

以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統

陳建文 蔡煥良

大葉大學電機工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文以理論分析與實驗量測來對以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統做一探討。其運作係以熱電發電模組將車體所排放的廢熱回收轉換成淨潔電力，來供給熱電致冷模組致冷所需電力，達到車內冷房空調的效果。目標在於節省車輛的油耗。其系統結構包含了熱電發電子系統、電力電子子系統及熱電致冷子系統等三個子系統。系統中所使用的熱電發電與熱電致冷模組都是半導體固態元件，全系統能源轉換過程沒有噪音及溫室氣體排放，這個整合型車用系統具備零噪音、零溫室氣體排放及使用壽命長、淨潔能源等特色。

關鍵詞：熱電發電，熱電致冷，車用空調系統

Waste-Heat Recovery from an Internal Combustion Engine for Reuse in a Vehicle Air-Conditioning System

JIAN-WEN CHENG and HUAN-LIANG TSAI

*Graduate School of Electrical Engineering, Da-Yeh University
No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.*

ABSTRACT

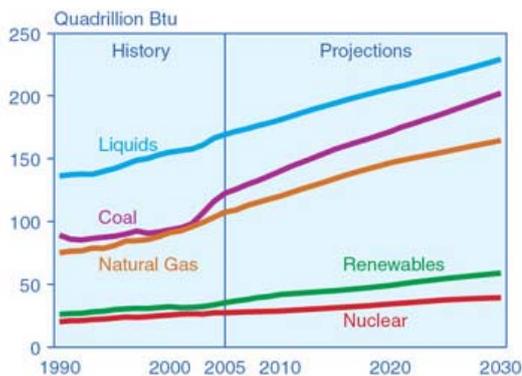
This report presents both a theoretical analysis and the physical measurement of an experimental set-up for waste-heat recovery from an internal combustion engine (ICE) for reuse in the air-conditioning system of a vehicle. A thermoelectric generator (TEG) is used for recovering the heat to generate electricity. The resulting clean power is used to drive a thermoelectric cooler (TEC) which air-conditions the vehicle. Both the TEG and the TEC are thermoelectric modules (TEMs) consisting of semiconductors with no moving parts. The energy exchange processes of both devices are quiet and emission-free. Therefore, the integrated system has the advantages of silent operation, zero-emission of greenhouse gases, a long lifespan, and clean energy.

Key Words: thermoelectric generator (TEG), thermoelectric cooler (TEC), vehicle air-conditioning system

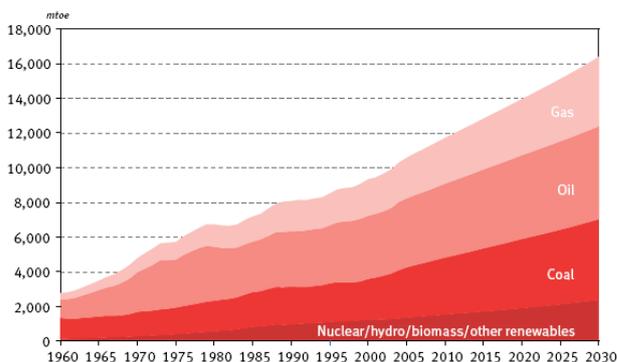
一、前言

能源是人類社會生存的基石，隨著世界經濟快速發展、人口成長，人類社會活動對能源的需求日益增大。化石能源是目前的主要能源，參考 2008 年美國能源資訊協會 (Energy Information Administration, EIA) 發表 “2008 國際能源展望” (International Energy Outlook 2008) [1] 及石油輸出國家組織 (Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) 發表 “2008 世界石油展望” (World Oil Outlook 2008) [2]，在未來 20 年內石油在世界能源供應所扮演的角色仍占有重要的份量，約占有能源供應來源 30% 以上，如圖 1 所示。化石燃料的消耗大量排放了二氧化碳，造成環境污染及全球溫室氣體效應，石油與煤的使用約占有所有能源二氧化碳排放量約 40% 以上，若能有效提昇化石燃料的能源效率或降低化石燃料的使用，將可有效降低地球溫室效應。分析石油的主要用途在於運輸，公路運輸是汽油與柴油的主要用戶，由能源資訊協會 (EIA) 或石油輸出國家組織 (OPEC) 的報告中 [1, 2] 可以看出，機動載具的運輸工具對石油的消耗量約占 50% 以上 (如圖 2 所示)，而且逐年上升，以開發中的國家需求增加最多。最近中國大陸的經濟大幅成長、人民生活水準的提昇，對私人車輛的需求量大幅增加，相對地增加對石油的需求；印度今年推出超低價的房車，降低民眾自己擁有房車的門檻，大幅增加民眾開車的機會。

