *Castanopsis chinensis*, 桐树 *Schima superba* 等能在馬尾松群落中正常地生长发育和自然更新, 并会在一定程度上取代馬尾松 *Pinus massoniana*, 却不能在其他森林群落中正常地生长发育和自然更新, 并被其他森林植物所取代呢? 而生虫树 *Cryptocarya concinna* 却恰恰与此相反地不能在馬尾松群落中生长, 却能在其他群落中正常地生长发育和自然更新? 虽然这都是有待深入研究的問題。但是, 森林小气候的差异在这方面也确实起着巨大的作用。正由于生虫树群落内过于蔭蔽的小气候条件成为以椎树 *Castanopsis chinensis* 为代表的阳性植物在森林群落中自然更新的障碍, 而逐渐为其他植物所取代。但是在另一方面, 馬尾松群落内具有强光的小气候条件, 能以满足它们的需要而能以正常地生长发育。即是在蔭蔽的生虫树群落中, 当老树死亡或风倒木形成一个天窗或空隙, 也常成为它们幼株生存或自然更新的一个良好机遇, 或者说在生虫树群落中它们的幼株的生存或自然更新似乎是绝对有賴于空隙。这样, 一个空隙或天窗由于具有一个局部的特异的小气候条件, 它就成为“一个非常小规律的次生演替场所”^[4]。

可見, 森林小气候对森林群落的更新和演替是具有多么巨大的影响和作用。

結語与討論

亚热带森林群落的小气候具有巨大的生态效应。不同类型的森林群落所形成的小气候条件不同, 它们的生态效应也就具有显著的差异。即是在同一森林群落中, 小气候的垂直梯度变化或水平分布的差异, 也具有着显然不同的生态效应。

亚热带森林小气候的生态效应, 首先是反映在森林植物生态特性的变化上。并在很大程度上反映在森林群落的組成和結構特征上, 尤其是林下植物的組成和結構

上。这样，森林小气候也必然会对森林群落的更新和演替产生巨大的影响。

亚热带森林小气候的生态效应，虽然无疑地是由各种气象要素综合作用的结果，但其中总是会有一个或是几个因素占有主导地位。例如光条件，虽然“认为光条件是决定森林下木结构和成分的主要因子的重要性的提法，现在已开始受到反对”〔4〕，但“在植物群落中，上层植被对下层植被的遮光效应具有重要的生态意义”〔3〕，并在多数情况下也确实起着主导作用。又如水湿条件在植物群落中也常是一个重要的生态因素，并常单独地或与光条件等共同起着主导作用。

亚热带森林小气候的生态效应，其实质应是植物群落与其所创造的内部环境（小气候）条件间相互关系的一种具体表现，也是植物群落与植物（个体）间相互关系的一种具体表现。而这种关系实际上是通过植物（个体）与环境（内部环境）的矛盾统一而实现的。因而，森林小气候的生态效应，一方面固然是取决于森林小气候的特点，另一方面也取决于森林植物的生态学和生物学特性。

森林群落形成后，必然会对环境条件发生巨大的影响，并创造了独特的小气候条件，这种小气候条件反过来首先通过对森林植物的影响，而对森林群落的组成，结构，更新和演替发生影响，并在某种程度上改变了森林群落的原貌。然而，变化了的森林群落反过来也必然会促使原有的森林小气候在某种程度上的变化，这样，森林群落与森林小气候间是处于不断地相互作用、相互制约和不断地发展变化之中，两者相互间是矛盾统一的辩证关系。

因此，关于森林小气候生态效应的研究，无疑地具有重要的理论意义和实践意义。

参 考 文 献

- 〔1〕 王伯蓀、黄庆昌、黄培佑：1965，广东鼎湖山森林群落的小气候 中山大学学报 1965年第三期
- 〔2〕 張宏达、王伯蓀、張超常、丘华兴：1955，广东高要鼎湖山植物群落之研究 中山大学学报1955年第三期159-227頁
- 〔3〕 Kramer P. J., Kozlowski T. T. 1963: 树木生理学(李天庆等譯) 农业出版社
- 〔4〕 Richards P. W. 1957: The Tropical Rain Forest (Reprinted)
- 〔5〕 Рубин Б. А. 1956: 植物生理学第一册(姜成后等譯) 高等教育出版社
- 〔6〕 Шенников А. П. 1953: 植物生态学(王汶譯) 新农出版社

The Ecological Effect of the Microclimate in the
Subtropical Forest Community of Ting—Wo Shan,
Kwangtung.

