

俄烏戰爭中的地雷戰—系統模擬觀點

Land Mine Warfare in the Russia-Ukraine War-Systematic Simulation Perspective

陳甫岳 (Fu-Yueh Chen)

國防大學管理學院中校教官

邱詠涵 (Yung-Han Chiu)

國防大學陸軍指參學院少校學員

楊永光 (Yung-Kuang Yang)

國防大學陸軍指參學院少校學員

摘要

俄烏戰爭中，俄軍著名的「蘇洛維金防線」成為烏軍大反攻最大的阻礙。反攻進行了5個月之久，防線卻依舊紋風不動，使戰爭陷入了僵局。異常堅固的防線是主因之一，而廣袤的雷區又是防線中對戰車損害最大的區域。本文嘗試運用系統模擬方法建構一模型，將佈雷及排雷等過程視為一系列的伯努利試驗，搭配蒙地卡羅法，以量化方式探討烏軍若要突破防線，可能會承擔多少戰車損失。

模型考量雷區縱深、地雷密度、俄軍攻擊時隔及排雷方式等變數，分別在不同水準下，以400種實驗組合，各執行30次試行，共計產生12,000個樣本，並以多元迴歸模型配適出迴歸方程式，其調整後判定係數可達97.6%，具有相當高的配適度。進而發現，俄軍拓寬雷場縱深確為明智之舉，而烏軍缺乏有效的排雷手段則是其致命傷，且以烏軍的戰車庫存而言，要突破雷場實有不足之處。

關鍵詞：俄烏戰爭、地雷、系統模擬、蒙地卡羅法、多元迴歸模型

Abstract

During the Russia-Ukraine War, the Russian army's famous "Surovikin Line of Defense" became the biggest obstacle to the Ukrainian army's counterattack. The counterattack lasted for five months, but the defense line remained motionless, bringing the war to a stalemate. The solid defense line was the main reason for the deadlock in the war, and the vast minefield was the area of the defense line that caused the most significant damage to tanks. This article attempts to use system simulation methods to construct a model, and attempts to quantitatively explore how much losses the Ukrainian army will bear if it breaks through the defense line.

The model considers four variables, including minefield depth, landmine density, Russian attack time interval, and demining method; and perform 30 trials of 400 experimental

combinations at different levels, generating a total of 12,000 samples. The data were analyzed using multiple regression models. The regression equation is fit, and its adjusted R^2 can reach 97.6%, which has a very high goodness of fit. It was further discovered that it was indeed a wise move for the Russian army to widen the depth of the minefield, but the Ukrainian army's lack of effective demining methods was its fatal flaw, and the Ukrainian army's inventory of tanks was indeed insufficient to break through the minefield.

Keywords: Russian-Ukraine war, Landmines, System Simulation, Monte Carlo method, Multiple Regression Model

壹、前言

「俄烏戰爭」迄今已持續逾2年，這場由俄羅斯自認為正義之師的「特別軍事行動」在2022年2月24日展開序曲，俄軍從戰事初始即規劃兵分三路奪取基輔(Kyiv)、哈爾科夫(Kharkiv)及扎波羅熱(Zaporizhzhia)，直至兵臨烏克蘭首府基輔城下，坦克大軍從四面八方進逼基輔市郊卻無法長驅直入，直到從哈爾科夫撤退，但佔據了盧甘斯克州(Luhansk)、頓涅茨克州(Donetsk)、扎波羅熱州及赫爾松州(Kherson)的大部分地區，¹於是在佔領區建起了稱為「蘇洛維金防線」(the Surovikin Line)的防禦工事（如圖1），戰事遂僵持至今。期間，縱使俄、烏雙方互有攻防，防線大抵上紋風不動，形成僵持態勢。

為了突破俄軍防線，烏克蘭於2023年6月4日開始了歷時5個月的「夏季大反攻」

，然烏軍的反攻成效卻不如預期，僅僅推進了17公里！甚而，俄、烏兩軍為了爭奪巴赫穆特——一個面積僅41.6平方公里的城鎮，戰鬥歷時更是長達10個月之久。英國《經濟學人》於2023年11月1日刊出了對烏克蘭武裝部隊總司令扎盧日內(Valerii Zaluzhnyi)的專訪，他認為戰爭已陷入了僵局，需要更進步的科技方能有所突破。²

