

以系統動力學角度分析健康碼對浙江控制新冠肺炎疫情之效用

張婕¹

摘要

為應對新冠疫情和解決調查人員流動困難等問題，浙江省政府依靠當下大數據資訊科技，成功開發出「健康碼」以追蹤人口流向和病毒擴散情況。2020年初，隨著浙江省與周邊省份逐漸解除居家隔離，目前健康碼已經被廣泛使用，然而現有文獻缺乏對健康碼在疫情防控中的作用之研究。為填補研究空白，本研究 SEIR 模型檢驗健康碼在浙江省疫情控制之效用，在兩種不同情境下：普通病毒和變異病毒，對兩種不同的政策進行模擬：健康碼和疫苗。經過與實際數據對比和情境模擬後，本研究發現：在面對普通病毒和變異病毒時，健康碼對阻擋病毒傳播都具有一定效果，但在面對傳染力更強的變異病毒時，需要同時延長健康碼的隔離時間才足以應對；而注射疫苗的感染人數高於升級版健康碼。對此，本研究認為：疫苗技術有限無法預測下一波病毒變異的方向；而民眾對於疫苗的錯誤認知而忽略了其他防護措施，人群接觸時的感染風險也相應上升，從而導致了注射疫苗後感染人數上升的結果。本研究亦存在不足，如未將居家隔離政策和人口數量持續改變的情況考慮在內。本研究認為如果未來研究能改善上述不足，對疫情的模擬會更加準確和具參考價值。

關鍵詞：系統動力學、SEIR 模型、政策模擬、新冠疫情、健康碼

¹ 國立政治大學公共行政學系，碩士生；聯繫方式：109256041@nccu.edu.tw

1. 概論

由新型冠狀病毒引發的肺炎疫情在去年春節肆虐中國大陸，而臺灣在一年多後的處於同樣的危機時刻。面對這樣一種高傳染性強、潛伏期長的新型病毒，浙江省政府決定採取嚴格的居家管控措施。然而在經歷了一個多月的「封省」後，浙江——作為一個以民營企業為支柱的東南沿海大省，面臨著「疫情擴散」和「復工」的雙重壓力——不復工，經濟下滑；一旦復工，未知的感染者可能會進入省內造成疫情擴散。

根據流行病學的觀點，把握感染者和其密切潛伏期患者的行動軌跡是防疫的重點。在疫情防控初期，各地政府和基層組織普遍採用手工填寫表格和人海戰術，資訊來源自各類表格和人員的回憶，存在著數據不精確、不共用、流通慢、效率低等缺點，嚴重影響抗疫工作的開展，且用以登記的紙和筆很容易成為病毒傳播的媒介（張昊、佐翼，2020）。為了改善上述缺點，浙江省政府依靠當下大數據資訊科技，成功開發出「健康碼」，並在多個應用軟體內上線，之後迅速推廣至全國。健康碼是一項可以搭載在智能手機客戶端（如微信或支付寶）上的程式，個人可以實名認證並填報健康狀況，如體溫，是否咳嗽等情況。平臺端通過與手機漫遊軌跡、密切接觸人員等相關數據比對，可以對個人自主填報的資訊進行校驗，精準、動態地管理人員資訊。健康人員可以憑藉健康碼作為身份識別系統，在適用地區「亮碼通行」（史晨、馬亮，2020）。企業通過讓員工上傳個人健康碼的方式來管理其健康狀況，如有發熱等情況可隨時通知企業並進行隔離和就醫。隨著浙江省與周邊省份逐漸解封，地區間數據互認實現了跨區域人員流動的動態精準管理和對疑似病例的實時追蹤。目前為止，浙江省的新冠疫情基本得到控制。中國商報數據表示：隨著疫情的逐漸緩解，浙江省快速從疫情衝擊中恢復，企業註冊量一馬當先，增長率達到了 99.26%。

在疫情成為持久戰的情況下，「健康碼」的評估多以從資訊技術、公共治理或政策分析等角度出發，少有文獻以建立模型和政策模擬的方式討論「健康碼」在發揮的結構性作用。SEIR 模型和傳染病系統動力學是在預測感染人數和評估防疫政策效果時常用的兩種理論，而新冠病毒高傳染性的特點意味著在建立模型時必須是動態的，而符合傳染病動力學和 SEIR 模型的基本特徵。

綜上所述，本研究將從系統動力學出發，選擇使用 SEIR（Susceptible-Exposed-Infectious-Removed）模型，建立起新冠病毒傳播和健康碼之效用的系統動力學模型，試圖回答「健康碼」是否有效這一根本問題，另透過不同情境下防疫政策的效果模擬，來發掘能夠提出改善政府防疫工作之適當政策工具與配套方案。

2. 文獻回顧

2.1 傳染病系統動力學

傳染病動力學顧名思義是將以系統動力學的角度來分析傳染病的傳播過程，是針對傳染病的流行規律進行理論性定量研究的一種重要方法(王拉娣, 2004; 韓曉娜, 2006)。在研究中，傳染病動力學通過對種群人口出生、流動、死亡的特點研究，建立動力學模型；建立模型後，模型中的假設、參數、變數以及它們之間的聯繫來自於疫情爆發早期的數據，定量揭示傳染病主要特徵，納入未來不確定性，幫助發現傳染病傳播機理，科學預測疫情流行趨勢(劉薇, 2014; 李昊、段德光、陶學強、陳恩、高樹田, 2020)。基於目前全球傳染病發生頻率逐年上升的情況，傳染病的預防和控制從單一國家內、各級衛生部門之間的合作轉向多政府部門甚至國際間跨領的合作。系統內部和跨系統之間的非線性路徑與系統動力學的核心高度相關。相較於傳統分析方法忽略了其時間延遲和動態的特性，系統動力學通過收集數據，使用數學模型對其定量特徵進行闡述，模擬其流行過程，可以加深對疾病流行機制和動態變化的理解。即時如此，系統動力學在傳染病學的運用上並不是一帆風順的。首先是系統動力學模擬對於模型準確性要求較高，而數據獲取的難度大，種類多，從而影響了模型的準確性，也影響了模擬結果的參考價值；第二，線型的思考方式並不是適用於系統動力學，這意味著模型搭建時需要儘量考慮所有可能的影響因素，這導致了模型太過龐大而失去了聚焦；第三，系統動力學在傳染病控制上的應用多用於模擬某一項政策的效果為何，但是忽略了在現實生活中該政策是否能夠有效實行(劉賀, 費春楠, 2019)。

除了系統動力學以外，傳染病預測常用方法還有如下幾種：迴歸分析、時間序列分析(ARIMA 模型)、灰色系統理論等，但是以上方法均有缺點所以不適合新冠病毒傳播模擬。以時間序列分析為例，時間序列分析對需要的序列長度有要求，如果序列太短則可靠性較差(吳家兵等, 2006)，而新冠疫情發生的時間不滿足此要求；另外，如果研究對象的慣性趨勢發生很大改變，如採取新的防治措施則需要修正甚至重新模擬，這也與研究目的不符；灰色系統理論相較於時間序列模型而言，數據量要求小，也有較強的動態性，但是當數據波動幅度較大時，精度很難提高，只用於單調發展趨勢的情況(李瓊芬等, 2013)，而新冠病毒傳播的單調性無法預測，因此也不適用。

2.2 SEIR 模型

目前以對傳染病的研究模型以決定論的傳染病系統動力學模型為主要趨勢，其中又以 SEIR 模型為主導。該模型將傳染病的研究對象分成若干類，放入若干個組別進行分

析與模擬。本研究所採用的 SEIR 模型的原因是該模型假定某一地區的人口為常數，這與浙江省目前人口情況相似；SEIR 模型也可因地制宜，在基礎模型之上添加限制因素形成符合當下情況的模型變式，例如時間延遲、隔離影響，人口變動等（餘雷，薛惠鋒，李剛，2007），也符合解封時大量外來人口移入浙江省內之情形；此外，網絡模型建構較為複雜，模擬難度較大。至此，本研究認為採用 SEIR 模型可以在不失準確度的情況下，易於計算機模擬得出趨勢。

從疫情發展初期開始到如今中國大陸疫情基本得到控制，疫情初期有許多學者如用 SEIR 模型對 COVID-19 的發展進行研究（Read，2020；Shen，2020；Casares & Khan，2020）。劉雅姝等（2020）整理了 21 篇與新冠病毒流行趨勢的相關文章，其中有 3 篇使用 SIR，10 篇使用 SEIR 模型，甚至包括了鐘南山團隊，充分說明了 SEIR 模型在傳染病預測中的適用性。但與真實數據對比，上述提到的作者的模擬已經被證實與真實數據相差過大；Wu（2020）且僅對武漢及其周邊城市進行模擬分析，未提及其他與湖北關係密切的省份之分析；劉紅亮等（2020）以甘肅省為例建立模型，預測疫情走勢；楊守德和陳偉（2020）對基於新冠肺炎傳染特徵對 SEIR 模型進行改良；王思遠，譚瀚霖，李東傑（2020）使用 SEIR 模型對湖北省和韓國的疫情進行預測，並認為政府干預明顯影響疫情的發展；與之相呼應的是，曹盛力（2020）等人認為除了將潛伏期患者的傳播能力考慮在內，也必須考慮追蹤隔離干預措施在系統中產生的影響，這也就是要將健康碼考慮在內的原因。