Wang Bo—Sun Huang ching—chang

Abstract

The microclimate of the subtropical forest has a great ecological effect on The forest community. But the various types of microclimates have different ecological effects.

The microclimate of the subtropical forest not only influenced the ecological characteristics of the forest plants, but the forest composition, structure, regeneration and succssion.

Therefore, the study of the ecological effect of the microclimate in the subtropical forest community has practical and theorical Significance.

表 1 分級結果

| 級分 | 未老 化 样 品 (A) | | | | | | 未老 化 样 品 (B) | | | | | | 空 气 | | | | | | | | | | | | | |
|----|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|-------|-------|-------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|---------------------------|---------------------------|
| | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.7114 | 1.74 | 17.10 | 25.27 | 3.987 × 10 ⁻¹⁴ | 0.8345 | 1.55 | 14.30 | 11.33 | 5.783 × 10 ⁻¹⁴ | 0.5910 | 1.33 | 11.90 | 10.20 | 1.702 × 10 ⁻¹³ | 0.4448 | 1.68 | 15.70 | 15.83 | 5.019 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3853 | 1.45 | 13.30 | 13.45 | 7.236 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 2 | 0.5191 | 1.43 | 13.20 | 16.98 | 7.775 × 10 ⁻¹⁴ | 0.7325 | 1.49 | 11.00 | 9.39 | 6.618 × 10 ⁻¹⁴ | 0.1750 | 1.30 | 11.60 | 6.13 | 1.072 × 10 ⁻¹³ | 0.5853 | 1.58 | 15.03 | 20.59 | 5.504 × 10 ⁻¹⁴ | 0.1311 | 1.66 | 16.10 | 4.59 | 4.685 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 3 | 0.5735 | 1.16 | 10.00 | 13.76 | 1.532 × 10 ⁻¹³ | 0.3343 | 1.32 | 14.30 | 10.69 | 3.302 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3253 | 1.40 | 12.80 | 11.40 | 3.141 × 10 ⁻¹⁴ | 0.6532 | 1.24 | 10.80 | 22.27 | 1.261 × 10 ⁻¹³ | 0.4735 | 1.53 | 14.40 | 16.70 | 5.179 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 4 | 0.3925 | 0.90 | 7.13 | 12.83 | 3.721 × 10 ⁻¹³ | 0.5888 | 1.29 | 11.50 | 20.42 | 1.098 × 10 ⁻¹³ | 0.3591 | 1.10 | 9.35 | 12.38 | 1.823 × 10 ⁻¹³ | 0.4364 | 0.904 | 7.15 | 16.05 | 3.687 × 10 ⁻¹³ | 0.4905 | 1.20 | 10.40 | 17.42 | 1.383 × 10 ⁻¹³ | |
| 5 | 0.4153 | 0.72 | 5.24 | 13.6 | 3.141 × 10 ⁻¹³ | 0.5464 | 1.09 | 9.18 | 11.09 | 1.363 × 10 ⁻¹³ | 0.2973 | 1.10 | 9.29 | 10.41 | 1.865 × 10 ⁻¹³ | 0.3773 | 0.68 | 4.83 | 13.16 | 9.738 × 10 ⁻¹³ | 0.6365 | 0.99 | 8.04 | 22.22 | 2.696 × 10 ⁻¹³ | |
| 6 | 0.4452 | 0.43 | 2.61 | 14.56 | 4.685 × 10 ⁻¹³ | 0.6330 | 0.90 | 7.11 | 10.24 | 3.721 × 10 ⁻¹³ | 0.1321 | 0.897 | 6.73 | 5.33 | 4.716 × 10 ⁻¹³ | 0.3461 | 0.44 | 2.62 | 12.47 | 4.578 × 10 ⁻¹³ | 0.3857 | 0.72 | 5.28 | 12.41 | 7.775 × 10 ⁻¹³ | |
| 7 | | | | | | 0.7152 | 0.74 | 5.42 | 9.18 | 7.265 × 10 ⁻¹³ | 0.3591 | 0.606 | 4.13 | 31.15 | 1.415 × 10 ⁻¹⁴ | | | | | | | 0.3832 | 0.41 | 2.50 | 13.48 | 5.137 × 10 ⁻¹³ |
| 8 | | | | | | 0.4811 | 0.60 | 4.13 | 6.20 | 1.447 × 10 ⁻¹³ | 0.3831 | 0.245 | 1.24 | 12.82 | 3.095 × 10 ⁻¹¹ | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | 0.8937 | 0.42 | 2.54 | 11.48 | 5.02 × 10 ⁻¹² | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 原裝樣 2W ₁ | 3.0975 | 1.11 | 7.9276 | 1.13 | 2.8656 | 0.961 | 2.8673 | 1.034 | 2.8819 | 1.014 |
|------------------------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 2W ₁ | 3.0575 | 1.14 | 7.8028 | 1.12 | 2.8550 | 0.896 | 2.8426 | 1.14 | 2.8841 | 1.096 |