異常堅固的防線是形成戰爭僵局的主要原因，³俄羅斯早在烏克蘭展開大反攻之前已有所準備，在長約1,000餘公里的戰線上全面佈防了阻絕工事，橫亙在烏軍面前的是分層排列的鐵絲網、反坦克壕、龍牙與戰壕系統，⁴層與層之間更是佈滿了地雷（典型的分層配置如圖2），部隊一旦誤觸地雷，除了車輛損毀及人員傷亡外，倖存的車輛及人員也將進退維谷，最終亦難逃被狙殺的厄運。⁵

顯而易見，地雷是阻礙烏軍推進的主因，據外媒描述，部分雷區的地雷密度可高

1 曾祥穎，〈俄烏戰爭對我建軍的啟示〉，《陸軍學術雙月刊》，第59卷第592期，2023年12月，頁36-37。

2 Valery Zaluzhnyi, "Ukraine's Commander-in-chief on the Breakthrough He Needs to Beat Russia," The Economist, Oct, 27, 2023, <<https://www.economist.com/europe/2023/11/01/ukraines-commander-in-chief-on-the-breakthrough-he-needs-to-beat-russia>>（檢索日期：2023年11月27日）

3 安德烈，〈烏克蘭反攻為何失敗？〉，《法國國際廣播電台》，2023年10月27日，<<https://www.rfi.fr/tw/%E4%B8%AD%E5%9C%8B/20231026-%E7%83%8F%E5%85%8B%E8%98%AD%E5%8F%8D%E6%94%BB%E7%82%BA%E4%BD%95%E5%A4%B1%E6%95%97>>（檢索日期：2023年11月27日）

4 龍牙是金字塔形的混凝土塊，用以阻擋坦克與其他軍用車輛的路徑。



圖1 俄羅斯防禦工事分布圖



圖2 典型的俄羅斯分層防禦工事

資料來源：Daniele Palumbo and Erwan Rivault, "Ukraine war: Satellite images reveal Russian defences before major assault," BBC news, May, 22, 2023, <<https://www.bbc.com/news/world-europe-65615184>>（檢索日期：2023年11月27日）

達每平方公尺5枚之多；在反攻伊始，烏軍起初嘗試使用西方提供的現代化裝甲車衝鋒，但落得裝甲車在雷區被燒燬的下場，步兵在撤離過程中也容易誤觸地雷而身受重傷。⁶俄羅斯總統普丁甚至稱：「如我們所料，美製戰車和豹式坦克正在烏克蘭『美妙地燃

燒』。」⁷烏軍不得不在夜間以單兵徒步清除地雷，有時則是在砲火之下進行，也惟有在雷區清理出足夠寬闊的道路，並同時壓制住俄軍的砲兵火力下，烏軍才能大舉推進。⁸

既然反攻之路如此艱難，戰損也如此巨大，為何烏克蘭仍堅持反攻長達5個月

5 Daniele Palumbo and Erwan Rivault, "Ukraine War: Satellite Images Reveal Russian Defences before Major Assault," BBC news, May, 22, 2023, <<https://www.bbc.com/news/world-europe-65615184>>（檢索日期：2023年11月27日）

6 加德納，〈烏克蘭對俄軍的反攻是否正在取得進展〉，《BBC中文網》，2023年9月18日，<<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-66841236>>（檢索日期：2023年11月27日）

7 新浪軍事，〈普京稱美制戰車坦克正在烏美妙燃燒〉，《微博》，<<https://m.weibo.cn/status/N5fKAgyEZ?jumpfrom=weibocom>>（檢索日期：2023年11月29日）

8 同註6。

之久呢？烏克蘭總統澤倫斯基(Volodymyr Zelenskyy)的說法或已道盡了其中原委，他在2022年9月回應路透社記者說道：「我認為這是非常重要的第一步，已經影響或即將影響其他國家做出的決定。」⁹言下之意就是，如果烏克蘭沒有發動反攻，外國對烏克蘭的軍援就會減少。邏輯再也清晰不過：堅持反攻才有外援，有了外援才能阻擋俄軍，才能收復失土！烏克蘭確實因此獲得了許多友好國家的軍援，德國基爾世界經濟研究所(The Kiel Institute for the World Economy)統計了至反攻前（自2022年4月至2023年5月）外國宣布援助烏克蘭的武器項量，計有多管火箭系統89套、榴彈砲（車）518座及各型戰車757輛，¹⁰然而從歷史的後見之明來看，反攻的收效卻是甚微。