綜上所述，學者對新冠肺炎進行系統動力學分析的文章較多考慮在如何準確預測疫情趨勢，較少著墨於應對方式，例如政府之干預措施或「健康碼」等防疫手段考慮在內。因此，本研究將針對「健康碼」之效用進行情境模擬及分析，期望能彌補學術之空白。

3. 健康碼系統動力學分析

本部分將從系統動力學的角度出發，依循確定問題與範圍、提出假說與架構、繪製因果環路圖、繪製存量流量圖、測試與模擬五個步驟來分析健康碼在浙江省政府控制新冠疫情中發揮的作用。

3.1 健康碼概況

顯而易見，健康碼是新冠疫情防控和大數據結合的產物。在疫情爆發初期，幾乎所有城市都按下暫停鍵，為控制疫情爭取時間；而當疫情得到控制，復工複產成為重要任務。龐大外來務工人員返浙帶來的人口流動，夾雜著未知的感染風險，如何在保證務工

人員返鄉的同時盡可能地減少病毒傳播，由此催生出了「健康碼」。

「健康碼」是一個約定俗成的稱呼，在學術上未有統一定義，但基於技術和發揮作用的定義是：以真實數據為基礎，由市民或返工返崗人員通過自行網上申報，經後臺審核後，即可生成屬於個人的二維碼（方興東、嚴峰，2020）。健康碼將市民出行需要的通行證或健康證明數位化，通過政府的溝通協調在一定範圍內通用。2021年5月起，臺灣開始推行「簡訊實聯制」，雖然都是以掃描QRcode為基礎，「健康碼」與「簡訊實聯制」仍然存在一定的區別，如下表一所示。

《表一》「健康碼」與「簡訊實聯制」之異同

來源：本研究繪製

相同點	不同點
均使用 QR code	使用簡訊傳送/ 使用數據流量傳送
紀錄民眾足跡（地點、時間）	地點使用場所代碼/ 地點使用 GPS 定位
進入公共場所（交通）需要使用	簡訊與手工同時紀錄/ 使用健康碼占絕大多數
	傳送至政府部門熱線/ 傳送至雲端儲存
	無法顯示健康情況/ 可以顯示，接種完疫苗會變成金色

健康碼的分級標準是由浙江省政府按照《中華人民共和國傳染病防治法》和《中華人民共和國突發公共衛生事件條例》制定。申領健康碼通過支付寶或者微信客戶端，根據提供的個人資訊和簡單問題的答案，系統判斷填報人當下的身體狀況，分成低、中、高三個風險等級，分別對應綠、黃、紅三種顏色，如下圖1所示，紅碼和黃碼的持有者必須自我隔離，綠碼的持有者可以在出示綠碼後自由進出公共場所。健康碼通過採集個體旅行、購物、使用網路時的GPS數據即可獲得個體移動的與他人物理接觸的資訊；如果系統獲取了一名確診病例的活動位置，那麼所有曾經位於該位置的人的健康碼都會轉為紅色或黃色（楊秦華、潘曉白，2020）。健康碼的出現，解決了三個問題：第一是統一了資訊收集的管道，將基層人員從各類表格抽離出來，提高了各個環節的運作效率；第二是簡化了檢測手續，從紙質的靜態通行證轉變為顏色鮮明的動態健康碼，更能精確管控中高風險人員；第三是為復工復產提供了大數據支撐，通過掃描公共場所的二維碼，可以準備掌握當日有多少人進出。



《圖 1》健康碼

來源：宋明順、黃樂富、王鑒棋、餘曉

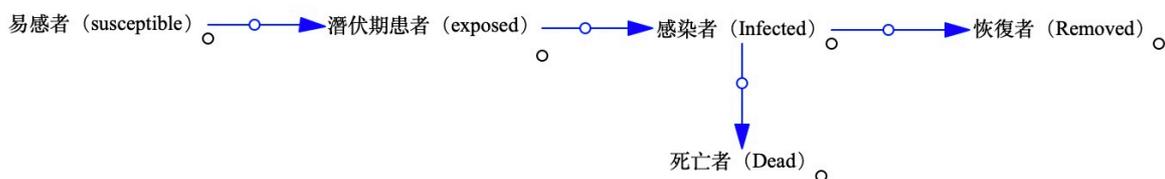
3.2 關鍵變項與研究範圍

地區內的疫情擴散情況是本研究首要想要觀察的現象，而能直接反應此一現象的變項就是地區內感染人數，因此本研究將感染人數設為關鍵變量；此外，由於新冠病毒傳染速度較快，因此將間隔為 1 天，整體模擬時長為 300 天。

3.3 模型建構

3.3.1 人群轉化圖之建構

傳染病防控的重大挑戰在於如何管控傳染病的傳播三個基本環節，即傳染源、傳播途徑和易感人群（徐致靖，2015）。在 SEIR 模型中，人群被分為以下四類：易感者，潛伏期患者，具有傳染力的感染者，移除者(Removed)，其中移除者分為痊癒者(Recover)和死亡者(Dead)，總人口為上述各類人群總數之和。作為最基礎的傳染病模型，SEIR 模型已被大量運用於預測疫情趨勢（王俊芬等 2020；王思遠等，2020；李昊等，2020；Biswas et al., 2020；Tang et al, 2020；Chen et al, 2020；Tang et al., 2020）。圖 2 展示了在不考慮醫療的情況下，健康的易感者轉變為被感染後的恢復者的過程。



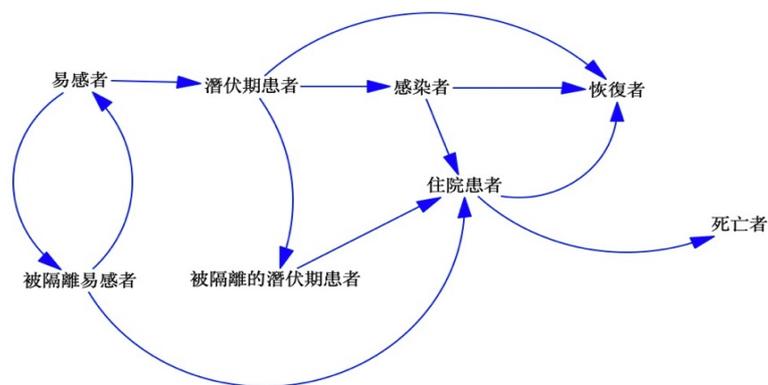
《圖 2》SEIR 傳染病動力學中的人群轉化

來源：本研究繪製

SEIR 作為基礎模型尚未考慮到現代社會面對傳染病通常採用隔離措施和醫療救助，Leontitsis 等（2021）根據現有疫情發展和醫療狀況在 SEIR 模型基礎上增加三個類別，分別是無症狀感染者 (Asymptomatic)、隔離者 (Isolated) 和住院病人 (Hospitalized)；相對應的，模型中也會則總人口會增加倉室：被隔離者（包括潛伏期和易感者）和住院

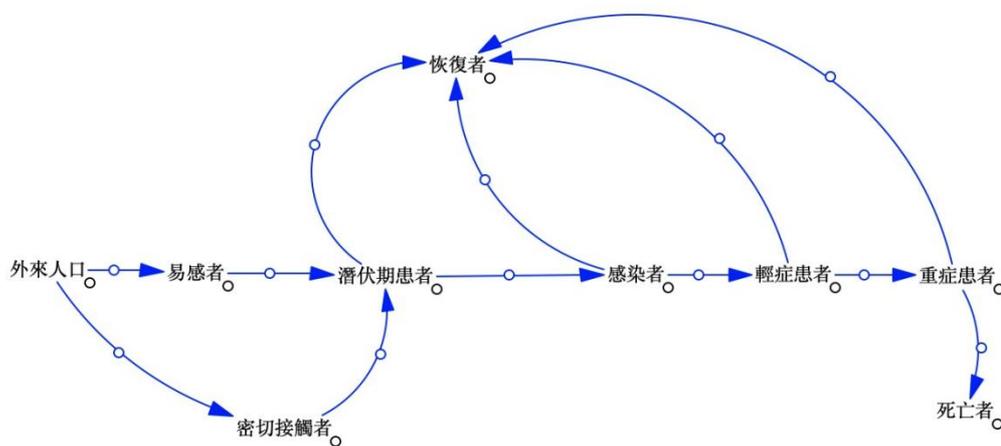
治療的患者。為充分模擬浙江省疫情，即在 2020 年初還未有單獨的「無症狀感染者」類別，因此在下圖 3 為增加倉室後的傳染病模型的人群轉化圖，未將「無症狀感染者」納入考量。

圖 2 和圖 3 都展示了在不考慮人員流動的情況下，本地人口在疫情中的轉化情況。圖 4 為加入外來人口後的人群轉化模型，相較於圖 2 和圖 3，圖 4 刪去了「隔離易感者」和「隔離接觸者」——當健康碼啟用時浙江省即將解封，因此假定浙江省所有居民都是健康的，僅保留仍然在隔離治療中的患者；此外增添了「重症患者」倉室來模擬新冠病毒感染者的治療過程和展現新冠疫情對於醫療系統的挑戰。



