

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

040710

能屈能伸的哲學—端黑豹斑蝶的適應策略

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高二 吳哲廣 高二 林昱辰 高二 雲柏翔	指導老師： 謝佳昌 黃冠陵
---	-----------------------------

關鍵詞：端黑豹斑蝶、適應策略、複迴歸分析

摘要

臺灣及日本氣候不同，日本年均溫低且年溫差大。兩地端黑豹斑蝶幼蟲較易取得的堇菜也不同，推測兩地族群發展不同適應策略。首先比較 COI 基因，檢視族群分化。記錄不同族群在不同溫度下的生活史、型態(體長、翅長、腹重)，並餵養不同食草，探討不同族群是否有不同適應。

比較 COI 序列，發現日、臺族群未有明顯分化。各族群在生長發育、宿主植物利用及生殖投資可能發展出不同的適應策略。臺灣族群生活史長、發育零點高、有效積溫低，對宿主植物的變化較敏感。高溫下日本族群體、翅長縮小，而臺灣族群體、翅長雖有類似現象，但對溫度改變較不敏感。臺灣族群體重隨溫度上升縮小，雌蝶腹重比例於高、低溫均增加。端黑豹斑蝶發展以上不同生理反應以適應。

壹、前言

一、端黑豹斑蝶介紹

(一) 生物學分類

端黑豹斑蝶 *Argyreus hyperbius*，屬鱗翅目、蛺蝶科、豹蛺蝶屬，由 Tsukada, E(1985)將其分為十一個亞種(11)。別名為斐豹蛺蝶、裴胥、黑端豹蛺蝶。

(二) 生活史

1. 卵

剛開始產下的卵呈淡黃色、倒樽形，經過約四天，受精的卵便會逐漸變黑，黑色部分即為孵化幼蟲的頭殼。



圖一 未孵化的卵



圖二 即將孵化的卵

2. 幼蟲

齡期共有六齡。在更換齡期前，幼蟲都會蛻去其頭殼和表皮。一齡蟲身體呈半透明並帶有細毛。而從二齡蟲開始，幼蟲身體會變為黑色，且愈高齡蟲其身上紅橘色紋路愈明顯。幼蟲胸部有三對前足，而腹部上有似吸盤的足，以利吸附於枝葉上攝食。在一到六齡中，以六齡蟲的食量最大且發育日數最長。



圖三 一齡幼蟲



圖四 準備進入下一齡期的幼蟲



圖五 終齡幼蟲



圖六 各齡期頭殼



圖七 蛹

3. 蛹

終齡蟲在化蛹前，會將其絲附著於枝葉，呈倒吊狀，並將其頭殼及皮蛻去。端黑豹斑蝶蛹的形式屬於吊蛹，剛形成時其頭部及翅鞘呈肉色，後便逐漸變為深褐色，背上還帶有金屬色斑點。

4. 成蝶

端黑豹斑蝶具雌雄雙型性，其中雄蝶具有橘黃色翅室，並有黑色圓斑。雌蝶擬態有毒的樺斑蝶(1)，前翅末端為一深色區塊並有一條白帶貫穿。此外，公雌蝶翅膀邊緣皆帶有黑色橫紋。前翅長平均為 25~40 公釐，體長平均為 20~30 公釐。



圖八 雄蝶



圖九 雌蝶



圖十 樺斑蝶

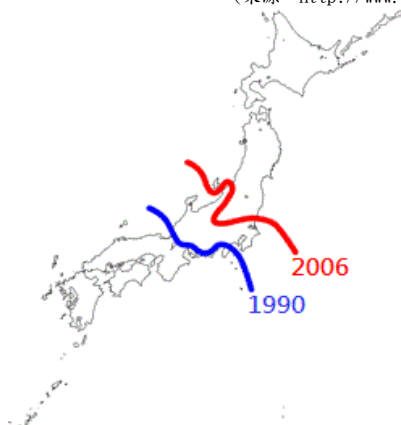
(三) 地理分布

端黑豹斑蝶主要分布於亞洲。於臺灣，全島均有端黑豹斑蝶分布，不過主要集中於中北部縣市。於日本，其分布北線近期有北移的現象(5)。



圖十一 端黑豹斑蝶的世界分布圖

(來源：<http://www.discoverlife.org/mp/20m?map=Argyreus+hyperbius>)



圖十二 端黑豹斑蝶在日本的分布北界

(來源：www.pteron-world.com/.../hyperbius.html)



圖十三 端黑豹斑蝶在臺灣的分布

注：圖中數子代表記錄次數

(來源：臺灣生物多樣性入口網)

http://taibif.tw/zh/catalogue_of_life/page/dfaa-3d5c-af82-f890-584e-af1a-61b1-3de8-namecode-347073

(四) 食草

1. 食草種類

端黑豹斑蝶主要以各種堇菜科(Violaceae)植物為食，例如：三色堇(*Viola tricolor*)、香堇菜(*Viola odorata*)、小堇菜(*Viola inconspicua*)、茶匙黃(*Viola diffusa*)等。



圖十四 三色堇



圖十五 香堇菜



圖十六 小堇菜



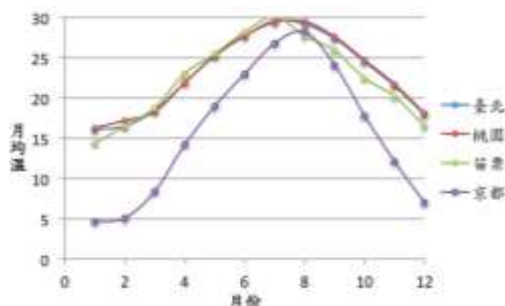
圖十七 茶匙黃

2. 食草分布

三色堇和香堇菜為近親，二者原先為歐美高緯度國家園藝植物，後被引進日本、臺灣等地。在臺灣平地，三色堇及香堇菜較適合於9~12月播種。小堇菜分布於全台低中海拔山區；茶匙黃分布於全台低中海拔山區(3)。

二、樣區選擇與比較

我們先從苗栗縣採集到實驗雌蝶，後來考量到不同地區的族群因為環境差異可能會發展出不同的適應策略，因此再多找了幾個地區的蝴蝶，比較生長策略，所以我們加入了北臺灣的族群(包括：臺北市、桃園縣)。另外，為了深入了解日本族群分布線北移的現象，還另外和日本姊妹校合作，並將其資料一併討論。



圖十八 各樣區氣溫變化

表一 各地區詳細資料

	經度	緯度	平均氣溫	溫差
日本京都	35°5' N	135°43' E	15.5°C	22.2°C
臺北	25°03' N	121°30' E	23°C	13.5°C
桃園	24°59' N	121°18' E	23.15°C	13.1°C
苗栗	24°23' N	120°49' E	22.44°C	15.7°C

三、實驗目的

為了比較不同地區的端黑豹斑蝶族群是否對當地不同的環境發展出各自的適應策略，我們設計了以下幾項實驗。

- (一) 基因相似度：推測不同族群分化的時間。
- (二) 發育情形：探討性別、地區、溫度與食草對端黑豹斑蝶發育日數的影響。進而比較各族群發育零點、有效積溫。
- (三) 成蝶體型：探討性別、地區、溫度與食草對蝴蝶形態的影響。
- (四) 成蝶體重：探討地區、溫度、食草對成蝶總體重及雌蝶腹重的影響。

貳、研究材料與設備

一、生物材料

- (一) 實驗雌蝶
- (二) 食草

二、抽取成蝶 DNA 材料

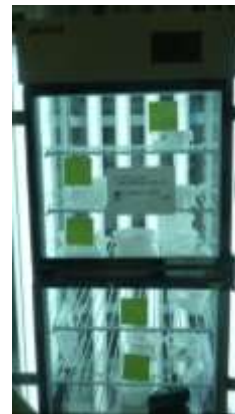
- (一) 藥品：AxyPrep Multisource Genomic DNA Miniprep Kit
- (二) 器材：吸量管、離心機、震盪機、聚合酶連鎖反應器、洋菜膠

三、其餘器材與設備

- (一) 恆溫生長箱
- (二) 網箱(供蝴蝶交配所用)
- (三) 飼養盒(15cm*7.6cm*4.4cm)
- (四) 測量成蝶翅長、體長：游標尺
- (五) 測量成蝶重量：電子天秤
- (六) 清理飼養盒所需器材：衛生紙、噴霧器、橡皮筋、水彩筆、鑷子、酒精
- (七) 記錄及整理分析數據：記錄表格、個人電腦、Excel 軟體