| 級分 | 空 气 | | | | | | 空 气 | | | | | | N ₂ | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|--------|--------|--------|---------------------------|--------|------|--------|--------|---------------------------|------|
| | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | W ₁ (克) (分升/克) | $\bar{M}_n \times 10^{-4}$ | $\omega_1(\%)$ | a_1 (參照數) | | | | | | | | | | |
| 1 | 0.1219 | 1.29 | 11.50 | 4.34 | 1.098 × 10 ⁻¹³ | 0.5273 | 1.40 | 12.30 | 13.32 | 3.332 × 10 ⁻¹⁴ | 0.4915 | 1.48 | 13.80 | 17.89 | 3.929 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3411 | 1.58 | 15.00 | 12.05 | 5.504 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3192 | 1.67 | 16.30 | 11.16 | 4.573 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 2 | 0.2396 | 1.52 | 14.30 | 10.67 | 6.320 × 10 ⁻¹⁴ | 0.4786 | 1.30 | 11.60 | 17.24 | 1.098 × 10 ⁻¹³ | 0.4321 | 1.73 | 17.70 | 15.49 | 3.721 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3390 | 1.69 | 16.40 | 11.38 | 4.474 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3215 | 1.71 | 16.70 | 11.25 | 4.273 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 3 | 0.2592 | 1.49 | 13.90 | 11.62 | 6.772 × 10 ⁻¹⁴ | 0.3732 | 1.11 | 9.46 | 13.66 | 1.731 × 10 ⁻¹³ | 0.2304 | 1.37 | 12.40 | 9.43 | 3.923 × 10 ⁻¹⁴ | 0.5235 | 1.40 | 12.90 | 19.36 | 3.332 × 10 ⁻¹⁴ | 0.4658 | 1.61 | 15.40 | 16.29 | 5.237 × 10 ⁻¹⁴ | |
| 4 | 0.3308 | 1.23 | 10.80 | 11.73 | 1.261 × 10 ⁻¹³ | 0.4163 | 0.89 | 7.00 | 15.02 | 3.808 × 10 ⁻¹³ | 0.2339 | 1.29 | 11.50 | 8.47 | 1.098 × 10 ⁻¹³ | 0.3974 | 1.20 | 10.40 | 14.04 | 1.415 × 10 ⁻¹³ | 0.4616 | 1.30 | 11.60 | 16.14 | 1.074 × 10 ⁻¹³ | |
| 5 | 0.3987 | 0.83 | 6.80 | 32.00 | 3.987 × 10 ⁻¹⁴ | 0.5144 | 0.65 | 4.63 | 13.53 | 1.098 × 10 ⁻¹² | 0.2126 | 1.04 | 8.67 | 7.55 | 2.295 × 10 ⁻¹³ | 0.5388 | 0.88 | 6.39 | 19.33 | 3.987 × 10 ⁻¹³ | 0.5924 | 0.93 | 7.46 | 20.72 | 3.241 × 10 ⁻¹³ | |
| 6 | 0.3997 | 0.65 | 4.60 | 14.23 | 1.098 × 10 ⁻¹³ | 0.4611 | 0.46 | 2.84 | 16.62 | 7.54 × 10 ⁻¹³ | 0.3533 | 0.86 | 6.65 | 12.70 | 1.372 × 10 ⁻¹³ | 0.2179 | 0.37 | 4.75 | 7.70 | 1.025 × 10 ⁻¹² | 0.3707 | 0.67 | 4.80 | 12.96 | 1.002 × 10 ⁻¹² | |
| 7 | 0.4877 | 0.47 | 3.00 | 17.72 | 3.317 × 10 ⁻¹² | | | | | | 0.2464 | 0.76 | 5.69 | 8.32 | 3.403 × 10 ⁻¹³ | 0.4245 | 0.41 | 2.44 | 14.09 | 1.504 × 10 ⁻¹³ | 0.3280 | 0.38 | 2.25 | 11.48 | 3.613 × 10 ⁻¹² | |
| 8 | | | | | | | | | | | 0.5266 | 0.45 | 2.91 | 19.08 | 3.554 × 10 ⁻¹² | | | | | | | | | | | |
| 原裝樣 2W ₁ | 2.8338 | 0.95 | 2.8173 | 0.95 | 2.8173 | 0.95 | 2.7755 | 0.97 | 2.8369 | 1.20 | 2.7312 | 1.18 | 2.8255 | 2.8312 | 2.8312 | 1.09 | 2.8255 | 2.8312 | 2.8312 | 2.8312 | 2.8312 | 1.11 | 2.8772 | 2.8692 | 2.8692 | 1.18 |