《圖 3》增加「隔離者」和「住院者」之後的人群轉化圖

來源：本研究繪製



《圖 4》有外來人口參與且沒有隔離措施的人群轉化圖

來源：本研究繪製

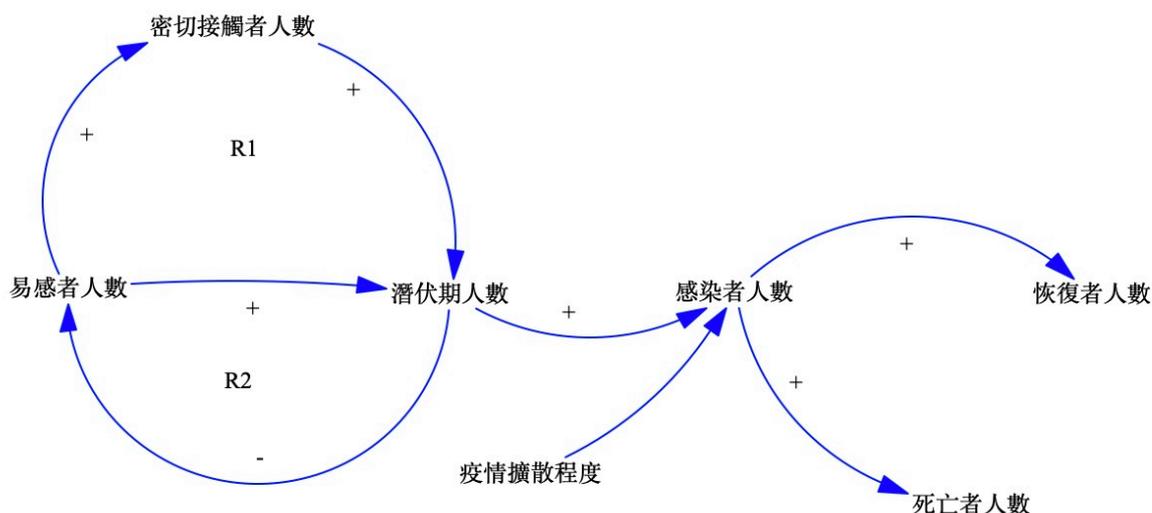
當政府允許外來人口返浙工作時，大量外來人口通過公共運輸系統流入省內，使浙江省內易感者數量增加；在返浙途中，如果同行人員有感染者，則潛伏期患者的數量也會增加；此外，外來人口中的感染者在浙江省被確診，則住院患者的數量也會上升，太

多的外來住院患者會影響到當地的醫療資源，極端情況下會發生「醫療擠兌」²的情況，間接降低治癒率和提高死亡率；如果沒有被確診而自由活動，則會導致其他健康易感者被感染。

3.3.2 因果環路圖之建構

根據人口轉換關係，因果環路圖的構建將分為三個層次：本地人口系統、外來人口系統和醫療資源系統。首先是本地人口層次，如

《圖 5》因果環路圖之本地人口層次所示，在人群中存在感染者的情況下，接觸到感染者的易感人群被稱為密切接觸者，密切接觸者有一定機率轉變為潛伏期患者，本研究假設新冠肺炎與非典類似，存在有長時間的潛伏期，處於潛伏期的居民也帶有傳染性。在本地人口數量一定的情况下，密切接觸者和潛伏期人數越多，健康的易感人群數量則越少；潛伏期患者發病後被認為是本地的感染者，導致感染者人數上升；感染者經過治療後，或痊癒或去世，因此恢復者人數和死亡者人數也會上升；此外，疫情擴散程度代表了該地區疫情嚴重程度，擴散程度直接影響了該地區的感染者人數。



《圖 5》因果環路圖之本地人口層次

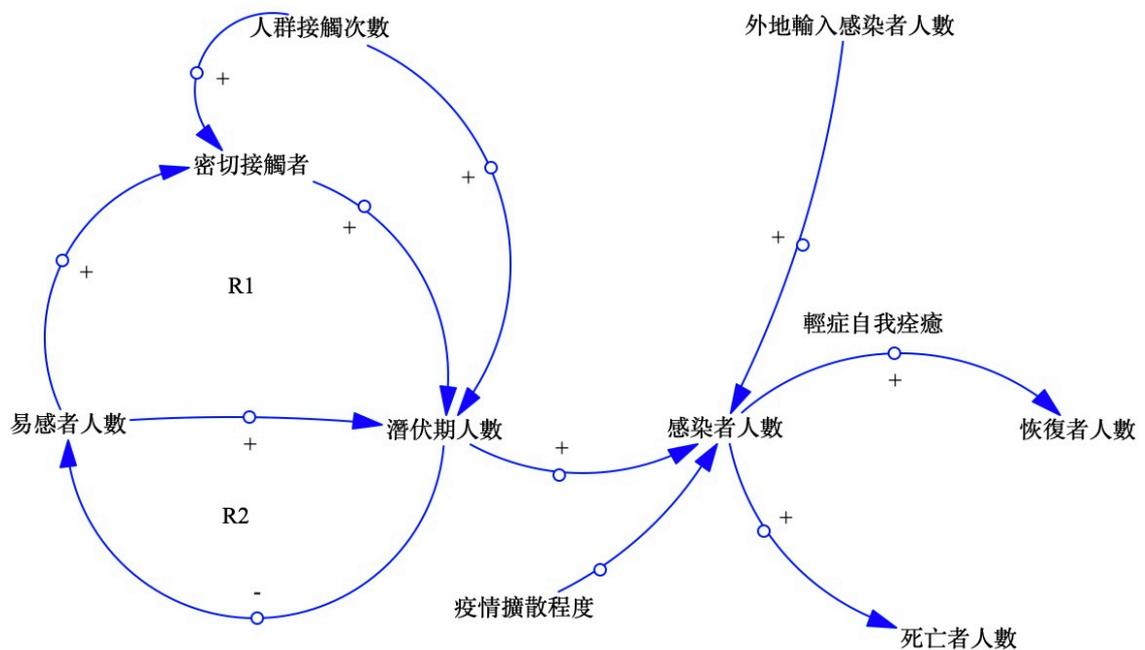
來源：本研究繪製

浙江省解封以後，不可避免地會有大量外地人口流入，因此須將外地人口帶來的影響也需要被納入考慮，如圖 6 所示：對於無疫情發生的浙江省而言，如果沒有準確發現從外地來浙的感染者，會導致疫情的反覆。因此本研究在設計因果環路圖之外來人口層

² 疫情爆發初期患者數量暴增導致醫院無法處理，醫療資源無法有效地向重症患者救治集中，稱為醫療擠兌現象

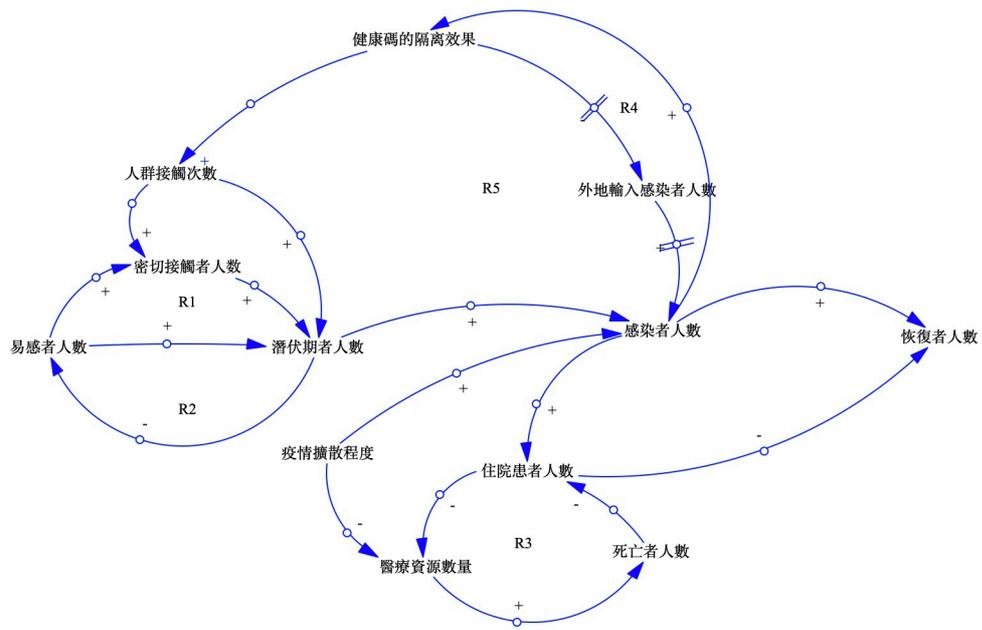
次時，即圖 6，著重考慮外來輸入感染人口給本地帶來的影響。隨後為探索研究為題，最後加入「使用健康碼」；考慮醫療系統資源有限的情況下，於是添加「醫院醫療資源」和「住院患者」，最終因果環路的呈現如圖 7 所示。

其中 R1、R2 表示健康人群被病毒感染的過程；R4 將健康碼使用頻率納入考量，從模型中可以看出，當政府開始要求民眾使用健康碼之後，意味著浙江省已經解除封城狀態，人們可以在使用健康碼的情況下活動，出入公共場所和搭乘公共交通，人群的接觸次數會上升。另一方面，由於從省外回到省內需要隔離 7 天（健康碼非綠），在統計上存在一定的延遲；解除封城意味著本地無疫情爆發，會使群眾認為疫情趨緩，於是懷有僥倖心理減少使用健康碼的頻率。R3 為醫療系統負荷情況——疫情的擴散會衝擊到有限的醫療資源，住院患者會消耗醫療資源數量，醫療資源數量越少，治療設備越落後，醫療資源的缺乏會讓原本的患者得不到有效治療，死亡患者數量越多，但是同時死亡的患者為會減少住院人數，也降低了醫院的負荷。