圖十九 臺灣恆溫箱外觀



圖二十 日本恆溫箱外觀



圖二十一 臺灣恆溫箱內部



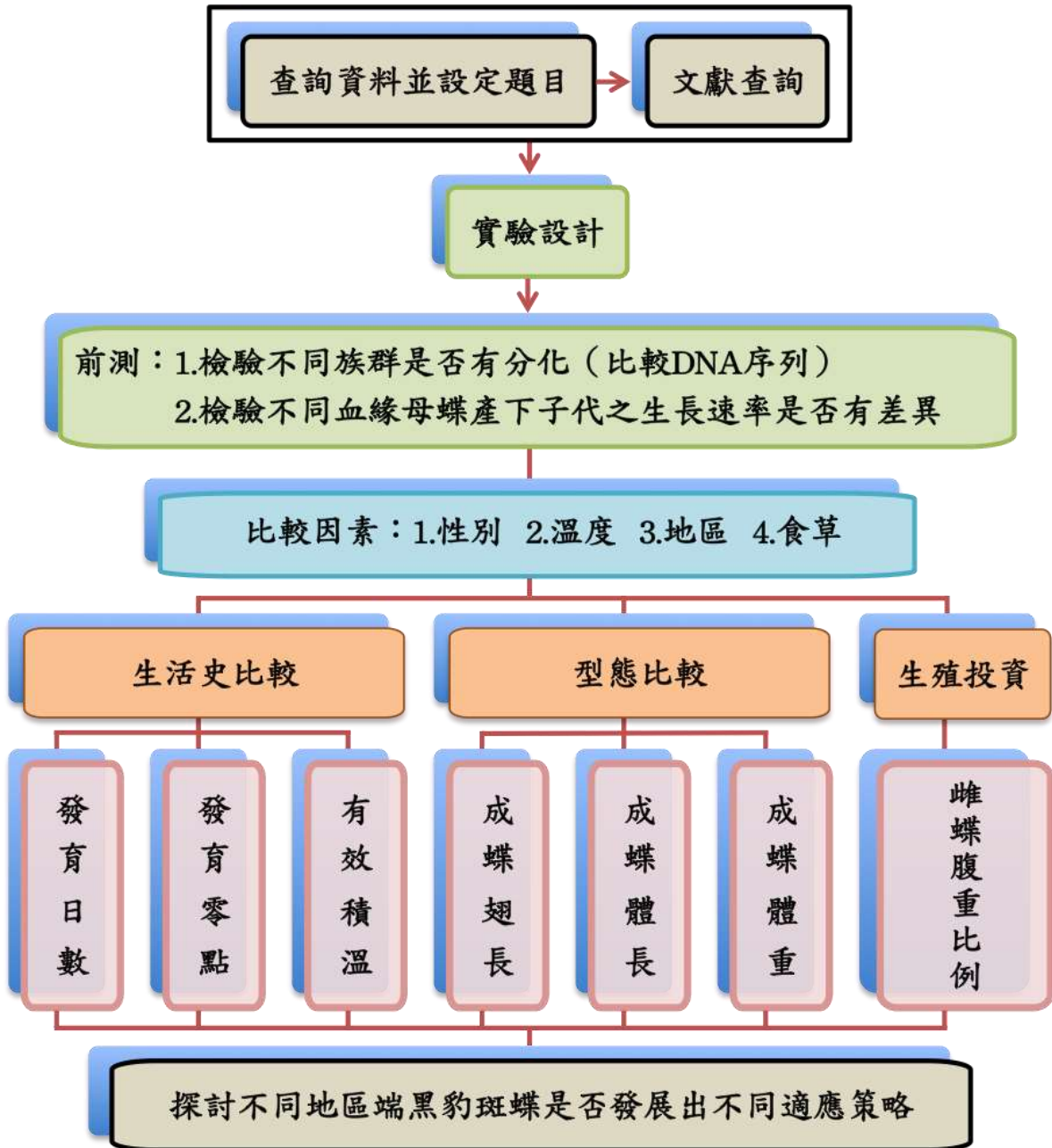
圖二十二 日本恆溫箱內部



圖二十三 飼養盒配置

參、研究過程

一、研究架構



圖二十四 研究架構

二、研究方法

(一) 實驗材料蒐集

1. 實驗雌蝶：

(1) 臺灣：

實驗的雌蝶採集自野外，採回使其產卵。後續實驗均利用該雌蝶之子代進行交配，再獲得新的子代進行實驗。因此臺灣的實驗皆以同一血緣的子代進行。為探討臺灣各地區是否會有不同適應環境的策略，我們採集了多地的雌蝶，包括：北投、桃園、苗栗。

(2) 日本：

日本實驗的雌蝶是採集自京都姊妹校校園內，使其產卵以供實驗所用。由於其子代交配失敗，因此重新於校園內採集不同雌蝶，使其產生子代進行實驗。日本實驗所使用子代均來自不同雌蝶。

2. 幼蟲食草：

我們使用小萵菜作為預定使用的食草，後來我們也採用茶匙黃以及冬季較易取得的園藝植物三色堇進行實驗。

(二) 基因比對

CO I 基因為一粒線體基因，相較於細染色體基因，產生變異的機會較大，因此我們比較不同地區端黑豹斑蝶 COI 基因序列，瞭解族群是否有分化。增幅片段約含 710 個鹼基對(6)，比較序列軟體為 Bioedit。聚合酶連鎖反應使用引子為：

LC01490：5' -ggtcaacaaatcataaagatattgg-3'

C02198：5' -taaacttcagggtgaccaaataatca-3'

(三) 幼蟲飼育及記錄

將產下的卵(觀察約 40 粒)卵放入恆溫箱中飼養，待其孵化後分盒進行單隻飼育。每日觀察一次，記錄齡期並清除糞便及補充食草，直到成蟲羽化。

(四) 成蝶紀錄

蝴蝶羽化後，記錄每隻個體羽化時間，並測量以下資料：

1. 性別
2. 形態：以游標尺測量
 - ①翅長
 - ②體長
3. 體重：以電子天秤測量
 - ①總體重(10)
 - ②雌蝶腹重比例



圖二十五 體型測量範圍

(五) 環境設定

1. 溫度

(1) 苗栗：21°C、23°C、25°C

(2) 桃園：23°C、25°C、27°C、29°C

(3) 日本：19°C、21°C、23°C、25°C、27°C、29°C、31°C

(4) 臺北：21°C、25°C、29°C

2. 光照週期：光照：黑暗 = 14hr：10hr

(六) 數據處理

表二 統計工具及其說明

統計工具名稱	說明
T test	利用 T test 欲探究兩組變數的平均是否有不同，若檢驗出來的 P 值(雙尾)<0.05(預設值)，則代表兩組變數的平均數有顯著差異。
F test 與 Bonferroni test	利用 F test 欲探究多組變數的平均是否有不同，若檢驗出來的 P 值(雙尾)<0.05(預設值)，則代表實驗變因有顯著影響。若實驗變因有顯著影響，再利用 Bonferroni test 分析兩兩變數間是否存在差異。
簡單線性迴歸分析	探討自變數(溫度)對依變數(生長速率)的關係。
複迴歸分析 (多元迴歸分析) 與虛擬變數	探討多個自變數對一個依變數的關係。例如：以地區、性別為自變數，探討其對依變數「發育日數」的關係。在後續複迴歸分析中，將桃園(地區)、雄蝶(性別)設立為參考組，作為比較基礎。虛擬變數(dummy variable)是人工變數，用以代表所分析屬性的特質(例如：地區為特質；苗栗為屬性)。分析後，虛擬變數和參考組若有顯著差異，表示虛擬變數所代表的屬性有顯著影響。
偏 F 檢定	若試圖將兩變因合併得到簡化的方式程。利用偏 F 檢定比較簡化的迴歸方程式(合併特定變因)是否和原先所得之方程式對樣本解釋能力相同。
發育零點及有效積溫的計算	<p>1. 發育零點： 利用線性迴歸法分析了解溫度與幼蟲發育速率(發育日數之倒數)的關係，再以外插法求得幼蟲之發育零點(8)。發育零點為幼蟲可發育的最低溫度，低於此溫度幼蟲便不會發育。</p> <p>2. 有效積溫： 昆蟲在發育期內所需的溫度及日數總合，稱為有效積溫(effective accumulated temperature)，其單位為「日度」(day-DEGREE)，方程式中溫度單位為°C，發育時間以日數計算。相同的物種生長情形應該相同，應具有接近的有效積溫，比較有效積溫是否相同，可瞭解族群或物種間的差異。</p> <p>將各溫度所觀測得之發育期及發育零點代入下列公式，可計算於特定恆溫下幼蟲發育之有效積溫(4)：</p> $K = (T - C) \times D$ <p style="text-align: right;"> <small>K：有效積溫(Effective accumulative temperature) C：發育零點(Developmental threshold) T：發育溫度(development temperature) D：發育日數(Period till emerging)</small> </p>

肆、前測

一、檢驗不同族群是否有分化(比較 DNA 序列)

藉由比對粒線體 DNA 上的 COI 基因序列，來探討各族群是否分化。比對序列的結果，644 個鹼基對中，京都(日本)和南投(臺灣)有相同的基因序列。在臺灣地區，南投、臺北和苗栗的蝴蝶卻有三個位置的含氮鹼基對的具有差異(表三)。

表三 各地族群基因序列比較

國家	城市	樣本數	變異處	變異處	變異處
臺灣	臺北	2	G	C	T
	桃園	1	G	C	T
	苗栗	2	A	T	C
	南投	2	G	T	C
日本	京都	4	G	T	C

結論：1. 南投和京都在基因上沒有差異，表示臺灣和日本端黑豹斑蝶族群未完全分化。

2. 臺灣各族群間的差異約有 0.31~0.47%，可以看到多樣性。而 COI 基因序列中每 2% 的差異需要一百萬年的時間累積(7)。

推論：我們欲藉由觀察這些不同族群的生活史，比較各項形質，以瞭解臺灣和日本族群的差異，此外我們也將討論臺灣島上不同族群間的差異。

二、檢驗不同個體子代之生長速率是否有差異

為了將不同個體的資料合併分析，我們想了解同一雌蝶之子代或不同雌蝶之子代是否有不同的生長情形，所以比較其生長速率。

表四 25°C 下，同一雌蝶之不同子代生長速率(臺灣族群)