為了增加石油的能源效率，世界各國的車廠積極投入引擎運轉效率的提昇及引擎廢熱的回收再利用 [3]，對於後者主要用於回收充電到電瓶，這些都是增加化石燃料的能源效率；另一方面，各大車廠為了降低化石燃料的使用率及依賴性，積極發展油電混合車及電動車，以電力為動力的電子空調設備勢必會取代現有的車用空調。盱衡目前商品化的機動載具為了駕駛及乘客的舒適性，配備空調設備，車用空調大都是運用引擎運轉帶動壓縮機提供車內冷房空調的功能，空調的運轉增加額外的油耗及溫室氣體的排放，以引擎帶動傳統空調所增加引擎負載及額外油耗約為 5-10%，若能回收引擎廢熱產生電力，再運用電子式的冷房空調設備，即可降低引擎的負載及提昇化石燃料的能源效率；另一方面，配合油電混合車及電動車的發展趨勢，電子式的空調設備將在車用空調扮演重要的角色。



(a) 參考能源資訊協會報告 [1]



(b) 參考石油輸出國家組織報告 [2]

圖 1. 能源需求趨勢圖

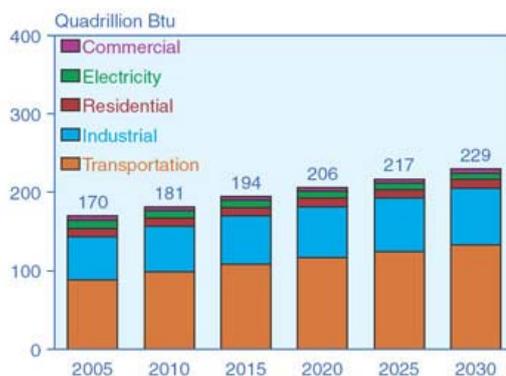


圖 2. 能源資訊協會石油消耗趨勢圖 [1]

二、研究構想

本論文提出的「以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統」，其運作係以熱電發電 (thermoelectrical generator, TEG) 模組將車輛引擎排放廢熱回收轉換成直流電力，結合最大功率追蹤器設計擷取最大輸出功率回充車用電瓶，提供熱電致冷 (thermoelectrical cooler, TEC) 模組提供冷房所需電力，

同時可提供車用電子所需電力。本創作使用熱電發電與熱電致冷模組都是半導體固態元件，能源轉換過程沒有聲音及溫室氣體排放，具備零噪音、零溫室氣體排放及使用壽命長、淨潔能源等特色。系統的創意在於車輛運轉時，引擎會排放高溫的廢熱，運用熱電發電（TEG）模組可以將廢熱轉換成直流電力（DC Power），這些電能可提供致冷晶片及冷房風扇運轉所需空調電力，如此一來車用冷房空調系統不會增加車輛的油耗。示意圖如圖 3 所示。

「以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統」的系統結構包含了熱電發電電子系統、熱電致冷子系統及電力電子系統等三個子系統，全系統架構圖如圖 4 所示。熱電發電電子系統包含了熱電發電模組，熱電發電模組經由導熱片緊貼在引擎排氣出口，回收高溫廢氣中熱能，經由熱電轉換成可用的電力，由於回收輸出的電流與功率會隨排氣口溫度與週遭溫度的溫差、熱電發電模組的操作電壓而改變，需要結合電力電子子系統的單級最大功率追蹤器（maximum power point tracking, MPPT）與交換式電源供應器（switching power supply, SWP）的設計，使熱電發電模組工作在最佳的工作