《圖 6》因果環路圖之外來人口層次

來源：本研究自行繪製



《圖 7》因果環路圖之健康碼和醫療資源層次

來源：本研究自製

3.3.3 系統存量流量圖之建構

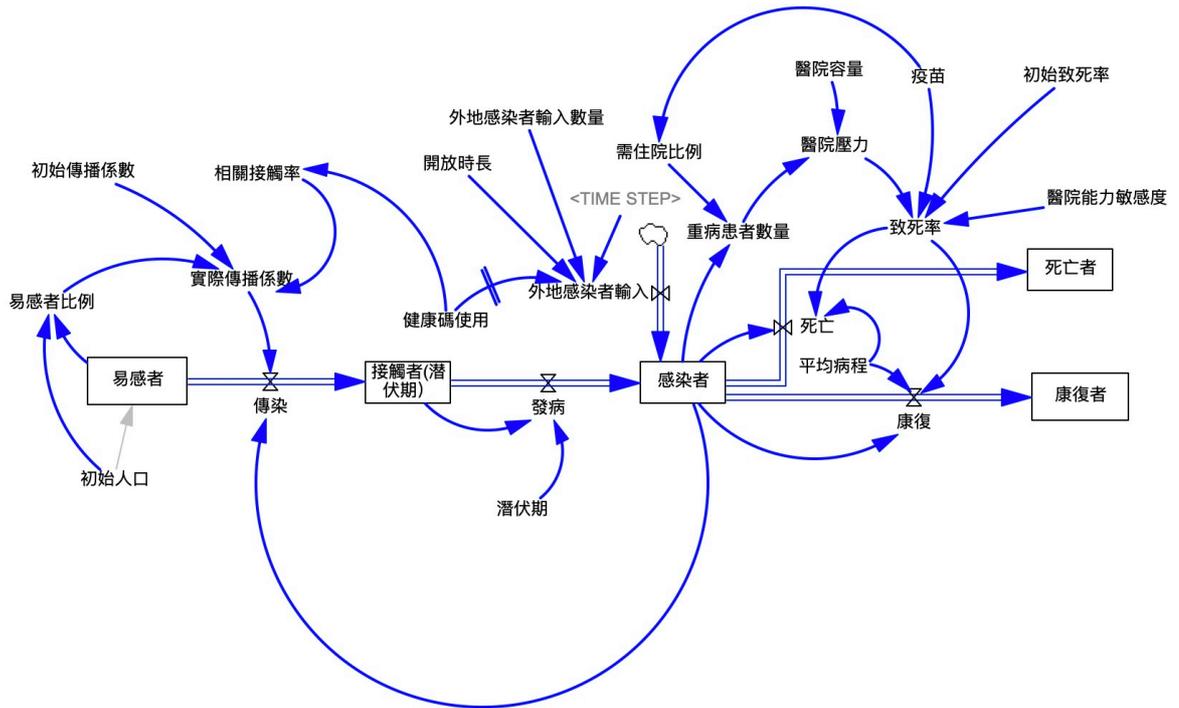
隨後本研究將 Vensim 的系統因果環路圖進一步整併、簡化及轉換為可操作的系統動態流量圖以便分析與模擬。

系統動態流量圖分成三個部分，首先繪製是最基本的 SEIR 倉室模型，即病毒傳播系統。SEIR 模型有兩個基本前提：第一是接觸後 100%發病，第二是康復後的人群對病毒免疫。基於這兩個前提，本地人口被分為易感者、接觸者（潛伏期患者）、感染者，移出者——死亡者和康復者；由於新冠病毒引發肺炎的症狀是由輕到重，有一定機率變成重症患者，重症患者救治無效後死亡。死亡率又分為初始死亡率和實際死亡率。初始死亡率是指病毒本身的致死能力，而實際死亡率與醫院的醫療條件息息相關。對於醫院而言，治療重症患者消耗的醫療資源相較於輕症患者而言高出許多，因此醫院能夠容納的重症患者的數量有限，該數目這就是醫院容量；重症患者越多，醫院壓力增加導致重症患者得不到有效治療，出現醫療擠兌的可能性越大，重症患者的康復率降低、死亡率增高，影響本地的疫情控制；醫院的壓力還與該醫院的靈敏度有關，醫院越敏感，對未來疫情判斷越準確，處理疫情的效率越高，重症死亡率下降。本研究之所不討論密切接觸者數量，原因在於：對於高傳染性疾病而言，接觸意味著可能被傳染，但是僅依靠確診病人的記憶容易造成遺漏甚至是病人刻意隱瞞自己的行動軌跡。利用大數據的健康碼

能更精確地記錄確診病人去過的場所和時間點。如果沒有健康碼的使用，感染者有可能無法被及時納入到流行病學工作者的考慮之內。由此可見，密切接觸者為醫療學者確定疫情傳播的範圍並即時封鎖高風險區，而在統計數字上的意義略小於感染者和死亡者。

第二階段是加入「外來人口」變量。在文章前部分提到健康碼的誕生時間處於浙江省即將解除封鎖的時刻，這就意味著有大量外來務工人員即將湧入浙江。在本研究的動態流程圖中簡化了這一過程。假設模擬開始時，居民全部為本地人口，外地人口僅考慮對本地影響最大的外來感染者。當外地感染者人口進入本地時，由於需要居家隔離，在需要經過7天後才會被統計入感染者人數。第三階段是加入「疫苗」和「健康碼」。疫苗在控制疫情方面的作用體現在減少住院比例和降低致死率，但是疫苗並不能阻止疫情的傳播。健康碼的使用被分成兩個部分。第一部分是健康碼的「阻擋」作用，持有紅碼的外來務工人員不被允許進入浙江省內。根據2011年《浙江省外來人口的研究與分析》，安徽省和江西省人口大量流入，達到228.5萬人和153.0萬人，分別佔比19.3%和12.9%，貴州省以149.9萬人，佔比12.7%，位列第三³。在系統模擬中假設安徽省、江西省和貴州省的外來務工人員——佔全部外來人口的44.9%，全部持紅碼而無法進入浙江；而持有黃色健康碼的人員需要居家隔離7天等待健康碼變成綠色，期間不允許進入公共場所和乘坐公共交通；社區居委會將在居家隔離住戶門前貼上封條防止居家隔離人員擅自外出。綜上所述，健康碼紅碼有效降低了外省人口進入浙江省的比例，健康碼黃碼則會在數據統計上產生延遲效果。第二部分是健康碼減少人群接觸的作用。當省內疫情傳播的較為嚴重時，民眾會採取自覺出示健康碼進出公共場所或減少出入公共場所的次數或是保持社交距離，這些措施都直接降低了民眾之間的接觸次數。整體系統動態流量圖如圖8所示。

³ 《浙江省外來人口的研究與分析》，取自網址：http://www.zj.gov.cn/art/2011/11/22/art_5499_222471.html



《圖 8》系統存量流量圖

來源：本研究自行整理

4. 現況與政策模擬

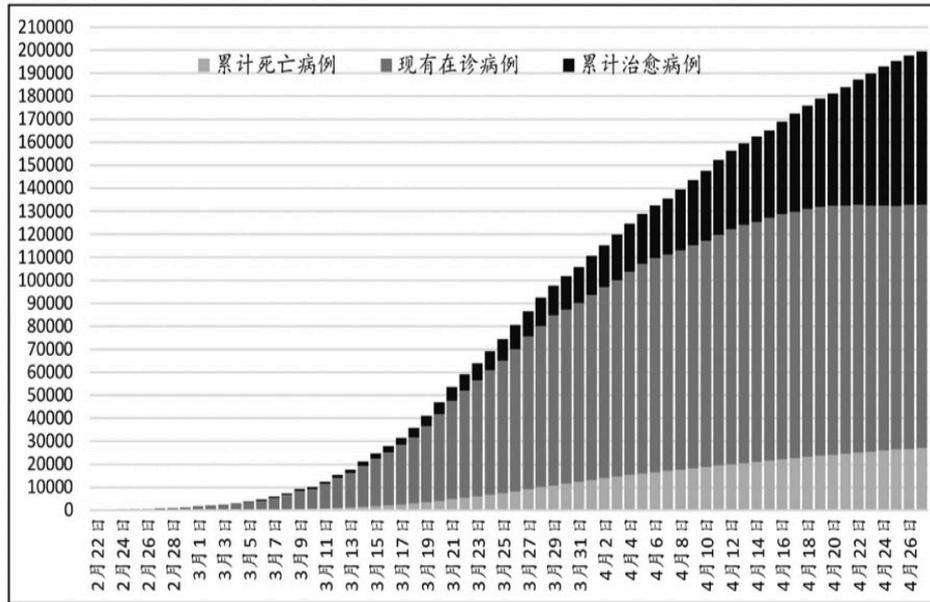
存量流量圖繪製完畢後使用 Vensim PLE 軟體進行系統模型的模擬。本研究認為感染者人數是判定疫情嚴重程度的重要指標。模擬情境分為一般型病毒和變異型病毒，後者的傳染性更強；模擬政策分為：不採取任何措施、使用健康碼和注射疫苗。

4.1 模型品質檢定

為檢定模型品質，首先本研究需要了解疫情在現實生活中是如何擴散的。下圖 9 義大利疫情發展初期的新冠確證人數曲線圖（王雁等人，2020）。從義大利疫情發展走勢可以得出，在傳染病初期確診者人數快速上升，隨後新增速率放緩，再達到最高值後確診人數逐漸下降。