	母蝶 ML1	母蝶 ML2
平均生長速率(1/日)	33.30±0.00(SD)	34.48±0.00(SD)
樣本數	10	9
P 值	0.287	

結論：ML1 與 ML2 為同一雌蝶的子代，經過 t-test 比較後發現兩者的子代發育速率沒有顯著差異(P=0.287)。

推論：我們可以合併同一雌蝶各子代的資料進行分析。

表五 25°C 下，不同雌蝶之子代生長速率(日本族群)

	母蝶 J1	母蝶 J2
平均生長速率(1/日)	0.04±0.002(SD)	0.04±0.003(SD)
樣本數	10	14
P 值	0.681	

結論：J1 與 J2 為日本採集到不同雌蝶之子代，經過 t-test 比較後發現兩者間發育速率沒有顯著差異(P=0.681)。

推論：我們可以合併同一雌蝶各子代資料進行分析。

伍、研究結果

一、端黑豹斑蝶發育日數之研究

(一) 建立發育日數的模式

在實驗中有多項變因(性別、溫度、地區、食草)，進行各項變因分析前，利用複迴歸分析建立一模式方程式來解釋各變因與幼蟲的生長速率間的關係再逐步討論比較不同族群間的生長狀況。

$$\text{發育日數} = 101.57 - 2.62 * \text{溫度} + 1.22 * \text{雌蝶} - 1.84 * \text{苗栗} - 2.67 * \text{日本}$$

註1: 方程式中各變因對幼蟲發育日數皆有顯著影響(P值皆小於0.05, 詳見附錄表一), adjusted R²=0.85

註2: 來自臺北的樣本以及利用茶匙黃飼養的族群只在單一溫度下培養, 因此不將臺北族群以及以茶匙黃飼養的族群列入此一模式方程式

結論: 和參考組相比, 溫度、性別、地區及均會對幼蟲的生長造成影響, 因此我們將針對這幾個變因進行深入研究。

(二) 性別對發育日數的影響

蝶類的生活史中, 雄蝶的生活史通常較短(2), 因此我們先檢視不同性別是否具有不同的發育日數, 並考慮是否需將雄、雌蝶分開觀察討論。(表六)。

表六 各溫度下, 各族群之雄、雌蝶發育日數比較(t-test)

地區		溫度						
		19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C
日本 (京都) 族群	雄蝶	52.56 ±2.59(SD)	43.75 ±1.65(SD)	35.41 ±1.82(SD)	30.13 ±1.93(SD)	26.14 ±2.39(SD)	25.15 ±1.46(SD)	23.00 ±1.69(SD)
	樣本數	27	28	22	16	37	13	8
	雌蝶	52.92 ±3.05(SD)	45.60 ±1.88(SD)	36.71 ±1.31(SD)	32.41 ±1.42(SD)	27.00 ±0.82(SD)	26.56 ±1.81(SD)	24.13 ±1.36(SD)
	樣本數	26	35	21	17	16	9	16
	P 值	0.64	0.00	0.01	0.00	0.06	0.07	0.13
臺灣 (桃園) 族群	雄蝶			40.71 ±4.31(SD)	35.47 ±2.74(SD)	31.15 ±1.73(SD)	28.13 ±1.85(SD)	
	樣本數			7	21	20	24	
	雌蝶			41.00 ±5.48(SD)	34.88 ±3.69(SD)	32.90 ±2.75(SD)	26.93 ±1.59(SD)	
	樣本數			4	17	20	18	
	P 值			0.93	0.6	0.02	0.07	
臺灣 (苗栗) 族群	雄蝶		57.25 ±2.22(SD)	37.13 ±1.75(SD)	34.00 ±2.00(SD)			
	樣本數		4	16	10			
	雌蝶		55.75 ±2.06(SD)	38.17 ±1.9(SD)	34.00 ±2.04(SD)			
	樣本數		4	12	12			
	P 值		0.36	0.15	1.00			

- 結論：1. 日本：極端溫度(低溫：19°C；高溫：27°C、29°C及31°C)下雄蝶發育日數和雌蝶一致。其他溫度下，雌蝶發育日數顯著大於雄蝶(約2天)。
2. 臺灣：除了在27°C下生長的桃園族群雄、雌蝶具有發育日數的顯著差異外，各族群中雌蝶與雄蝶的發育日數均無顯著差異。

- 推論：1. 不同性別的發育日數可能不同，因此在後續分析中，宜將其分開討論。
2. 以上結果可能和日臺二地的氣候震盪程度有關。在日本，年溫差大，日本族群和臺灣族群具有不同的發育情形。在極端溫度下，雌蝶和雄蝶發育日數接近。
- (1) 高溫：因為環境適合生長，日本雄、雌蝶同時羽化，以增加交配機率。
- (2) 低溫：可能因為生長速率皆慢，若有明顯的差異，會造成雄、雌成蝶在自然界相遇的機會下降，而造成交配率不足。
3. 日本族群和臺灣族群具有不同的適應策略：
- (1) 日本：氣溫變化較大，所以在非極端氣溫下，雌蝶發育較慢，可以在幼蟲時期累積較多的能量，增加產卵量。
- (2) 臺灣：氣溫變化不大，故族群無發展出這樣的策略。
4. 性別會對生長速率造成顯著差異，故其它實驗中，均將公母分開比較。

(三) 溫度對發育日數的影響

為瞭解蝴蝶生長與溫度的關係，比較各樣區族群在不同溫度的生長情形(表七)。

表七 各族群中，發育日數隨溫度變化的比較

地區	性別	F test P 值		溫度						
				19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C
日本 (京都) 族群	雄蝶	0.00	平均值	52.56 ±2.59(SD)	43.75 ±1.65(SD)	35.41 ±1.82(SD)	30.13 ±1.93(SD)	26.14 ±2.39(SD)	25.15 ±1.46(SD)	23.00 ±1.69(SD)
			樣本數	27	28	22	16	37	13	8
			組間差異							
	雌蝶	0.00	平均值	52.92 ±3.05(SD)	45.6 ±1.88(SD)	36.71 ±1.31(SD)	32.41 ±1.42(SD)	27.00 ±0.82(SD)	26.56 ±1.81(SD)	24.13 ±1.36(SD)
			樣本數	26	35	21	17	16	9	16
			組間差異							
臺灣 (桃園) 族群	雄蝶	0.00	平均值			40.71 ±4.31(SD)	35.47 ±2.74(SD)	31.15 ±1.73(SD)	28.13 ±1.85(SD)	
			樣本數			7	21	20	24	
			組間差異							
	雌蝶	0.00	平均值			41.00 ±5.48(SD)	34.88 ±3.69(SD)	32.9 ±2.75(SD)	26.93 ±1.59(SD)	
			樣本數			4	17	20	18	
			組間差異							
臺灣 (苗栗) 族群	雄蝶	0.00	平均值		57.25 ±2.22(SD)	37.13 ±1.75(SD)	34.00 ±2.00(SD)			
			樣本數		4	16	10			
			組間差異							
	雌蝶	0.00	平均值		55.75 ±2.06(SD)	38.17 ±1.9(SD)	34 ±2.04(SD)			
			樣本數		4	12	12			
			組間差異							

註：將雄、雌蝶資料分開，並使用 F test 了解溫度是否對蝴蝶的生長造成顯著影響。若有顯著影響，再利用 Bonferroni test 探討各溫度組別之間的差異

結論：1. 日本：雄、雌蝶的發育日數皆隨著溫度上升而顯著減少。高溫情況下(27、29°C 和 29、31°C 之間)卻無顯著差異，其對溫度變化較不敏感。

2. 臺灣：除 25、27°C 下生長桃園族群的雌蝶無顯著差異外，各族群的雄、雌蝶發育日數皆隨著溫度上升而有顯著的減少。

推論：1. 日本年溫差大，所以日本的族群在高、低溫下具有不同的反應：

- (1) 低溫：溫度影響顯著。
- (2) 高溫：溫度影響不顯著。

2. 臺灣年溫差小，所以當溫度發生改變時，溫度容易造成明顯的影響。

(四) 地區對發育日數的影響

比較在 25°C 下，不同地區族群的發育日數是否有所差異，以瞭解是否有不同的生長情形 (表八)。

表八 25°C 下，各地區發育日數比較

性別	F test P 值	地區			
		日本	苗栗	桃園	
雄蝶	0.00	平均值(天)	30.13±1.93(SD)	34.00±2.00(SD)	35.47±2.74(SD)
		樣本數	16	10	21
		組間差異			
雌蝶	0.00	平均值(天)	32.41±1.42(SD)	34.00±2.04(SD)	34.88±3.69(SD)
		樣本數	17	12	17
		組間差異			

註：使用 F test 了解地區是否對蝴蝶的生長造成顯著影響。若有顯著影響，再利用 Bonferroni test 探討各地區組別之間的差異

結論：無論雄、雌蝶，日本族群之發育日數均顯著地少於臺灣二地族群。

推論：日本的均溫較低，加上氣溫的震盪程度較劇烈，年溫差較大，適合生長的天數較少，導致當地族群較快完成其生命週期(雄蝶提早 4 天、雌蝶提早 2 天)，以提高其生存率。