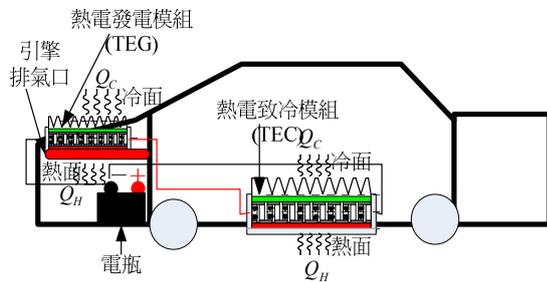


圖 3. 以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統示意圖

電壓、最佳的功率輸出及提供電瓶充電的電力。熱電致冷子系統係採用一般 DC 電流控制開關，額定工作電壓值採 12V、以電流大小來控制熱電致冷晶片的輸出功率大小，進而達到冷房控制的目的。熱電發電電子系統是電力來源，其能量的來源是引擎燃燒所排出的廢熱，這種能源的回收再利用成有用的電能，不僅可以增加能源效率，同時可以減緩地球環境溫度的壓力。同時以固態元件所製成熱電致冷晶片，沒有冷媒及機械結構，安靜且使用壽命長，具備低污染對環境友善性等特點。

三、理論基礎

熱電發電與熱電致冷模組都是以 PN 半導體為材料的熱電模組（結構概要圖如圖 5 所示），熱電發電模組是受 Seebeck 效應將溫度梯度的熱能轉換成電能，熱電致冷模組則是受 Peltier 效應將電能轉換溫度梯度，熱電模組以熱電相連電動的形式，增加工作電壓和熱平行以減少其熱電阻，並均勻在兩個陶瓷板熱膨脹。在熱電模組顆粒中主要有熱傳導、焦耳加熱、Peltier 致冷/加熱效應、Seebeck 效應等四個能源轉換程序。為分析方便，可以等效電路圖來分析，如圖 6 所示，其中 Q_{th} 為熱傳導過程中因熱電偶對的熱傳導所產生溫差 ΔT 的能量，其大小如下