無健康碼狀態下，如果有外來感染者進入浙江省，感染者數量曲線如圖 10 所示。感染者人數首先在本地快速傳播，在第 60 天左右感染人數達到最多，隨後經過治療感染人數逐漸下降；在死亡人數方面，死亡人數首先上升後在第 150 天左右保持不變。無論是感染人數還是死亡人數都與義大利的疫情傳播圖相似，因此認為本模型具有一定的行為效度（Behavior Validity）。從圖 10 中還可以發現的一點是，相較於感染者達到的最

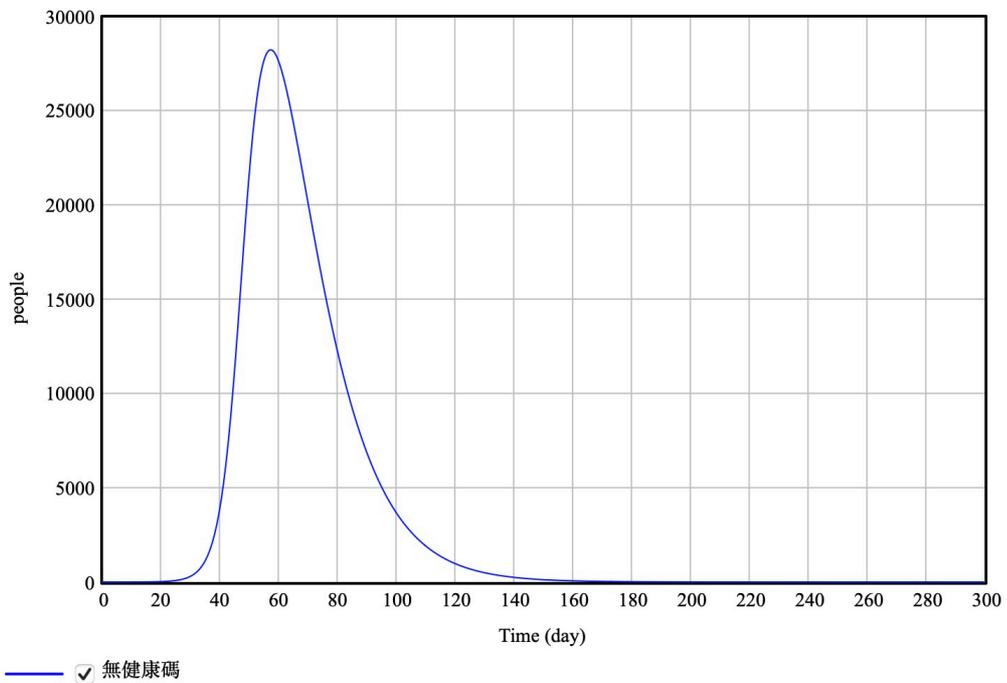
高峰的時間，治療感染者的時間是比較長的。為分析該曲線走勢原因，圖 11 代表醫院壓力曲線。對比圖 10 和圖 11 可以發現，醫院壓力變化曲線與感染者人數變化曲線基本類似，因此本研究認為由於後期醫院壓力較大導致的醫療照護品質下降是治癒時間增加，感染者下降速度放緩的主要原因。



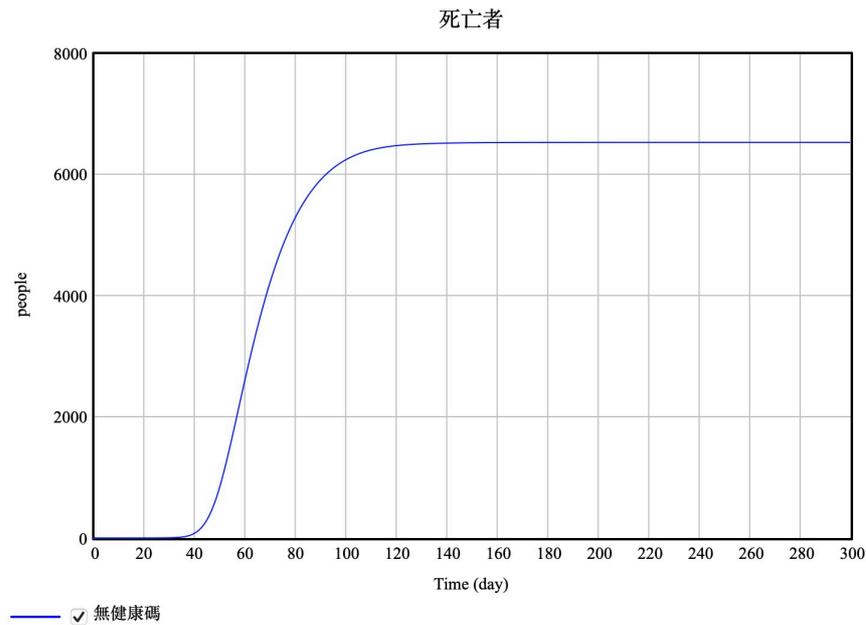
《圖 9》義大利累計確認人數統計圖

來源：王雁等

感染者



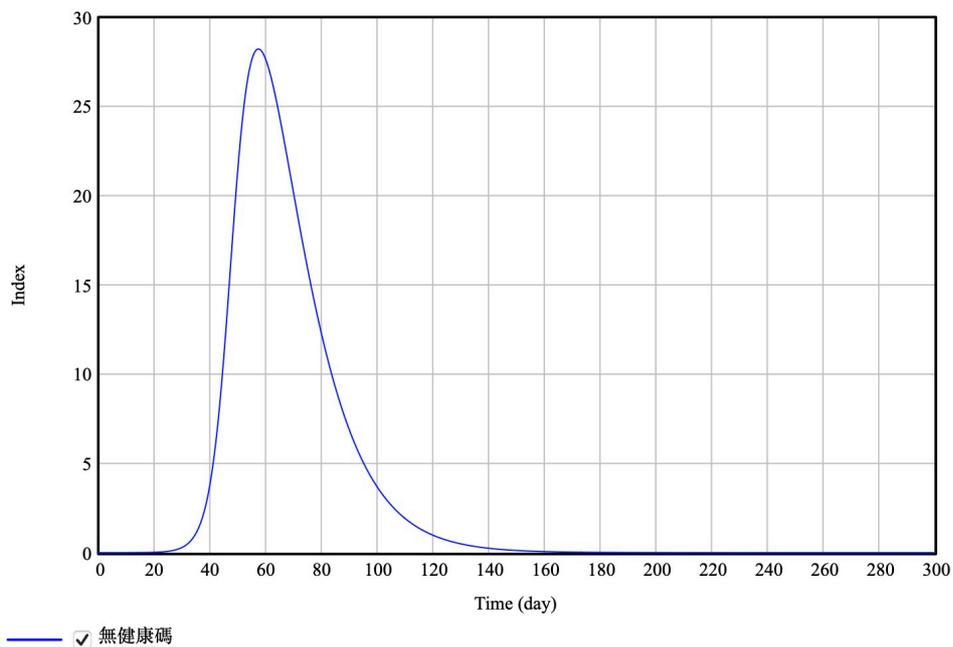
☑ 無健康碼



《圖 10》無健康碼狀態下感染者人數和死亡人數

來源：本研究自製

醫院壓力

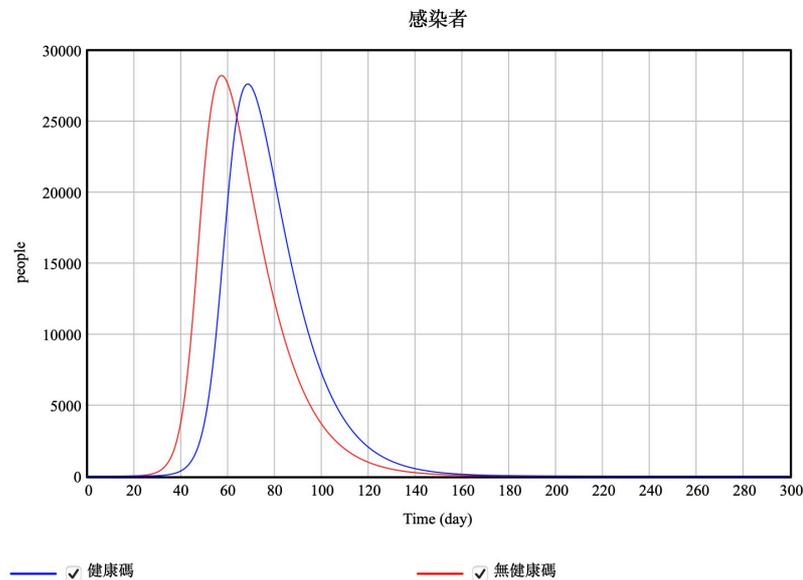


《圖 11》無健康碼狀態下醫院壓力

來源：本研究自製

當健康碼開始使用後，情況會如何變化呢？健康碼使用前後感染人數對比圖如圖 12 所示，藍色線為使用健康碼之感染人數曲線，紅色為未使用健康碼。從圖中可以明顯觀察到的是，第一，紅色與藍色曲線形狀大致相似，且上升期時間小於下降期時間，這就意味著醫院壓力仍是影響應治療主要原因。第二，使用健康碼的最大值

(27621 人) 略低於紅色 (28216 人)，證明健康碼的使用能夠有效減少感染者數量。除此以外，相較於無健康碼，健康碼的居家隔離措施推遲了感染人數最高點來臨的時間，為醫院爭取了一定的喘息時間。