(五) 食草對發育日數的影響

1. 臺灣與日本族群的比較

為了瞭解食用不同宿主植物的端黑豹斑蝶在發育日數上是否有差異，我們比較日臺群在固定溫度下，食用不同食草的差異，結果如下(表九)。

表九 日本族群與臺灣族群在使用不同食草上的差異(t-test)

食草種類	臺灣族群		食草種類	日本族群	
茶匙黃	生長速率	30.86±1.67(SD)	三色堇	生長速率	35±0.00(SD)
	樣本數	28		樣本數	13
小堇菜	生長速率	28.66±2.74(SD)	日本小堇菜	生長速率	35±0.00(SD)
	樣本數	33		樣本數	40
P 值	0.00		P 值	0.99	

註₁：三色堇在臺灣的生長季約只有 3 個月，且在冬季，臺灣族群雖會利用，但是時間不長，因此臺灣的食草實驗中，以茶匙黃以及小堇菜進行

註₂：此表以生長速率分析，與其他表格不同

結論：臺灣族群在食用不同食草時，生長速率會有顯著的差異，日本族群則否。臺灣族群在食用茶匙黃和小堇菜的桃園族群幼蟲在發育日數上有顯著差異，食用茶匙黃的個體生長較快。

推論：1. 日本族群對食草的變化較不敏感，可能是因為日本二種食草生長季節有長期重疊。

2. 進一步比較臺灣族群的差異是否由不同性別造成，討論不同性別是否有不同的表現情形。

2. 臺灣桃園族群不同性別對不同食草的表現

為瞭解不同性別的發育日數是否受不同食草影響，我們使用 t-test 比較桃園族群在 25°C 餵食小萵菜和茶匙黃的發育日數(表十)。

表十 25°C 桃園族群，以不同食草下發育日數比較(t-test)

食草種類		性別	
		雄蝶	雌蝶
茶匙黃	平均值(天)	32.14±1.61(SD)	32.86±1.96(SD)
	樣本數	14	14
小萵菜	平均值(天)	35.47±2.74(SD)	34.88±3.69(SD)
	樣本數	17	16
	P 值	0.00	0.07

結論：1. 桃園雄蝶對食草敏感度較高：

(1) 食用茶匙黃雄蝶幼蟲的發育日數顯著少(約 3 天)

(2) 食用茶匙黃雌蝶幼蟲的發育日數則無顯著差異。

2. 平均值上，食用茶匙黃的雌蝶仍發育較快，以致食用小萵菜的雌蝶在個體的表現上，差異大。

推論：1. 食用茶匙黃的雄、雌蝶發育較快；食用小萵菜的雌蟲有較大的差異。

2. 食用茶匙黃的幼蟲每天累積能量較小萵菜者多，故提早羽化。

3. 雄蝶為驅使食用不同食草的族群分化的主要性別。

三、發育零點與有效積溫之研究

經由迴歸分析幼蟲在各溫度發育日數的資料，得到三樣區幼蟲發育日數和溫度的迴歸關係如下，並計算出各族群的發育零點及有效積溫(表十一)。

表十一 各族群溫度對日數迴歸方程式、發育零點及有效積溫比較

地區	性別	迴歸方程式	發育零點	有效積溫
京都族群	雄蝶	日數 = 101.21 - 2.73*溫度	10.43°C	452.81 日度
	雌蝶	日數 = 97.90 - 2.51*溫度	9.57°C	502.42 日度
桃園族群	雄蝶	日數 = 86.66 - 2.04*溫度	9.52°C	547.58 日度
	雌蝶	日數 = 87.92 - 2.08*溫度	10.69°C	508.38 日度
苗栗族群	雄蝶	日數 = 149.92 - 4.75*溫度	13.05°C	410.09 日度
	雌蝶	日數 = 147.30 - 4.60*溫度	13.28°C	399.79 日度

註：方程式中截距及溫度係數對皆有顯著影響(P 值皆小於 0.05，詳見附錄表二)

結論：1. 發育零點

(1) 不同性別的發育零點即有差異。

① 日本的雌蝶發育零點比雄蝶低 0.86°C。

② 臺灣的雌蝶發育零點比雄蝶高(桃園：1.57°C，苗栗：0.23°C)。

③ 日臺族群對溫度的不同適應策略，日本的雌蝶和臺灣的雄蝶較容易在低溫的環境中發育。

(2) 不同族群的發育零點也有差異。

① 雄蝶的發育零點最高者為苗栗，最低者為桃園。

② 雌蝶的發育零點最高者為苗栗，最低者為日本。

2. 有效積溫

(1) 不同性別的有效積溫有所不同：

- ① 日本的雌蝶比雄蝶高 49.61 日度。
- ② 臺灣的雄蝶有效積溫比雌蝶高(桃園:39.2 日度;苗栗:10.3 日度)。
- ③ 日本的雌蝶和臺灣的雄蝶需要比較高的有效積溫。由此可以看到日臺族群對溫度的不同適應策略。

(2) 不同族群的有效積溫有所不同：

- ① 雄蝶所需有效積溫最高者為桃園，最低者為苗栗。
- ② 雌蝶所需有效積溫最高者為日本，最低者為苗栗。

推論：1. 日本均溫低，所以為了維持族群中雌蝶數量，故雌蝶發展出較低的發育零點以穩定族群的繁衍。

2. 臺灣均溫高，故雄、雌蝶的發育零點皆高。

3. 苗栗地區均溫高，故整個族群有較高的發育零點。而桃園及日本因緯度高，故有較低的發育零點。

4. 苗栗族群的有效積溫較桃園、日本低，但單就日本和桃園的比較而言，雄蝶間的差異是造成地區間有效積溫有差異的主要原因，適應策略的不同主要表現在雄蝶上。

四、端黑豹斑蝶成蝶翅長之研究

(一) 建立翅長的模式

利用複迴歸分析建立一模式方程式來解釋各變因與成蝶翅長間的關係，再逐步討論比較不同族群成蝶翅長。

$$\text{成蝶翅長} = 44.95 - 0.44 * \text{溫度} + 3.42 * \text{雌蝶} + 1.86 * \text{苗栗} + 1.35 * \text{日本}$$

註 1：來自臺北的樣本以及利用茶匙黃飼養的族群只在單一溫度下培養，因此不將臺北族群以及以茶匙黃飼養的族群列入此一模式方程式

註 2：方程式中各因素對成蝶翅長皆有顯著影響(P 值皆小於 0.05，詳見附錄表三)，adjusted R² = 0.62

結論：和參考組相比，溫度、性別、地區均會對成蝶的翅長造成影響，因此我們將針對這幾個變因進行深入研究。

(二) 性別對翅長的影響

養殖蝴蝶過程中，發現雌蝶的翅膀大多較雄蝶長，因此我們先檢視不同性別是否具有顯著的翅長大小差異(表十二)，並考慮是否需將雄、雌蝶分開觀察討論。

表十二 各溫度下，各族群之雄、雌蝶翅長比較

地區		溫度						
		19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C
日本 (京都) 族群	雄蝶翅長 (mm)	37.53 ±1.53(SD)	36.25 ±1.44(SD)	36.07 ±2.23(SD)	35.31 ±0.87(SD)	34.85 ±1.48(SD)	30.95 ±1.40(SD)	32.23 ±1.53(SD)
	樣本數	27	28	22	16	37	13	8
	雌蝶翅長 (mm)	41.40 ±1.28(SD)	40.41 ±1.82(SD)	40.33 ±2.55(SD)	39.15 ±2.01(SD)	38.44 ±1.87(SD)	38.44 ±1.97(SD)	36.58 ±1.99(SD)
	樣本數	26	35	21	17	16	9	16
	P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
臺灣 (桃園) 族群	雄蝶翅長 (mm)			35.13 ±0.87(SD)	34.96 ±2.04(SD)	32.60 ±2.69(SD)	32.34 ±2.01(SD)	
	樣本數			7	21	20	24	
	雌蝶翅長 (mm)			38.46 ±1.21(SD)	37.33 ±2.83(SD)	35.67 ±2.32(SD)	35.01 ±1.79(SD)	
	樣本數			4	16	18	18	
	P 值			0.00	0.01	0.00	0.00	
臺灣 (苗栗) 族群	雄蝶翅長 (mm)		35.86 ±1.92(SD)	37.75 ±1.50(SD)	36.36 ±1.76(SD)			
	樣本數		4	16	10			
	雌蝶翅長 (mm)		39.06 ±1.61(SD)	39.48 ±1.82(SD)	38.78 ±1.83(SD)			
	樣本數		4	12	12			
	P 值		0.04	0.01	0.01			