$$Q_{th} = -\kappa_{th}\Delta T \quad (1)$$

其中 κ_{th} 為熱傳導係數。焦耳加熱是熱電偶對的電子阻抗所造成的能量損耗，可以表示成

$$Q_J = I^2 R \quad (2)$$

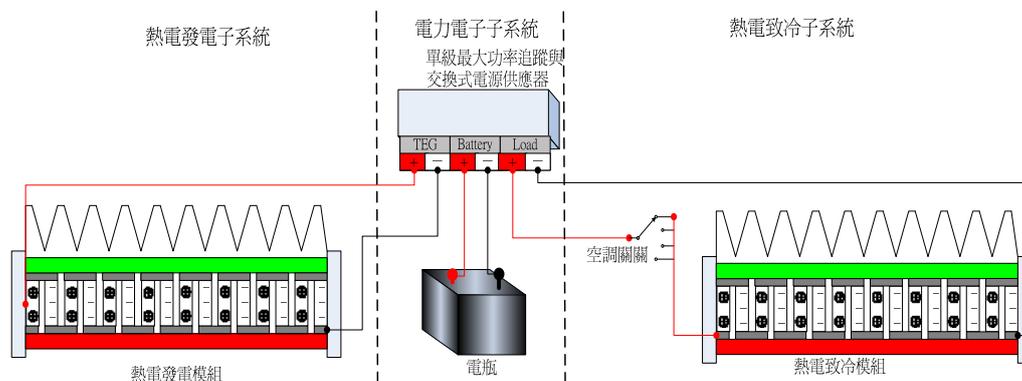


圖 4. 以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統架構圖

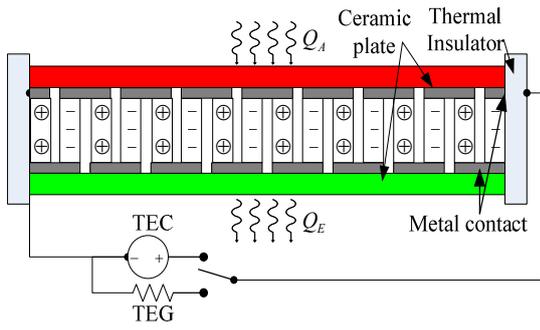


圖 5. 熱電模組結構概要圖

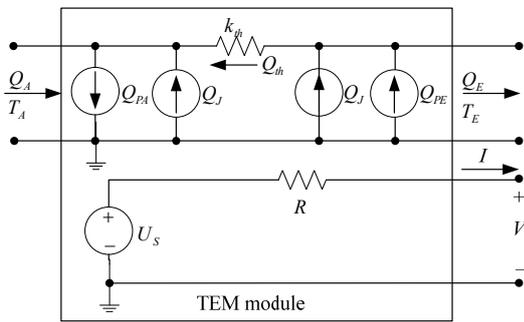


圖 6. 熱電模組等效電路圖

Peltier 致冷/加熱效應是描述熱面與冷面所吸收或釋放的能量，其大小為

$$Q_{PE/PA} = SIT_{E/A} \tag{3}$$

其中 S 為材料本身的 Seebeck 係數。Seebeck 效應是描述熱電偶對因溫度梯度所產生的電壓降，其大小為

$$U_S = S\Delta T \tag{4}$$

以能量平衡觀念來進行熱電模組熱面與冷面的穩態分析，熱面所吸收熱量 Q_A 及冷面所排放的熱量 Q_E 分別為：

$$Q_A = SIT_A - 0.5I^2R - \kappa_{th}\Delta T \tag{5}$$

和

$$Q_E = SIT_E + 0.5I^2R - \kappa_{th}\Delta T \tag{6}$$

熱電模組的輸入電壓為：

$$V = U_S + IR \tag{7}$$

四、模擬分析及實驗量測

(一) 模擬分析

本論文實作驗證擬採用 TEG2 (50×50×40/200K) 及台灣歐亞科技 TEC1-12710 等二個模組，原廠所提供的規格如表 1-2 所示。首先參考熱電模組 TEG2 參數，運用 Matlab/Simulink 設計模擬程式 [4] 計算出其內部參數，同時模擬週遭溫度為 $T_C=30^\circ\text{C}$ ，熱面高溫分別為 $T_H=80^\circ\text{C}$, $T_H=130^\circ\text{C}$, $T_H=230^\circ\text{C}$ ，當溫差為 50K, 100K, 200K 時模組輸出電流、電壓及功率的特性曲線，如圖 7 所示。可以得到一個 TEG2 最大的輸出功率為 39.6 W。同時，參考歐亞 TEC1-12710 參數，設計模擬程式計算出其內部參數 [4]，同時模擬熱面高溫為週遭溫度 $T_H=30^\circ\text{C}$ ，冷面溫度與模組電流及功率的特性曲線，如圖 8 所示。當預期冷面溫度 $T_C=0^\circ\text{C}$ 左右，可以得到一個 TEC1-12710 最大的消耗功率約為 15 W。

(二) 實驗量測

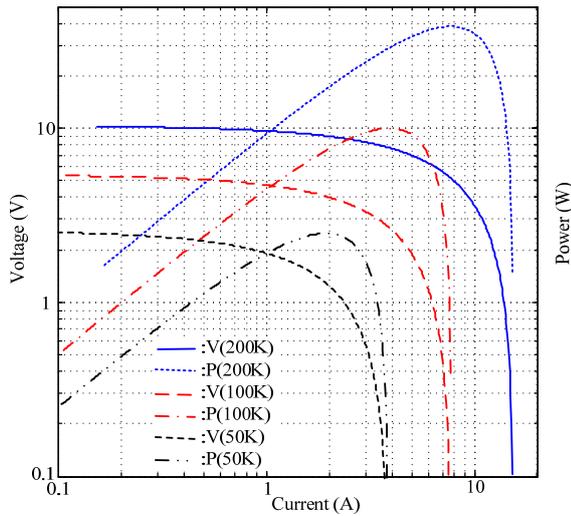
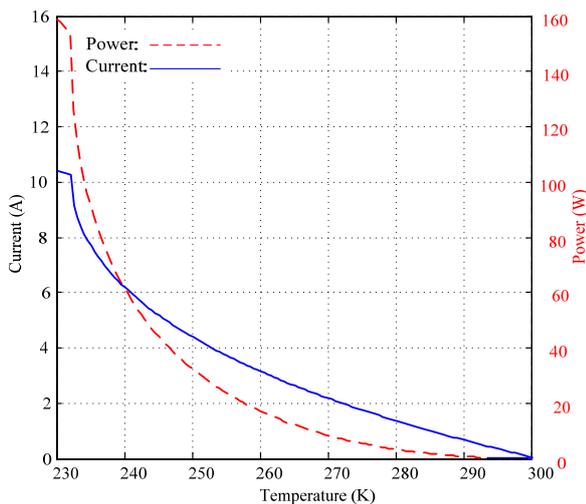
本文實驗量測採用德國公司所產的 TEG2 及台製