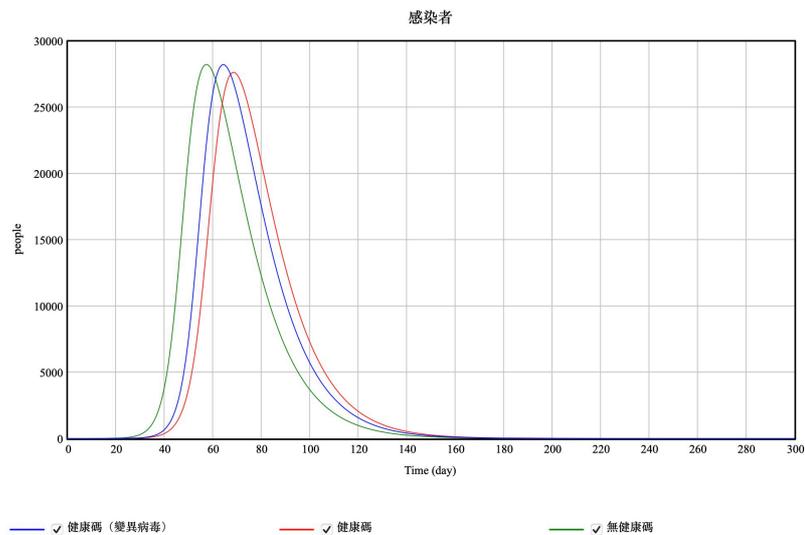


《圖 12》使用健康碼與無健康碼感染者者人數對比圖

來源：本研究自製

4.2 情境與政策模擬

系統仿真的目的之一是通過模擬未來可能發生的情景和各項政策在情境中的運用來選擇最優解。考慮到新冠病毒容易變異的特點，本節將考慮變異新冠病毒（增加傳播率）的情景下，使用延長健康碼時間和開展疫苗注射的兩項政策之模擬。下圖 13 是變異病毒和普通病毒的感染人數對比，此時傳播係數從 0.3 升高至 0.35。從圖中可看出，病毒傳染力變強，感染人數甚至上升至接近無健康碼的情況。不僅如此，健康碼的延遲作用也被削弱：藍線與綠線的間隔小於紅線與綠線的間隔，感染人數峰值來臨得越快，為醫療系統爭取到的時間就會越少。



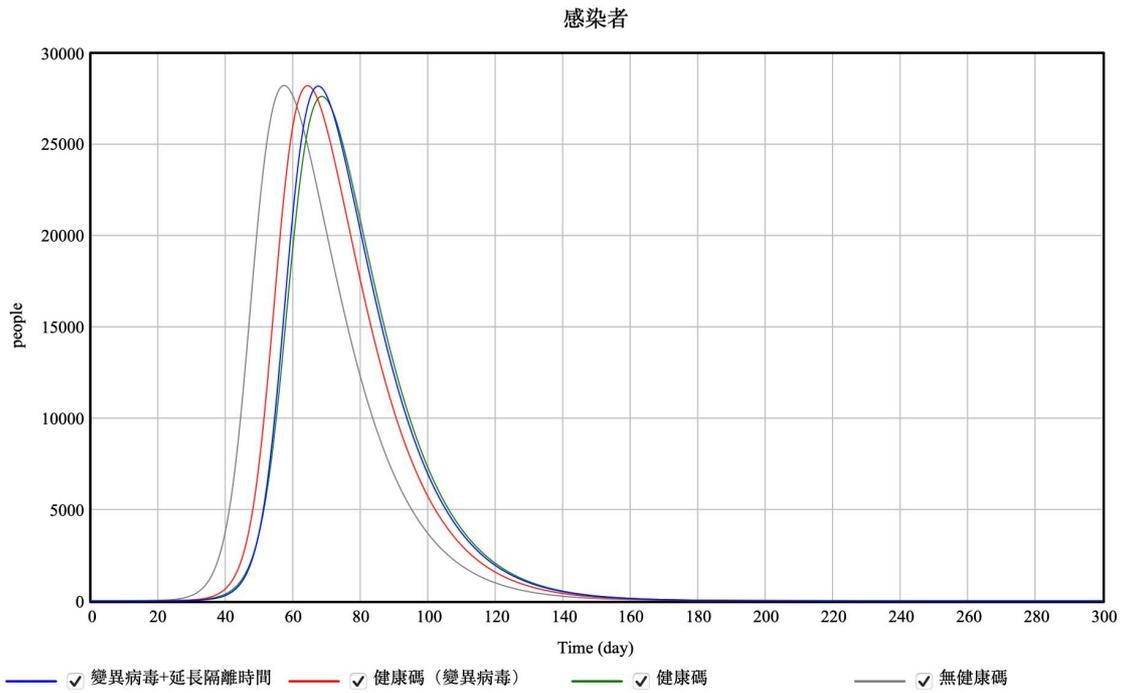
《圖 13》變異病毒下感染者人數

來源：本研究自製

為模擬延長隔離時間是否能夠緩解疫情進展，本研究將健康碼黃碼的居家隔離時間由 7 天延長為 10 天，模擬結果如下圖 14 所示，圖中四條線所代表情景和政策如圖例所示。圖中普通病毒+無健康碼的曲線仍然是最早到達峰值（57 天），剩下三條曲線的峰值來臨順序是：變異病毒+未延長健康碼（64 天），變異病毒+延長隔離（67 天）和普通病毒+未延長健康碼（68 天）。由此可以看出，延長隔離時間在變異病毒的情況下可以延遲峰值的來臨，但是發揮的作用不如健康碼在面對普通病毒時有效。

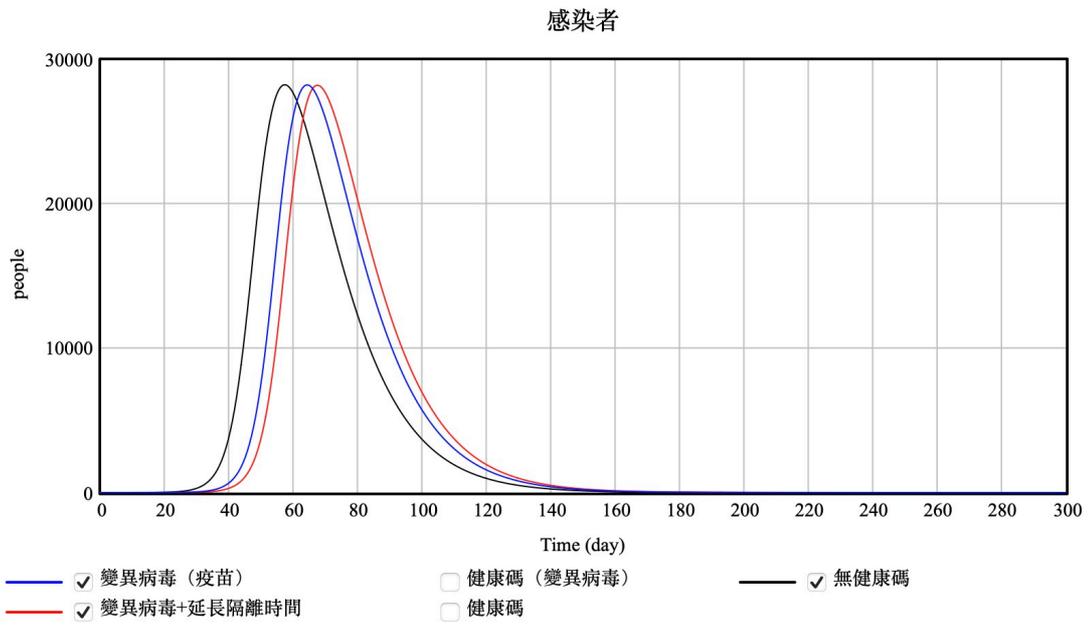
最後本節想要探討疫苗對於疫情的控制效果，面對的仍然是變異病毒的情況。2021 年美國食品藥品監督管理局批准 mRNA 疫苗作為預防有症狀的感染者的手段（CDC，2021）⁴，也就是說，疫苗的作用是幫助減輕病毒感染後的症狀，從而間接降低了死亡率，而不是直接阻止病毒的傳播。因此在本次模擬中，病毒的變異被體現在傳播率提高，而本研究選擇不延長隔離時間並將疫苗作用體現在減少真實死亡率也是呼應上述 CDC 對於疫苗作用的敘述。下圖 15 為模擬感染人數曲線圖，從圖 15 可以看出，注射疫苗後感染人數並無顯著降低，符合 CDC 對於疫苗作用的描述。同時，圖 16 為死亡人數的曲線圖，注射疫苗後的死亡人數遠遠低於延長隔離時間所導致的死亡，同樣地，注射疫苗後，醫院的壓力也大幅降低；而醫院壓力的減輕和治療速度是正向關係，醫院壓力的降低也提高了醫院治療非重症患者。總而言之，注射疫苗對於總體疫情控制中的減少重症和減輕醫院壓力方面發揮積極作用。

⁴ <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/fully-vaccinated-people.html>