註1：因為性別會對成蝶翅長具有顯著差異，故在各項形態的比較實驗中，均將雄、雌蝶個體分開進行比較

註2：使用 t-test 進行每個溫度下，食用小萵菜的雄蝶和雌蝶翅長大小的比較

結論：不論是日本或是臺灣族群，在每個溫度下雌蝶之翅長均顯著地大於雄蝶。結果與一般的認知相同，雌蝶通常具有比較大的體型。

推論：1. 雌蝶具備較佳的飛行能力，來擴增其飛行範圍，以尋找適合的環境產卵，故其有較大的翅長。

2. 日、臺族群呈現相同結果，在此特徵上無發展出不同適應策略。

(三) 溫度對翅長的影響

為瞭解溫度與翅長的關係，比較各樣區族群在不同溫度下的翅長(表十三)。

表十三 不同溫度下，各族群中翅長的比較

地區	性別	F test P 值	溫度							
			19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C	
日本 (京都) 族群	雄蝶	0.00	平均值(mm)	37.53 ±1.53(SD)	36.25 ±1.44(SD)	36.07 ±2.23(SD)	35.31 ±0.87(SD)	34.85 ±1.48(SD)	30.95 ±1.40(SD)	32.23 ±1.53(SD)
			樣本數	27	28	22	16	37	10	7
			組間差異	—————						
	雌蝶	0.00	平均值(mm)	41.40 ±1.28(SD)	40.41 ±1.82(SD)	40.33 ±2.55(SD)	39.15 ±2.01(SD)	38.44 ±1.87(SD)	38.44 ±1.97(SD)	36.58 ±1.99(SD)
			樣本數	26	35	21	17	16	9	16
			組間差異	—————						
臺灣 (桃園) 族群	雄蝶	0.06	平均值(mm)			35.13 ±0.87(SD)	34.96 ±2.04(SD)	32.60 ±2.69(SD)	32.34 ±2.01(SD)	
			樣本數			7	17	20	13	
			組間差異	—————						
	雌蝶	0.03	平均值(mm)			38.46 ±1.21(SD)	37.33 ±2.83(SD)	35.67 ±2.32(SD)	35.01 ±1.79(SD)	
			樣本數			4	16	18	14	
			組間差異	—————						
臺灣 (苗栗) 族群	雄蝶	0.09	平均值(mm)	35.86 ±1.92(SD)	37.75 ±1.50(SD)	36.36 ±1.76(SD)				
			樣本數	4	16	10				
			組間差異	—————						
	雌蝶	0.36	平均值(mm)		39.06 ±1.61(SD)	39.48 ±1.82(SD)	38.78 ±1.83(SD)			
			樣本數		4	12	12			
			組間差異	—————						

註：使用 F test 了解溫度是否對蝴蝶的翅長造成顯著影響。若有顯著差異，再利用 Bonferroni test 探討各溫度下翅長的差異程度。表中組別下橫跨的黑線代表組間無顯著差異

- 結論：1. 日本：成蝶翅長隨溫度上升而顯著縮小，且在 27、29°C 之間存在一斷層，可看出高溫組和低溫組表現不同。
2. 臺灣：僅有桃園的雌蝶與日本族群有相同的表現，皆於高溫時有翅長縮小的現象，其餘的組別則沒有此現象。
3. 日本成蝶翅長隨溫度上升而縮短的現象較臺灣族群顯著。
- 推論：1. 日本：高溫可能較適合生存，因此日本族群生活史較短，加上翅長縮小，可能將其能量投注於其他方面(例如：提高繁衍機率)。
2. 臺灣：因為平均溫度較高，且溫差變化小，造成蝴蝶於高溫縮小體型的現象相對不明顯。

(四) 地區對翅長的影響

藉由比較在 25°C 下生長的成蝶翅長，瞭解不同地區的成蝶是否具有不同的翅長 (表十四)。

表十四 25°C 下，各地區翅長比較

性別	F test P 值		地區		
			日本	苗栗	桃園
雄蝶	0.00	平均值(mm)	35.31±0.87(SD)	36.36±1.76(SD)	34.96±2.04(SD)
		樣本數	16	10	17
		組間差異			
雌蝶	0.00	平均值(mm)	39.15±2.01(SD)	38.78±1.83(SD)	37.33±2.83(SD)
		樣本數	17	12	16
		組間差異			

註：先利用 F test 比較三族群翅長，若不同地區的成蝶翅長有顯著差異。再利用 Bonferroni test 探討族群間的翅長差異情形

結論：1. 在 25°C 下，不論雄、雌蝶，不同地區的成蝶翅長具有顯著差異。苗栗地區雄蝶大於其他二地；日本地區母蝶大於其他二地。

2. 經日本、桃園和苗栗三族群蝶翅長二二比較後，無顯著差異。

推論：1. 不同地區族群有形態的差異，可能暗示對於不同環境，各族群發展出不同的適應策略。

2. 組間差異不顯著可能因為日本、桃園樣本組內差異較大。

(五) 食草對翅長的影響

為了瞭解食用不同食草的個體是否有差異，我們比較 25°C 日本及桃園族群食用不同食草的個體翅長的差異(表十五)。

表十五 日本族群及桃園族群取用不同食草時(25°C)，成蝶翅長比較(t-test)

食草種類	臺灣族群	食草種類	日本族群
茶匙黃	成蝶翅長(mm)	三色堇	成蝶翅長(mm)
	樣本數		樣本數
小萵菜	成蝶翅長(mm)	日本小萵菜	成蝶翅長(mm)
	樣本數		樣本數
P 值	0.39	P 值	0.06

註：三色堇在臺灣的生長季約只有 3 個月的時間，且在冬季，臺灣族群雖會利用，但是時間不長，因此臺灣的食草實驗中，以茶匙黃以及小萵菜進行

結論：1. 日本及桃園族群食用不同食草之成蝶翅長並無顯著差異，食草並非影響成蝶翅長的主要因素。

2. 與成蝶發育日數結果比較，食草影響幼蟲發育日數，但不影響成蝶翅長。

推論：1. 臺灣：雖然食草對體長無顯著影響，但食用小萵菜幼蟲的發育日數長，因為幼蟲化蛹前所需要的總能量應相同，所以每日小萵菜所提供發育的能量可能較茶匙黃少。

2. 日本：食用不同食草的體長與發育日數結果相同，可能是因為食草分布平均且重疊性高，以致在發育日數以及體型均不受食草影響。

五、端黑豹斑蝶體長之研究

(一) 建立成蝶體長的模式

飼育蝴蝶的過程中，雌蝶一天可從產下 100 粒以上的卵，因此我們量測了雌雄蝶的體長，試圖找尋體長與生殖上的連結。我們利用複迴歸分析建立一模式方程式來解釋各變因與成蝶體長間的關係(adjusted $R^2=0.48$)，再逐步討論比較不同族群成體間的體長。

$$\text{成蝶體長} = 34.8 - 0.39 \times \text{溫度} - 0.44 \times \text{雌蝶} + 1.09 \times \text{苗栗} + 1.88 \times \text{日本}$$

註 1：來自臺北的樣本以及利用茶匙黃飼養的族群只在單一溫度下培養，因此不將臺北族群以及以茶匙黃飼養的族群列入此一模式方程式

註 2：方程式中各因素對成蝶翅長皆有顯著影響(P 值皆小於 0.05，詳見附錄表四)

結論：溫度、性別、地區均會對成蝶的體長造成影響，因此我們將針對這幾個變因進行深入研究。

(二) 性別對體長的影響

為瞭解不同性別的成蝶體長是否相同，記錄各溫度下成蝶體長。檢視不同性別是否具有顯著的體長大小差異(表十六)，並考慮是否需將雄、雌蝶分開觀察討論。

表十六 各溫度下，各族群之雄、雌蝶體長比較(t-test)

地區		溫度						
		19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C
日本 (京都) 族群	雄蝶	29.93 ±2.54(SD)	27.58 ±1.61(SD)	28.03 ±1.26(SD)	26.19 ±1.08(SD)	26.93 ±0.93(SD)	22.8 ±1.48(SD)	24.36 ±1.10(SD)
	樣本數	27	28	22	16	37	13	8
	雌蝶	29.41 ±1.11(SD)	27.51 ±2.62(SD)	26.83 ±1.28(SD)	26.65 ±0.70(SD)	26.93 ±1.21(SD)	24.17 ±0.94(SD)	25.02 ±0.61(SD)
	樣本數	26	35	21	17	16	9	16
	P 值	0.34	0.89	0.00	0.16	1.00	0.03	0.22
臺灣 (桃園) 族群	雄蝶			26.72 ±1.36(SD)	25.32 ±1.43(SD)	24.60 ±1.85(SD)	22.97 ±1.47(SD)	
	樣本數			7	17	20	13	
	雌蝶			25.63 ±1.21(SD)	24.89 ±2.46(SD)	23.13 ±1.37(SD)	23.06 ±1.56(SD)	
	樣本數			4	17	20	13	
	P 值			0.21	0.61	0.01	0.32	
臺灣 (苗栗) 族群	雄蝶		26.73 ±1.98(SD)	27.43 ±1.85(SD)	26.18 ±1.28(SD)			
	樣本數		4	16	10			
	雌蝶		25.26 ±0.96(SD)	25.66 ±1.08(SD)	26.86 ±1.28(SD)			
	樣本數		4	12	12			
	P 值		0.36	0.15	1.00			