表 2

| 样 品 | $\frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n}$ | 微 分 分 布 曲 线 | | 老化后微分分布曲线减少部分 | | 老化后微分分布曲线增加部分 | |
|------------------------------|-------------------------------|--|-------|---|--------------------|---|----------------------|
| | | 峰高 峰对应分子量 $\left(\frac{d\omega_i}{dM} \times 10^{-5}\right)$ | | 占分子量范围 | 重 量 百 分 数 | 占分子量范围 | 重 量 百 分 数 |
| 原样品 A | 1.78 | 3×10^4 | 0.788 | | | | |
| 原样品 B | 1.66 | 3×10^4 | 0.790 | | | | |
| 空 气 150°C, 8小时 | 2.22 | 1.7×10^4 | 0.91 | $7.7 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ | 16% | $0 \sim 7.7 \times 10^4$ | 12% |
| 空 气 170°C, 1小时 | 1.69 | 3.5×10^4 | 0.73 | $0.5 \times 10^4 \sim 6.9 \times 10^4$ $26 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ | 2.5% 0.8% | $12 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4$ $21 \times 10^4 \sim 26 \times 10^4$ | 1.5% 0.8% |
| 空 气 180°C, 1小时 | 1.66 | 3.3×10^4 | 0.71 | $0 \sim 6.5 \times 10^4$ $19 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ | 3.4% 3.6% | $6.8 \times 10^4 \sim 19 \times 10^4$ | 4.7% |
| 空 气 180°C, 3小时 | 1.58 | 4×10^4 | 1.05 | $0 \sim 2.3 \times 10^4$ $10 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ | 2.1% 14% | $2.5 \times 10^4 \sim 9.5 \times 10^4$ | 12% |
| 空 气 190°C, 1小时 | 1.59 | 3.5×10^4 | 1.01 | $7.8 \times 10^4 \sim 9.5 \times 10^4$ $13.2 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ | 0.2% 11.5% | $2 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ $9.5 \times 10^4 \sim 13.2 \times 10^4$ | 8.2% 1.7% |
| N ₂ 150°C, 8小时 | 1.73 | 3.5×10^4 | 0.76 | $1.7 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$ $6 \times 10^4 \sim 13 \times 10^4$ | 0.9% 1.6% | $3.5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ $13 \times 10^4 \sim 17.5 \times 10^4$ $20.5 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ | 0.5% 0.5% 1.5% |
| N ₂ 180°C, 1小时 | 1.74 | 3×10^4 | 0.73 | $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ $8.5 \times 10^4 \sim 10.3 \times 10^4$ $22.5 \times 10^4 \sim 33 \times 10^4$ | 2.7% 0.3% 1% | $10.3 \times 10^4 \sim 22 \times 10^4$ $6.8 \times 10^4 \sim 8.3 \times 10^4$ | 3.4% 0.2% |
| N ₂ 180°C, 3小时 | 1.78 | 2.5×10^4 | 0.68 | $0 \sim 8.5 \times 10^4$ | 5.1% | $9 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4$ $14.5 \times 10^4 \sim 26.5 \times 10^4$ $27.5 \times 10^4 \sim 35 \times 10^4$ | 0.7% 2.5% 1.2% |