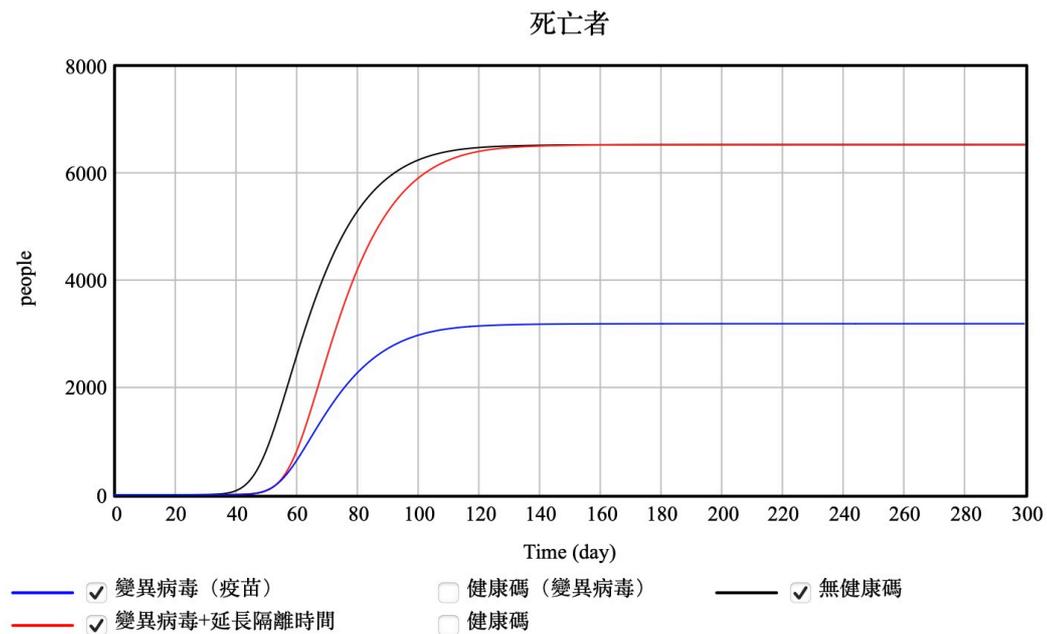
《圖 14》延長隔離時間後感染人數對比圖

來源：本研究自製



《圖 15》注射疫苗後感染人數對比圖

來源：本研究自製



《圖 16》注射疫苗後死亡人數對比圖

來源：本研究自製

4.3 模擬結果討論

在上節內容中，本文首先測試模型，圖 9 與圖 10 的相似性說明了本模型有能力反應真實情況，支持了後續模擬的有效性和得出醫院壓力和感染人數變化趨勢之間存在相關性。圖 12 說明了健康碼在面對普通病毒時可以有效降度感染者人數，證明健康碼的使用有助於政府控制疫情擴散和延後感染人數最大值的來臨時間，為醫護工作者爭取更多機會，準備應對接下來的疫情衝擊。但是當面對變異病毒時，健康碼的兩項功能：減少感染人數和延遲高峰來臨時間均被減弱。如果以感染多寡和延遲高峰時間為判斷政策效力之依據，政策效果如下圖 14 所示；

《表二》政策效果排序表

情景 指標	普通病毒	變異病毒
感染人數	無措施 > 健康碼	無措施 > 疫苗 = 健康碼 > 健康碼 (延長)
延遲效果		健康碼 (延長) > 疫苗 = 健康碼

總體而言，毫無疑問的是，在普通病毒傳播的情況下，健康碼是可以有效減少感染

人數。根據因果環路圖顯示，感染人數的下降主要是因為健康碼減少了從省外輸入的感染者的數量，其次也減少了人群接觸次數，二者共同作用使得相較於無措施的情況下，感染者數量減少；延遲作用也是政府實施健康碼的依據，使用健康碼可以讓感染者最高峰往後推遲 10 天左右，減少了發生醫療擠兌的可能性。

此外，本研究發現在變異病毒模擬中，注射疫苗後的感染人數反而高於升級版健康碼。本研究認為：第一個原因，也是在上文反覆提及的，注射疫苗並不能阻止病毒的傳播，而是減少感染病毒後的症狀嚴重性和死亡率；其次，病毒變異較快，目前醫學技術並不能即時發現變異病毒的傳播，疫苗的研製到真正開始使用需要時間，且疫苗只能針對現有變異病毒進行研發，而不能「未卜先知」，疫苗對未來新變種的抵抗作用值得商榷；第三，在研究瑞典國民在疫情中為什麼不戴口罩的原因時，Johansson 等人（2021）發現民眾對於政府政策的盲目信任是主要原因；結合本研究內容，而當民眾接種疫苗後，錯誤認為自己不會再被感染，外出的次數增加，這樣做的後果是一方面增加了人群密集的風險；另一方面，民眾可能減少使用其他防疫措施，例如戴口罩，勤洗手等；最後，本研究未考慮無症狀感染者的存在，在疫苗可以減輕症狀的情況下，無症狀感染者數量增加，而通常的情況是無症狀患者通常是在被其傳染的、有症狀患者的追蹤範圍內被發現，此時距離第一次傳播有一段時間，病毒或開始社區傳播。

下圖 17 為浙江省 2020 年 1 月 24 日至 2 月 19 日的疫情走勢圖。模擬曲線與現實走勢曲線大致相同，但在實際走勢圖中還存在著波動，意味著當確診人數開始下降時，疫情存在反覆的情況。對此，本研究認為由於本模型只設計了一次的外來人口輸入，而現實情況是浙江省解封後就允許跨省流動，即本研究未考慮人口持續改變的情況，這也是 SEIR 模型的缺點之一；此外，現實曲線圖中新增人數的下降速度較快，是由於浙江省在使用健康碼的同時也要求密切接觸的本地人員進行居家隔離，干預程度較強的措施；但在本研究範圍內並未將居家隔離措施納入考量。



《圖 17》浙江省疫情走勢圖

來源：浙江新聞（2020）⁵

5. 研究限制、未來研究方向及政策建議

健康碼目前已經被廣泛運用，甚至被視為流行病學調查的第一步；以往的流行病學調查需要醫學專家詢問病人過往去過的地點，耗費時間且誤差較大，導致調查與傳播之間有著較長的時間差，病毒在調查時已經傳播開來；當使用健康碼蒐集資料，流行病學專家可以快速釐清確診者的「足跡」，同時對去過同一場所的民眾進行隔離和檢測，減少病毒傳播的風險。

健康碼對於流行病學調查的幫助無可置否，但對於健康碼是否能夠有效降低感染者數量的問題，現有文獻對此研究不足。本研究根據文獻和次級資料查詢建立新冠病毒傳播的系統動力學模型，主要研究焦點在於健康碼的使用效果。本研究分別在兩種情境下，執行了兩種不同政策——使用健康碼和注射疫苗，以感染者人數和延遲頂峰時間為指標。研究證明：在面對一般病毒時，使用健康碼就可以有效降低感染者人數，但是當變異病毒開始傳播時，健康碼的隔離時間也需要相應延長。

5.1 研究限制與未來研究方向

在本研究範圍內，雖然考慮了「是否注射疫苗」這一因素；但隨著疫苗的逐漸鋪開，病毒也在不斷發生變異，如何將疫苗有效率納入系統中是未來的研究方向之一；還需考

⁵ <https://zj.zjol.com.cn/news/1393747.html>

慮的是，並不是所有民眾都願意或能夠注射疫苗，即疫苗接種率。從模擬中發現，即使採取疫苗和健康碼組合政策，仍然無法阻止病毒傳播；現實情況如部分歐洲國家。對此，本研究認為當有確診病例被發現時，隔離應還是成為各國所考慮的最主要防疫政策，那麼如何將隔離措施與系統模擬結合也是值得關注的。此外，從經濟方面考慮，只要從省外進入的人員都需要進行隔離，對企業造成影響也是值得研究的方向之一。

雖然本研究證明使用健康碼對於幫助控制新冠疫情有明顯效果，這並不代表市民可以放棄其他的防護措施，如何將日常防護措施加入系統中也是值得研究的問題之一。此外，對於醫療系統的管理也是將來的研究重點之一，疫情爆發初期各地醫院都出現了醫療擠兌的情況，本研究認為醫療系統的部分可以單獨作為一個子系統進行分析，分析如何管理和分配醫療資源對減緩疫情擴散、加速病人出院速度及降低死亡率有積極作用。

5.2 政策建議

雖然健康碼的對於普通病毒的效果顯著，但在面對變異病毒時，民眾對疫苗的錯誤認知導致個人防護的疏忽，從而使得感染人數多於升級版健康碼。由此，儘管在有疫苗和健康碼的情況下，注意個人日常防護從而避免盲目信任也是控制疫情的關鍵因素，尤其是在出入醫院等高風險場所時，如何提高民眾防範意識是未來政策需要考慮的要點之一。

預防本地病毒傳染外，控制境外輸入也是防疫的關鍵。中國大陸目前出現的病例大多屬於外來輸入型，仍需加強邊境檢疫：例如對境外旅客嚴格執行隔離措施；由於病毒在低溫下存活時間長，因此對於進口貿易商品，尤其是通過冷鏈運輸的食品進行病毒檢測也有助於控制新冠病毒之輸入。

無論是從本研究結果還是傳染病專家之建議，注射疫苗可有效降低死亡率和重症率，緩解醫療資源。本研究撰寫之時，大陸已經廣泛開始疫苗施打工作，然而臺灣面臨疫苗不足，施打意願不高之情況，此為導致本土病例傳播之主要原因。本研究建議從疫苗方面著手，首先政府需要加大對科研團隊的資金投入，重視科研人員的研究成果，促進產學合作，加快疫苗的研發和生產速度；優化疫苗分配順序，優先將疫苗分配給老人和邊防及公共醫療人員；與鄰近國家合作，必要時捐贈一部分疫苗以保障邊境安全。