結論：1. 除了日本族群在 23、29°C 及臺灣在 27°C 下生長的桃園族群，雄、雌蝶具有體長的顯著差異外，其餘各族群中雌蝶與雄蝶的體長均無顯著差異。

2. 雄、雌蝶體長無顯著差異，與翅長表現結果(雌蝶顯著大於雄蝶)不同。

推論：不同性別體長在某些組別有顯著差異，故其它的實驗中將雄、雌分開比較。

(三) 溫度對體長的影響

比較在不同溫度下各樣區成蝶的體長 (表十七)。

表十七 各族群中，體長隨溫度變化的比較

地區	性別	F test P 值	溫度							
			19°C	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C	31°C	
日本 (京都族群)	雄蝶	0.00	平均值(mm)	29.93	27.58	28.03	26.19	26.93	22.8	24.36
				± 2.54 (SD)	± 1.61 (SD)	± 1.26 (SD)	± 1.08 (SD)	± 0.93 (SD)	± 1.48 (SD)	± 1.10 (SD)
			樣本數	27	28	22	16	37	10	7
	雌蝶	0.00	平均值(mm)	29.41	27.51	26.83	26.65	26.93	24.17	25.02
				± 1.11 (SD)	± 2.62 (SD)	± 1.28 (SD)	± 0.70 (SD)	± 1.21 (SD)	± 0.94 (SD)	± 0.61 (SD)
			樣本數	26	35	21	17	16	9	14
臺灣 (桃園族群)	雄蝶	0.00	平均值(mm)			26.72	25.32	24.6	22.97	
						± 1.36 (SD)	± 1.43 (SD)	± 1.85 (SD)	± 1.47 (SD)	
			樣本數			7	17	20	13	
	雌蝶	0.95	平均值(mm)			25.63	24.89	23.13	23.06	
						± 1.21 (SD)	± 2.46 (SD)	± 1.37 (SD)	± 1.56 (SD)	
			樣本數			4	16	19	14	
臺灣 (苗栗族群)	雄蝶	0.05	平均值(mm)	26.73	27.43	26.18				
				± 1.98 (SD)	± 1.85 (SD)	± 1.28 (SD)				
			樣本數	4	16	10				
	雌蝶	0.92	平均值(mm)	25.26	25.66	26.86				
				± 0.96 (SD)	± 1.08 (SD)	± 1.28 (SD)				
			樣本數	4	12	12				

註：將雄雌資料分開，並使用 F test 了解溫度是否對蝴蝶的體長造成顯著影響。若有顯著影響，再利用 Bonferroni test 探討各溫度下，體長的差異程度

結論：1. 臺、日族群比較：

- (1) 日本：雄、雌蝶的體長皆隨著溫度上升而顯著縮小，和翅長結果一致。
- (2) 臺灣：桃園族群的雄蝶體長隨溫度上升而縮小，其餘組別成蝶體長在各溫度下並無顯著差異。

2. 不同性別間翅長比較：

(1) 雄蝶：

- ① 日本族群在 27、29°C 間有明顯斷層，此斷層也出現在翅長的測量中。
- ② 臺灣(桃園)族群的雄蝶在 27°C、29°C 間存在明顯斷層，此斷層未出現在翅長的測量中。

③日本族群的翅長和體長表現情形相同，當溫度高於 27°C 時，二者會顯著地縮小。

④臺灣(桃園)族群的翅長和體長表現情形不同，翅長在各溫度下並無顯著差異，而體長則會在溫度上升時顯著縮小。

(2)雌蝶：

①日本族群在 27°C、29°C 之間存在明顯斷層，與雄蝶相同。

②臺灣雌蝶的體型(翅長和體長)不受溫度影響。

推論：1. 日本：年溫差大，需發展出適應極端溫度(高、低溫環境)的策略

(1)高溫：翅、體長同時縮小

(2)低溫：體長變大，翅長沒有改變。可能在低溫，因發育日數較長，可在幼蟲時期累積較多能量，並將較高的比例投注在生殖上。

2. 臺灣：年溫差小，因此當面臨極端氣候時採取的策略不同，臺灣族群的高溫適應策略為縮小體長而不改變翅長。

(四) 地區對體長的影響

藉由比較在 25°C 下生長的成蝶體長，瞭解不同地區成蝶的形長差異 (表十八)。

表十八 25°C 下，各地區體長比較

性別	F test P 值	地區		
		日本	苗栗	桃園
雄蝶	平均值(mm)	26.19±1.08(SD)	26.18±1.28(SD)	25.32±1.23(SD)
	樣本數	16	10	17
	組間差異			
雌蝶	平均值(mm)	26.65±0.70(SD)	26.86±1.28(SD)	24.89±2.46(SD)
	樣本數	17	12	16
	組間差異			

註：先利用 F test 比較三族群體長，若有顯著差異，再利用 Bonferroni test 探討族群間的體長差異情形。

結論：1. 在 25°C 下，不論雄、雌蝶，不同地區的成蝶體長具有顯著差異。桃園地區雄蝶和雌蝶小於其他二地。

2. 日本、桃園和苗栗三族群二二比較時，無顯著差異。

推論：1. 不同地區族群有形態的差異，可能暗示對於不同環境，各族群發展出不同的適應策略。

2. 日本、桃園樣本組內差異較大造成統計結果無法確認不同地區間翅長是否有顯著差異。

(五) 食草對體長的影響

為了瞭解食用不同食草的個體是否有差異，我們比較 25°C 日本及桃園族群食用不同食草的個體在成蝶體長上的差異 (表十九)。

表十九 日本及桃園族群，以不同食草餵食(25°C)，成蝶體長比較(t-test)

食草種類	臺灣族群	食草種類	日本族群
茶匙黃	成蝶體長(mm) 24.63±1.27(SD) 樣本數 28	三色堇	成蝶體長(mm) 29.13±1.40(SD) 樣本數 13
小萵菜	成蝶體長(mm) 25.11±2.46(SD) 樣本數 33	日本小萵菜	成蝶體長(mm) 29.10±0.82(SD) 樣本數 40
P 值	0.32	P 值	0.97

註：三色堇在臺灣的生長季約只有 3 個月的時間，且在冬季，臺灣族群雖會利用，但是時間不長，因此臺灣的食草實驗中，以茶匙黃以及小萵菜進行

結論：日本及桃園族群食用不同食草個體之成蝶體長無顯著差異，食草對體長無顯著影響，情形和翅長相同。

推論：1. 臺灣：雖然食草對體長無顯著影響，但食用小萵菜幼蟲的發育日數長，但幼蟲化蛹前所需要的總能量應相同，每日小萵菜所提供發育的能量可能較茶匙黃少。

2. 日本：食用不同食草的體長與發育日數結果相同，可能是因為食草分布平均且重疊性高，以致在發育日數以及體型均不受食草影響。

六、端黑豹斑蝶體重之研究

(一) 建立成蝶體重的模式

利用複迴歸分析建立一模式方程式(變因：溫度、性別)來解釋各變因與成蝶(桃園族群)體重比例間的關係。

$$\text{成蝶體重} = 0.67 - 0.02 * \text{溫度} + 0.04 * \text{雌蝶}$$

註₁：來自臺北的樣本以及利用茶匙黃飼養的族群只在單一溫度下培養，因此不將臺北族群以及以茶匙黃飼養的族群列入此一模式方程式

註₂：方程式中各變因對幼蟲發育日數皆有顯著影響(P 值皆小於 0.05，詳見附錄表五)，adjusted R²=0.45

結論：溫度會對成蝶體重造成顯著的影響，不同性別的成蝶體重亦有顯著差異。成蝶體重隨溫度上升而減輕，雌蝶體重較雄蝶重，因此針對性別及溫度二方向進行深入研究。

(二)性別與成蝶體重的關係

為了瞭解不同性別的成蝶體重是否有顯著差異，比較桃園族群各溫度下雄、雌蝶體重差異(表二十)。

表二十 桃園族群雄、雌蝶體重比較(t-test)

性別		溫度			
		23°C	25°C	27°C	29°C
雄蝶	平均值(g)	0.26±0.05(SD)	0.24±0.05(SD)	0.19±0.02(SD)	0.16±0.03(SD)
	樣本數	7	35	20	12
雌蝶	平均值(g)	0.28±0.03(SD)	0.28±0.04(SD)	0.23±0.05(SD)	0.20±0.04(SD)
	樣本數	4	32	19	13
	P 值	0.24	0.00	0.00	0.01

結論：除了在 23°C 下，雄、雌蝶體重無顯著差異，其餘各溫度下雄、雌蝶體重均有顯著差異，且雌蝶體重大於雄蝶體重。

推論：1. 雌蝶的卵巢發育是造成體重較雄蝶重的原因。

2. 高溫時雌蝶將能量投注於卵巢發育因而造成體重重於雄蝶。

(三)溫度對成蝶體重的影響

測量不同溫度(23、25、27、29°C)飼養下，羽化的成蝶體重，了解溫度是否造成顯著影響(表二十一)。

表二十一 各溫度下，桃園族群成蝶體重比較

性別	F test P 值	溫度				
		23°C	25°C	27°C	29°C	
雄蝶		平均值(g)	0.26±0.05(SD)	0.24±0.05(SD)	0.19±0.02(SD)	0.16±0.03(SD)
	0.00	樣本數	7	42	20	12
		組間差異				
雌蝶		平均值(g)	0.28±0.03(SD)	0.28±0.04(SD)	0.23±0.05(SD)	0.20±0.04(SD)
	0.00	樣本數	4	32	19	13
		組間差異				

註：利用 F test 檢測。若有顯著影響，再用 Bonferroni test 比較不同溫度間成蝶體重差異

結論：溫度對桃園雄、雌蝶體重有顯著影響，且體重隨溫度上升而減輕，而體重在 25°C 和 27°C 間有一明顯斷層(溫度大於 27°C 後，會有顯著體型縮小)，這和體型(翅長、體長)在高溫縮減此現象結果一致。