表 1. TEG2 (50×50×40/200K) 規格表

Type	Maximum voltage (V)	Short circuit current (A)	Maximum power (W)	Maximum operation temperature (°C)	Size L×B×H (MM)
TEG2	10.3	15.3	39.6	250	50.5×50.0×3.4

表 2. TEC1-12710 規格表

Type	Couples	Imax(A)	Vmax(V)	Qcmax(W)	ΔTmax(°C)	Dimension (mm)			R
				ΔT=0	Qc=0	L	M	H	
TEC 11-12710	127	10	15.4	88.9	67	40	40	3.30	1.08

圖 7. $i-v$ 和 $i-P$ 特性曲線圖圖 8. T_c-i 和 T_c-P 特性曲線圖

Centenary Materials TEC1-12710 等二個模組。組裝測試熱電發電子系統及熱電致冷子系統的實體圖如圖 9 所示，其中對於熱電發電模組的熱面，以具有溫度控制的電磁加熱器來模擬引擎排氣的熱源，使用熱耦計（一）（型號：TES 1314 Thermometer）量測熱面溫度，冷面以水冷方式來控制其溫度維持在 27°C 左右，用多功能電錶（型號：CIE 8050 Multimeter）量測其輸出電壓與電流，進而計算其輸出功率大小，對於熱面、冷面溫差 50 度、100 度、150 度及 200 度的輸出電壓、電流與功率大小如圖 10 所示，由圖中可以知道當熱面、冷面溫差 200 度時，熱電模組的最大輸出功率約為 22 W，這對一般車輛引擎出口排氣管溫度高達



圖 9. 實驗量測實體圖

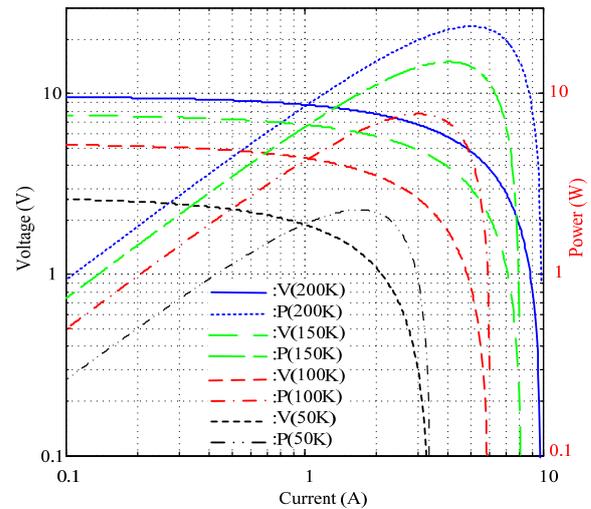


圖 10. 熱電發電模組輸出電流與功率曲線圖

$200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ 的廢熱回收發電應用，具備商品化的價值。最後以一個壓克力車體模型來模擬車體內部的溫度響應，提供熱電致冷模組額定工作電壓 5 V，控制電流大小，以電流 3.5 A~4 A 最佳（消耗功率為 20 W），熱面以水冷方式來控制其溫度維持在 27°C 左右，使用熱耦計（二）量測熱面溫度量測空調出口溫度響應如圖 11，由圖中可以發現致冷晶片致冷速率很快，可以達到車輛快速冷房空調的條件。

五、討論

（一）效能分析

由模擬結果與實驗量測結果分析，熱電發電模組原廠所提供的規格顯示，最大發電功率應為 39.6 W，這個規格是模組在設計溫度 300 K， $S=0.052\text{ V/K}$ ， $R=0.7\ \Omega$ ， $\kappa_{th}=1.9\text{ W/K}$ 計算得到，Seebeck 係數下降約 80-90%、熱導係數上昇 1.5-1.6 倍，電阻增加高達 1.8 倍，最大輸出功率該在 20-25 W。目前商品化的熱電發電模組的規格都是在設計溫