有鑒於此，本文試圖在歷史的後見之明下，替烏克蘭「評估」突破俄軍防線的可行性，研究目的主要如下：

一、探討烏軍若試圖在「蘇洛維金防線」突破一個缺口，可能運用的方式為何，並

為此建立一個簡化的模擬模型。

二、利用Microsoft Excel VBA程式建構上述模型，在給定不同參數水準下，以蒙地卡羅法進行模擬，以配適出線性模型，用以估計烏軍突破俄軍防線所需的兵力的大小。

貳、淺談俄烏戰爭中的地雷種類及排雷方式

一、地雷種類

地雷可大致區分為人員殺傷雷(anti-personnel mines，簡稱AP mines)以及反坦克／載具地雷(anti-tank mines，簡稱AT mines)亦稱為「戰防雷」。¹¹自俄烏戰爭爆發以來，俄、烏雙方均廣泛地使用地雷，烏克蘭已然成為世界上最大的雷區。¹²在地雷種類上，俄烏雙方皆使用反坦克地雷，而俄羅斯也會使用人員殺傷雷，已知在這場戰爭至少使用了6種反坦克地雷及7種人員殺傷地雷。¹³

在烏克蘭的反攻行動拉開序幕前，

9 張茗喧，〈澤倫斯基：不反攻俄軍 外國恐減少軍援〉，《中央通訊社》，2022年9月17日，〈<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202209170080.aspx>〉（檢索日期：2023年11月29日）

10 基爾世界經濟研究所僅能系統性地統計多管火箭、榴彈砲及戰車數量，其餘如防空系統、無人機、飛彈及火炮等，則未在該統計範圍之內。參見：Pietro Bompreszi, Katelyn Bushnell, André Frank, Ivan Kharitonov, Christopher Schade, Leon Weiser and Christoph Trebesch, "Ukraine Support Tracker," The Kiel Institute for the World Economy, Sep. 7, 2023, 〈<https://www.ifw-kiel.de/topics/war-against-ukraine/ukraine-support-tracker/>〉（檢索日期：2023年11月29日）

11 游凱翔，〈臺灣會變地雷島？火山布雷系統一篇看懂〉，《中央通訊社》，2023年9月2日更新，〈<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202301195006.aspx>〉（檢索日期：2023年11月27日）

12 Daniel Bpffey, "Ukraine Desperate for Help Clearing Mines, Says Defence Minister," The Guardian, Aug, 23, 2023, 〈<https://www.theguardian.com/world/2023/aug/13/ukraine-desperate-for-help-clearing-mines-says-defence-minister>〉（檢索日期：2023年11月27日）

13 Andrew Stroehlein, "Background Briefing on Landmine Use in Ukraine," Human Rights Watch, Jun, 15, 2022, 〈<https://www.hrw.org/news/2022/06/15/background-briefing-landmine-use-ukraine>〉（檢索日期：2023年11月27日）

俄羅斯前空天軍總司令蘇洛維金(Sergey Vladimirovich Surovikin)對其防禦理論進行了重要調整，將其防禦雷場的縱深擴大了4倍，縱深從120公尺增加至550公尺，同時增加雷場內的地雷密度，因而大大增加了烏軍推進的難度，對烏軍的反攻產生了遲滯的影響。

俄軍使用的人員殺傷雷係由俄羅斯或前蘇聯所製造，生產標記來自20世紀70年代以及80年代。大多數以手動佈設的地雷均源自於蘇聯時期，俄烏雙方均有庫存，表1臚列蘇

聯時期產製的傳統地雷，針對其殺傷類型以及引爆方式簡要敘述。

傳統地雷投放方式大致區分為3種，分別為手動布雷、機械布雷以及遠端布雷等，¹⁴ 俄羅斯的通用火箭布雷車（UMZ，遠程布雷車）的一個模組可攜帶30至120枚反坦克地雷或多達2,100枚的人員殺傷地雷，一輛佈雷車擁有6個模組；因此，一輛車佈設的雷區寬約30公尺，而長度可達約5公里。¹⁵ 而2023年初烏軍首次於俄烏戰爭中使用無人機