推論：1. 高溫時體型縮小、體重減輕將能量投注於生殖。

2. 因為溫度對成蝶的體重有顯著影響，而各溫度下雌蝶又比雄蝶來得重。因此在往後的實驗中，針對雌蝶比較不同溫度下的腹重比例，以探討雌蝶在不同溫度下的生殖策略。

七、端黑豹斑蝶雌蝶腹重之研究

(一) 建立雌蝶腹重比例的模式

在實驗中有多項變因(溫度、地區、食草)，在進行各項變因的分析前，我們利用複迴歸分析建立一全模式方程式來解釋各變因與雌蝶腹重比例間的關係(全模式)，再試著檢測哪些變因的影響不具顯著性(利用偏 F 檢定)，可忽略不計，以得到最精簡的方程式(表二十二)。

在全模式中，各變因與參考組(baseline group：桃園、小董菜)相比，臺北(P 值=0.718)及茶匙黃(P 值=0.46)不具有顯著差異(表二十二)。而溫度對雌蝶腹重比例有顯著的影響。因此我們重建簡化後的方程式(reduced model，表二十三)：

表二十二 所有變因均考量的全模式

	截距	溫度	臺北	茶匙黃
系數	0.14	0.01	0.01	0.01
P 值	0.08	0.01	0.72	0.46

表二十三 簡化的方程式

	截距	溫度
系數	0.20	0.01
P 值	0.00	0.01

利用偏 F 檢定(partial F test)比較簡化的方程式與全模式的解釋能力是否相同，得到 partial F value=0.95 < $F_{0.05, 7, 5}=4.88$ ，簡化後的方程式具有相同的解釋能力，因此可將臺北和桃園的族群視為同一單位，食用茶匙黃和小董菜的族群視為同一單位。將以上資料統整後得到下列雌蝶腹重比例之複迴歸方程式(adjusted $R^2=0.06$)：

$$\text{雌蝶腹重比例} = 0.20 + 0.01 \times \text{溫度}$$

結論：1. 溫度會對雌蝶腹重比例造成顯著影響，溫度愈高，腹重比例愈高

2. 當溫度上升時，雌蝶的生活史縮短，體型和體重變小，但腹重的比例增加。

推論：高溫下，雌蝶體型較小遷徙力較低，但是有更高的生殖潛能。因此針對溫度進行深入研究。

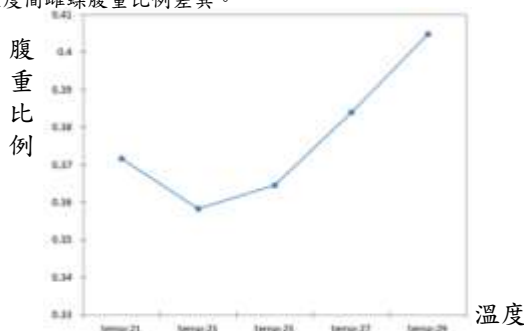
(二) 溫度對雌蝶腹重的影響

為瞭解不同溫度端黑豹斑蝶發展出的生殖策略，比較各溫度桃園雌蝶腹重比例。

表二十四 桃園族群兩兩溫度雌蝶腹重比例比較

F test	溫度				
	21°C	23°C	25°C	27°C	29°C
P 值					
平均值	0.37±0.03(SD)	0.36±0.02(SD)	0.36±0.03(SD)	0.38±0.06(SD)	0.40±0.08(SD)
樣本數	28	4	16	37	10
組間差異	0.00				

註：使用 F test 分析雌蝶腹重比例在各溫度下的變化。若有顯著影響，再用 Bonferroni test 比較溫度間雌蝶腹重比例差異。



圖二十六 腹重比例平均值與溫度的關係

結論：1. 溫度對雌蝶腹重比例有顯著影響(表二十四)。

2. 複迴歸分析中， $R^2_{adjusted}=0.056$ ，表示該方程式的解釋能力並不高，再由腹重比例平均值與溫度的關係(圖二十六)，可以看到在低溫和高溫的情況下，腹重比例均會增加，可以知道腹重的改變並非一單純的線性關係。

推論：1. 低溫時：腹重比例增加，體型較大，因此具有好的遷徙能力和較高的生殖潛能，可以遷徙到較適合的溫度環境下產卵。

2. 高溫時：因為端黑豹斑蝶是外溫動物，生活史被迫縮短，且不需有良好的遷徙能力，而減小其體型，以投注較多幼蟲時期累積的能量在生殖

陸、討論

一、端黑豹斑蝶在極端溫度下的發育

為了看出簡化的趨勢，我們假設端黑豹斑蝶的生長發育和溫度間的關係是線性的。但是在飼養的過程中，發現在高溫和低溫下的幼蟲死亡率相當高，也許在極端溫度下，其生長發育會出現非線性關係。我們未來可以觀察臺灣族群與日本族群在極端溫度下的生長狀況，並進一步比較討論。

二、食草對於幼蟲各齡期的影響

在進行實驗時，我們發現在同一溫度下，改變食草對於某些齡期幼蟲的發育日數不會造成顯著影響(表二十五)。我們希望透過設計實驗，來驗證在特定齡期下餵食幼蟲不同食草對幼蟲發育日數不會造成顯著影響，並研究其原因。

表二十五 不同食草幼蟲各齡期發育日數的變化

齡期	幼蟲(雄)			幼蟲(雌)		
	小萵菜	茶匙黃	P 值	小萵菜	茶匙黃	P 值
卵	4.94	5.00	0.33	4.92	5.00	0.34
一齡蟲	2.12	2.60	0.10	2.08	2.94	0.02
二齡蟲	2.94	2.00	0.00	2.92	2.13	0.00
三齡蟲	2.94	2.20	0.11	2.46	2.25	0.53
四齡蟲	3.76	2.53	0.01	3.23	2.44	0.00
五齡蟲	3.94	3.07	0.00	3.92	3.00	0.00
六齡蟲	6.35	6.53	0.75	6.85	6.63	0.75
蛹	8.47	8.60	0.82	8.23	8.56	0.58

三、不同性別幼蟲發育關鍵齡期的探討

(一)雄雌幼蟲因應不同溫度的生長策略

在實驗結果中，我們得知苗栗族群在固定溫度下雄、雌蝶的發育日數無顯著差異(23°C：雄蝶為 27 天，雌蝶為 26 天；25°C：雄蝶為 26 天，雌蝶為 27 天)。但分析苗栗族群在 23°C 及 25°C 時，各齡期所佔生長週期的比例，卻發現雄蝶和雌蝶呈現顯著變化的關鍵齡期不同(表二十六)。我們可以再進行深入的文獻蒐集，瞭解各雄、雌蝶在溫度改變時各齡期的發育策略。

表二十六 溫度改變時，不同性別幼蟲各齡期占生長週期比例平均值變化之比較

齡期	幼蟲(雄)			幼蟲(雌)		
	23°C	25°C	P 值	23°C	25°C	P 值
卵	0.16	0.14	0.11	0.15	0.13	0.01
一齡蟲	0.08	0.08	0.40	0.08	0.08	0.73
二齡蟲	0.06	0.07	0.10	0.06	0.07	0.04
三齡蟲	0.06	0.06	0.55	0.07	0.06	0.09
四齡蟲	0.08	0.08	0.44	0.07	0.08	0.22
五齡蟲	0.11	0.11	0.89	0.11	0.11	0.97
六齡蟲	0.19	0.21	0.01	0.20	0.21	0.07
蛹	0.27	0.25	0.00	0.27	0.26	0.38

註：利用 t-test 比較

(二)雄雌幼蟲因應不同食草的生長策略

在實驗結果中，我們得知桃園族群不同性別的發育日數受不同食草影響(雄蝶：食用茶匙黃為 32 天，小董菜為 35 天；雌蝶：食用茶匙黃為 33 天，小董菜為 35 天)。因此我們分析了桃園族群在餵食小董菜及茶匙黃時，各齡期所佔生長週期的比例。卻發現雄蝶和雌蝶呈現顯著變化的關鍵齡期一致(表二十七)。我們可以再進行深入的文獻蒐集，瞭解各雄、雌蝶在食草改變時各齡期的發育策略。

表二十七 食草改變時，不同性別幼蟲各齡期占生長週期比例平均值變化之比較

齡期	幼蟲(雄)			幼蟲(雌)		
	小董菜	茶匙黃	P 值	小董菜	茶匙黃	P 值
卵	0.15	0.15	0.16	0.14	0.15	0.03
一齡蟲	0.06	0.08	0.03	0.06	0.09	0.00
二齡蟲	0.08	0.06	0.00	0.08	0.06	0.00
三齡蟲	0.08	0.07	0.24	0.07	0.07	0.78
四齡蟲	0.1	0.07	0.00	0.09	0.07	0.00
五齡蟲	0.11	0.08	0.00	0.11	0.07	0.00
六齡蟲	0.18	0.09	0.00	0.2	0.09	0.00
蛹	0.24	0.2	0.06	0.24	0.2	0.09