6. 參考文獻

- 方興東，嚴峰(2020)，健康碼與正在浮現中的智能傳播新格局，未來傳播，27(05)，2-13+120。
- 王拉娣(2004)，一類含有非線性傳染率的傳染病模型的全局穩定性，應用數學與計算數學學報，(01)，52-56。
- 王俊芬，陳振煜，劉思德(2020)，基於倉室模型的傳染病動力學建模方法概述及應用，現代消化及介入診療(3)。
- 王思遠，譚瀚霖，李東傑(2020)，基於改進傳染病動力學易感-暴露-感染-恢復(seir)模型預測新型冠狀病毒肺炎疫情，第二軍醫大學學報 2020 年 41 卷 6 期，637-641 頁。
- 史晨，馬亮(2020)，協同治理、技術創新與智慧防疫——基於健康碼的案例研究，黨政研究(04)，107-116。
- 宋明順，黃樂富，王鑒棋，餘曉(2020)，杭州健康碼地方標準助力疫情防控(英文)，中國標準化(英文)，(04)，48-51。doi:CNKI:SUN:CHSZ.0.2020-04-024。
- 李昊，段德光，陶學強，陳恩，高樹田(2020)，傳染病動力學模型及其在新型冠狀病毒肺炎疫情仿真預測中的應用綜述，醫療衛生裝備，(3)，3。
- 李瓊芬，黃甜，王榮華，何繼波，楊軍(2013)，傳染病疫情預測預警模型研究進展，中國公共衛生，29(11)，1695-1697。
- 徐致靖(2015)，複雜社會系統中的傳染病動力學建模與案例研究，中國人民解放軍軍事醫學科學院生物工程研究所博士論文。
- 張昊，佐翼(2020)，基於二維碼技術在新型肺炎疫情防控期間的應用與實踐研究。第七屆 BIM 技術國際交流會——智能建造與建築工業化創新發展論文集(pp.557-561)，《土木工程資訊技術》編輯部。
- 曹盛力，馮沛華，時朋朋(2020)，修正 SEIR 傳染病動力學模型應用於湖北省 2019 冠狀病毒病(COVID-19)疫情預測和評估，浙江大學學報(醫學版)，49(02):178-18
- 楊守德，陳偉(2020)，突發流行病短期公共應對方案防控效果及經濟抑制影響研究——一個基於新冠肺炎傳染特徵的系統動力學仿真分析，軟科學，(11)，130-136
- 楊秦華，沈曉白(2020)，從封鎖到復工——中國健康碼 APP 或引發英國思考，世界科學，2020(05)，47。
- 劉紅亮，賈洪文，王雁，劉彬，姚潔，閔宣辰(2020)，新型冠狀病毒肺炎初期傳播規模的系統動力學模型估計方法及評價，電子科技大學學報社科版，22(3)，36-45
- 劉雅姝，吳琪俊，陸一涵，趙玉虹(2020)，新型冠狀病毒肺炎(COVID-19)傳染病預測模型

⁵ <https://zj.zjol.com.cn/news/1393747.html>

- 分析，公共衛生與預防醫學，31(03)，10-13。
- 劉賀，費春楠(2019)，系統動力學在疾病控制和疾病管理領域的應用概述，預防醫學情報雜誌，35（08），914-918+924。
- 劉薇(2014)，具有潛伏期和隔離項的傳染病模型及預防接種策略，渤海大學基礎數學所碩士論文。
- 韓曉娜(2006)，SARS 流行病學傳播動力模型研究，中國人民解放軍軍事醫學科學院流行病與衛生統計學所碩士論文。
- 吳家兵，葉臨湘，尤爾科(2006)，時間序列模型在傳染病發病率預測中的應用，中國衛生統計，(03)，276。
- Biswas, M. H. A., Paiva, L. T., & De Pinho, M. D. R. (2014). A SEIR model for control of infectious diseases with constraints. *Mathematical Biosciences & Engineering*, 11(4), 761
- Casares, Miguel, & Khan, H.U. (2020). A Dynamic Model of COVID-19: Contagion and Implications of Isolation Enforcement. *Carleton Economics Working Papers (CEWP)*. Carleton University.
- Chen, T. M. , Rui, J. , Wang, Q. P. , Zhao, Z. Y. , Cui, J. A. , & Yin, L. . (2020). A mathematical model for simulating the phase-based transmissibility of a novel coronavirus. *Infectious Diseases of Poverty*, 9.
- Johansson, B., Sohlberg, J., Esaiasson, P., & Ghersetti, M. (2021). Why Swedes Don't Wear Face Masks During the Pandemic—A Consequence of Blindly Trusting the Government. *Journal of International Crisis and Risk Communication Research*, 4(2), 7.
- Leontitsis, A., Senok, A., Alsheikh-Ali, A., Al Nasser, Y., Loney, T., & Alshamsi, A. (2021). Seahir: A specialized compartmental model for covid-19. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2667
- Read, J. M., Bridgen, J. R., Cummings, D. A., Ho, A., & Jewell, C. P. (2020). Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions. [MedRxiv](#).
- Shen, M., Peng, Z., Xiao, Y., & Zhang, L. (2020). Modelling the epidemic trend of the 2019 novel coronavirus outbreak in China. [BioRxiv](#).
- Tang, B., Bragazzi, N. L., Li, Q., Tang, S., Xiao, Y., & Wu, J. (2020). An updated estimation of the risk of transmission of the novel coronavirus (2019-nCoV). *Infectious disease modelling*, 5, 248-255.
- Tang, Z., Li, X., & Li, H. (2020). Prediction of new coronavirus

infection based on a modified SEIR model. medRxiv

Wu, J. T., Leung, K., & Leung, G. M. (2020). Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. The Lancet, 395(10225), 689-697.

附錄一

(01) FINAL TIME = 300

Units: day

The final time for the simulation.

(02) INITIAL TIME = 0

Units: day

The initial time for the simulation.

(03) SAVEPER =

TIME STEP

Units: day [0,?]

The frequency with which output is stored.

(04) TIME STEP = 0.125

Units: day [0,?]

The time step for the simulation.

(05) 健康碼使用=

0

Units: 天

(06) 傳染=

感染者*實際傳播係數

Units: people/day

(07) 初始人口=

100000

Units: people [1,200000]

(08) 初始傳播係數=

0.35

Units: **undefined**

(09) 初始致死率=

0.015

Units: **undefined**

(10) 外地感染者輸入=

DELAY FIXED((外地感染者輸入數量*PULSE(開放時長,TIME STEP)/TIME
STEP

), 健康碼使用, 0)

Units: people/day

(11) 外地感染者輸入數量=

3

Units: people [0,100]

(12) 實際傳播係數=

易感者比例*相關接觸率*初始傳播係數

Units: fraction/day

(13) 平均病程=

10

Units: **undefined**

(14) 康復=

感染者/平均病程*(1-致死率)

Units: people/day

(15) 康復者= INTEG (

康復,

0)

Units: people

(16) 感染者 = INTEG (發病 + 外地感染者輸入 - 死亡 - 康復,

0)

Units: people

(17) "接觸者(潛伏期)" = INTEG (傳染 - 發病,

0)

Units: people

(18) 易感者 = INTEG (- 傳染,

初始人口)

Units: people

(19) 易感者比例 = 易感者 / 初始人口

Units: fraction

(20) 死亡 = 感染者 * 致死率 / 平均病程

Units: people/day

(21) 死亡者 = INTEG (死亡,

0)

Units: people

(22) 潛伏期=

14

Units: day [0,20,1]

(23) 疫苗=

0.5

Units: **undefined**

(24) 發病=

"接觸者(潛伏期)"/潛伏期

Units: people/day

(25) 相關接觸率=

$5+1/(健康碼使用+1)$

Units: **undefined**

(26) 致死率=

$(1/(初始致死率 + 初始致死率 / (1+醫院壓力^醫院能力敏感度))) / 1000 * 疫苗$

Units: fraction

(27) 醫院壓力=

重病患者數量/醫院容量

Units: Index

(28) 醫院容量=

100

Units: people [0,1000]

(29) 醫院能力敏感度=

2

Units: dmnl [1,5]

(30) 重病患者數量=
感染者*需住院比例

Units: people

(31) 開放時長=
10

Units: day [1,100]

(32) 需住院比例=
0.1*疫苗

Units: fraction [0,1,0.01]

Analysis of the Effectiveness of Health Code in Covid-19 in Zhejiang Province from the Perspective of System Dynamics

ZHANG, Jie⁶

Abstract

In response to the new epidemic and to address the difficulties in the mobility of investigators, the government of Zhejiang Province has successfully developed "health codes" to track population movement and the spread of the virus, relying on current big data information technology. To fill the gap, this study examines the effectiveness of health codes in the control of epidemics in Zhejiang Province using the SEIR model to simulate two different policies: health codes and vaccines, in two different scenarios: common and mutated viruses. After comparing the actual data and scenarios, the study found that the health code was effective in blocking the spread of the virus for both the common virus and the mutant virus, but in the case of the more infectious mutant virus, it was necessary to extend the isolation time of the health code to cope with it; and the number of infections was higher with the vaccine than with the upgraded health code. The study concluded that the limited vaccine technology could not predict the direction of the next wave of virus mutation, and that the misconception of the vaccine and the neglect of other protective measures increased the risk of infection during population exposure, resulting in an increase in the number of infections after vaccination. The study also has shortcomings, such as not taking into account home isolation policies and changing population sizes. It is believed that if these weaknesses are addressed in future studies, the modelling of the epidemic will be more accurate and informative.

Keywords: System Dynamics Analysis, SEIR Model, Policy Simulation, Covid-19, Health Code

⁶ National Chengchi University, Department of Public Administration, Master; Contact: 109256041@nccu.edu.tw