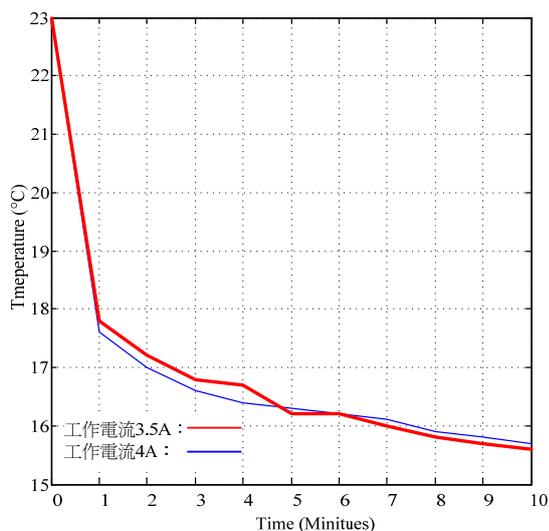


圖 11. 車體空間內部溫度變化曲線圖

度下的結果，與實際的輸出會因為模組變數化而有誤差。熱電致冷模組的消耗功率最大為 20 W，冷房的效率不及 1%，主要原因係取用傳統散熱片及空氣循環，在冷房效能提昇是需要再加強的。

(二) 可行性分析

由模擬結果與實驗量測結果分析，單一熱電發電模組的最大發電功率約為 22 W，轉換效率達 8.6%，相對應的熱電致冷模組消耗功率最大為 20 W，經由電流大小開關來控制車用冷房的能力，在系統功能的冷房能力是可行的。

(三) 價格分析

目前熱電發電模組約為 100 元/W，製作一組 80 W 的熱電發電電子系統約為 8,000 元，一個 TEC1-12710 約為 600-1000 元，一個 30 W 橫流扇約 1,000 元，本文中實作一個這樣的系統約為 10,000 元，主要成本與傳統的車用空調壓縮機（約為 10,000 元）相似，但所採用的系統是固態元件，使用壽命長，同時不會增加油耗，且具備低噪音、節能減碳及環境友善性、淨潔無碳能源等優點。同時當產品商品化及普及化後，產品的製造價格應可低於 8,000 元，極具市場競爭性。

六、結語

由模擬結果與實作量測分析，本文中所設計熱電發電電子系統的輸出功率及電量都可以提供足夠的電力來供應致冷子系統用電。經由實作量測，單一熱電發電模組的最大發電率約為 22 W，轉換效率可達 8.6%，發電成本約為 NT 100/W，經由傳統空調開關來控制供應致冷晶片電流大小及車用冷房的能力是可行的。本文目前所設計的以引擎廢熱回收為動力的車用空調系統係以一般房車機動載具為應用範圍，車輛運轉時，引擎排放高溫的廢熱運用熱電發電模組可以將廢熱轉換成直流電力，這些電力可提供致冷晶片及冷房風扇運轉，不會增加車輛的油耗，達到節能減碳的目標。對於其他以內燃機引擎為動力的機動載具，如 RV 車、大型客車、貨運車或船艇，都可客製化調整熱電發電電子系統及熱電致冷子系統的規格，提供駕駛及乘客一個舒適的空間，同時達到愛惜地球的目標。

參考文獻

1. Energy Information Administration (EIA) (2008) *International Energy Outlook 2008*. DOE/EIA-0484 (2008). U.S. Department of Energy (DOE), Washington, DC.
2. Griffin, J. (2008) *World Oil Outlook 2008*. Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC), Vienna, Austria.
3. Rowe, D. M. (2006) Review thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source. *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1), 13-23.
4. Tsai, H. L. and J. M. Lin (2009) Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink. *Journal of Electronic Materials*, DOI: 10.1007/s11664-009-0994-x, Retrieved November 19, 2009, from <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s11664-009-0994-x>

收件：98.11.23 修正：99.03.08 接受：99.04.27