註：利用 t-test 比較

柒、結論

比較方向	比較項目	比較因素	結論	推論		
生活史比較	發育日數	性別	日本	19、27、29 及 31°C：雄、雌蝶一致 其他溫度：雌蝶>雄蝶(約 2 天)	1. 日本溫差大，極端氣溫下，雄、雌蝶同時羽化，同時羽化提高交配率 2. 非極端氣溫下，雌蝶發育慢，可累積較多的能量於產卵	
			臺灣	27°C 下桃園族群雄、雌蝶有顯著差異 其餘組別均無顯著差異		臺灣溫差小，雄、雌蝶對於高低溫變化較不敏感
		溫度	日本	高溫：不具有顯著的影響 低溫：隨溫度上升顯著減少	日本年溫差大，族群在高、低溫下具有不同的反應	
			臺灣	隨溫度上升顯著減少		臺灣年溫差小，溫度改變時，溫度容易造成明顯的影響
		地區	日本族群<臺灣族群		日本均溫較低，年溫差較大，適合生長的天數較少，導致當地族群較快完成其生命週期，以提高其生存率。	
		食草	日本	無顯著差異		日本食草分布重疊性高，故族群對食草的敏感度不高
			臺灣	餵食茶匙黃快於小萵菜，雄蝶較顯著		臺灣食用茶匙黃的幼蟲每天累積能量較小萵菜者多，故提早羽化
	發育零點	性別	日本	雌蝶<雄蝶		均溫低，所以為了維持族群中雌蝶數量，故雌蝶發展出較低的發育零點以穩定族群的繁衍
			臺灣	雌蝶>雄蝶(無明顯差異)		均溫高，故雄、雌蝶的發育零點皆高
		地區	雄蝶	苗栗>日本>桃園		苗栗地區均溫高，故族群有較高的發育零點。而桃園及日本因緯度高，故有較低的發育零點。
			雌蝶	苗栗>桃園>日本		
	有效積溫	性別	日本	雌蝶>雄蝶		苗栗族群的有效積溫較桃園、日本低，但單就日本和桃園的比較而言，雄蝶間的差異是造成地區間有效積溫有差異的主要原因，適應策略的不同主要表現在雄蝶上。
			臺灣	雄蝶>雌蝶		
		地區	雄蝶	桃園>日本>苗栗		
		雌蝶	日本>桃園>苗栗			
型態比較	成蝶翅長	性別	日、臺族群相同：雌蝶>雄蝶		日、臺族群於此點並無發展出不同的適應策略	
		溫度	日本	隨溫度上升顯著縮小 (27、29°C 間有斷層)		高溫適合生存，故生活史短，翅長縮小，將能量投注於生殖以提高繁衍機率
			臺灣	無顯著差異		平均溫度高，溫差小，於高溫縮小體型較不明顯
		地區	地區有顯著差異；二二比較無顯著差異		不同地區族群有形態的差異，可能暗示對於不同環境，各族群發展出不同的適應策略	
	食草	日、臺族群相同：無顯著差異		日、臺族群於此點並無發展出不同的適應策略		
	成蝶體長	性別	日、臺族群相同：具有相同體長大小		日、臺族群於此點並無發展出不同的適應策略	
		溫度	日本	高溫：翅、體長同時縮小 低溫：僅體長變大，翅長沒有改變	年溫差大，需發展出適應極端溫度(高、低溫環境)的策略，高溫適合生存，故生活史短，體長縮小，低溫因發育日數較長，可在幼蟲時期累積較多能量，高低溫的策略皆是將能量投注於生殖以提高繁衍機率	
			臺灣	在高溫時縮小體長而不改變翅長		年溫差小，因此面臨極端氣候時採取的策略不同，臺灣族群的高溫適應策略為縮小體長而不改變翅長。
		地區	地區有顯著差異；二二比較無顯著差異		不同地區族群有形態的差異，可能暗示對於不同環境，各族群發展出不同的適應策略	
		食草	無顯著差異		日、臺族群於此點並無發展出不同的適應策略	
		成蝶體重	性別	桃園	25、27、29°C：雌蝶>雄蝶 23°C：雄、雌蝶一致	高溫時雌蝶將能量投注於卵巢發育因而造成體重重於雄蝶
	溫度			隨溫度上升而減輕(25、27°C 間有斷層)		高溫時體型縮小、體重減輕將能量投注於生殖
	生殖投資	雌蝶腹重比例	溫度	在 23°C 下達最低值，呈非線性關係		低溫：腹重比例增加，體型較大，故具有較高的遷徙能力和生殖潛能 高溫：縮短生活史、減小其體型，以投注較多幼蟲時期累積的能量在生殖

捌、未來展望及應用

我們期望能針對性別作更深入的探討(如：測量雄蝶的腹重比例)，以瞭解雄、雌蝶採取的策略差異。在研究幼蟲發育關鍵齡期時，我們也希望能加入更多樣區、溫度的資料，以瞭解溫度改變時影響幼蟲發育的關鍵齡期在不同地區間是否有差異。

另外，端黑豹斑蝶近年在日本有北遷的現象，這可能跟全球暖化有關，所以我們企盼能跟更多緯度較低的國家合作並取得台灣南北更完善的資料，以瞭解不同緯度下端黑豹斑蝶的適應策略。利用不同樣區的端黑豹斑蝶進行更多溫度的實驗，以增加研究的完整性，使端黑豹斑蝶成為東亞地區的全球暖化之指標生物，揭露其能屈能伸的奧秘。

玖、參考文獻

1. 徐堉峰。臺灣蝶圖鑑(第一卷)。初版。南投。國立鳳凰谷鳥園。1999年。
2. 陳順其，熊召弟，盧秀琴，游雅純，邱敏農，蔡宜廷，等。國北師校園動物。初版。國立臺北師範學院。2004年。
3. 劉和義、楊遠波、呂勝由、施炳霖。臺灣維管束植物簡誌(第三卷)。行政院農業委員會。1998年。
4. 鄭秋玲、張朝火其。2005年。溫度對無尾鳳蝶 (*Papilio demoleus libanius*) (鱗翅目：鳳蝶科) 發育之影響。植物保護學會會刊，47：293-304。
5. 四十万智博、高橋克之、青沼秀彦。2009年。群馬県北部のツマグロヒョウモンの分布拡大について。群馬県立自然史博物館研究報告，13：145-147。
6. Folmer, M. Black, W. Hoeh, R. Lutz, and R. Vrijenhoek. (1994). *DNA primers for amplification of mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates*. *Molecular Marine Biology and Biotechnology* 3(5), 294-299.
7. Gugs Lushail, David A. S. Smith², Dave Goulson¹, John A. Allen¹ and Norman Maclean¹. (2003). *Mitochondrial DNA Clocks and the Phylogeny of Danaus Butterflies*. *Insect Sci. Applic.* 23(4), 309-315.
8. Gullan, P. J., & Cranston, P. S.. *The Insects: An Outline of Entomology* 2/e. (Yu-Feng Hsu, Trans.). (Original work published 2000). Taipei: Ho-Chi Book Publishing Co.. (2002).
9. Jan Kuzma, Steve Bohnenblust。李采娟、梁文敏、李佳霽、張玉君(譯)。基礎生物統計學。(5th ed.)。台北市：雙葉書廊。(2004)
10. J.K. Hill, C.D. Thomas, O.T. Lewis. (1999). *Flight morphology in fragmented populations of a rare British butterfly, Hesperia comma*. *Biological Conservation* 87, 277-283.
11. Tsukada, E.. *Butterflies of the South East Asian Islands*. IV. Plapac Co., Ltd. (1985).

拾、附錄

表一 發育日數複迴歸分析

	截距	溫度	雌蝶	苗栗	日本
系數	101.57	-2.62	1.22	-1.84	-2.67
P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$\text{發育日數} = 101.57 - 2.62 * \text{溫度} + 1.22 * \text{雌蝶} - 1.84 * \text{苗栗} - 2.67 * \text{日本}$$

表二 各族群溫度對日數迴歸方程式

地區	性別	迴歸資料		
		截距	溫度	
京都族群	雄蝶	系數	101.21	-2.73
		P 值	0.00	0.00
	雌蝶	系數	97.90	-2.51
		P 值	0.00	0.00
桃園族群	雄蝶	系數	86.66	-2.04
		P 值	0.00	0.00
	雌蝶	系數	87.92	-2.08
		P 值	0.00	0.00
苗栗族群	雄蝶	系數	149.92	-4.75
		P 值	0.00	0.00
	雌蝶	系數	147.30	-4.60
		P 值	0.00	0.00

表三 成蝶翅長複迴歸分析

	截距	溫度	雌蝶	苗栗	日本
系數	44.95	-0.44	3.42	1.86	1.35
P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$\text{成蝶翅長} = 44.95 - 0.44 * \text{溫度} + 3.42 * \text{雌蝶} + 1.86 * \text{苗栗} + 1.35 * \text{日本}$$

表四 成蝶體長複迴歸分析

	截距	溫度	雌蝶	苗栗	日本
系數	34.8	-0.39	-0.44	1.09	1.88
P 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$\text{成蝶體長} = 34.8 - 0.39 * \text{溫度} - 0.44 * \text{雌蝶} + 1.09 * \text{苗栗} + 1.88 * \text{日本}$$

表五 成蝶體重複迴歸分析

	截距	溫度	雌蝶
系數	0.61	-0.02	0.04
P 值	0.00	0.00	0.00

$$\text{成蝶體重} = 0.61 - 0.02 * \text{溫度} + 0.04 * \text{雌蝶}$$

【評語】 040710

探討端黑豹斑蝶在台灣及日本的生長模式及不同族群是否有不同適應。

建議應探討和台灣生態相關之不同斑蝶，對於生態環境的適應之不同策略較合適。