表1 俄烏戰爭中所使用的地雷類型

類別	型式	生產時期	類型	佈設方式
人員殺傷雷	MON-50	蘇聯／俄羅斯	碎片	手動
	MON-200	蘇聯／俄羅斯	碎片	直升機或火箭砲
	OZM-72	蘇聯／俄羅斯	碎片	
	PMN-2	俄羅斯	爆破	
	PMN-4	俄羅斯	爆破	
	POM-2/POM-2R	蘇聯／俄羅斯	碎片	
	POM-3	俄羅斯	碎片	直升機或火箭砲
反坦克地雷	PTKM-1R	俄羅斯	聚能炸藥	手動
	PTM-1/PTM-1G	蘇聯／俄羅斯	爆破	直升機或火箭砲
	PTM-4	俄羅斯	聚能炸藥	
	TM-62M	蘇聯／俄羅斯	爆破	
	TM-62P3	蘇聯／俄羅斯	爆破	手動或機械
	TM-83	蘇聯／俄羅斯	聚能炸藥	

資料來源：Andrew Stroehlein, "Background Briefing on Landmine Use in Ukraine," Human Rights Watch, Jun, 15, 2022, <<https://www.hrw.org/news/2022/06/15/background-briefing-landmine-use-ukraine>>（檢索日期：2023年11月27日）

14 Andrew Stroehlein, "Landmine Use in Ukraine," Human Rights Watch, Jun, 13, 2022, <<https://www.hrw.org/news/2023/06/13/landmine-use-ukraine>>（檢索日期：2023年11月27日）

15 David Axe, "To Slow The Ukrainian Counteroffensive, the Russian Army Quadrupled The Size of Its Minefields," Forbes, Sep, 5, 2023, <<https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2023/09/05/to-slow-the-ukrainian-counteroffensive-the-russian-army-quadrupled-the-size-of-its-minefields/?sh=7875cc7669e8>>（檢索日期：2023年11月27日）

部署MON-50型定向破片地雷，此種透過無人機布雷之方式為新型態的軍事技術。¹⁶ 烏克蘭戰場上幾種新型地雷在此次戰爭中皆為初次被使用，甚至有部分地雷是2021年才生產。

表2顯示了俄烏戰場上常見的5種地雷。

其中，人員殺傷雷，多以壓力、絆線以及觸動式引爆（如項次1、2及3）；而反坦克地雷為避免人員或輕型機具誤觸引爆，設計上大多需達特定重量以上方可觸動引爆（如項次4及5）。

二、排雷方式

表2 俄烏戰場上較常出現的5種地雷

項次	名稱	說明	照片
1	PFM-1/PFM-1S 人員殺傷雷	蘇聯／俄羅斯製，俗稱蝴蝶雷，長約12公分，裝填約37公克炸藥，外觀常呈現綠色、卡其棕或沙棕色，置於樹林或者草地中不易被發現，常以手動、飛機或火箭進行佈撒。	
2	OZM-72 人員殺傷雷	蘇聯製，重約5公斤，直徑約11公分，通常透過壓力或者絆線等方式觸發，當被觸發時，地雷會向上爆炸，釋放出2,400多個鋼碎片，通常採手動方式佈設。	
3	PMN-4 人員殺傷雷	蘇聯製，重約280公克，直徑約9.5公分，裝填約56公克，5公斤壓力即可觸發引爆，爆炸有效範圍約90公尺。	
4	PTM-1/PTM-1G 反坦克地雷	俄羅斯製，長約34公分，裝填約1公斤多液體炸藥，需150至400公斤壓力才能引爆，此款地雷部署後具防排雷效果，需透過彈藥攻擊來摧毀地雷，例如使用車裝機槍射擊。	

16 Eve Sampson and Samuel Granados, "Ukraine is now the most mined country. It will take decades to make safe," The Washington Post, Jul, 22, 2023, <<https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>>（檢索日期：2023年11月27日）

5

TM-62系列
反坦克地雷

俄羅斯製，直徑約32公分，裝填約7.3公斤炸藥，需150至550公斤才能引爆，在烏克蘭戰場上最多被使用的一款地雷，普遍採用放置在表面或埋在淺孔中。



資料來源：David Axe, "To Slow The Ukrainian Counteroffensive, the Russian Army Quadrupled The Size Of Its Minefields," Forbes, Sep, 5, 2023, <<https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2023/09/05/to-slow-the-ukrainian-counteroffensive-the-russian-army-quadrupled-the-size-of-its-minefields/?sh=7875cc7669e8>>（檢索日期：2023年11月27日）

根據總部位於斯洛伐克的國際智庫 GLOBSEC最近的一份報告顯示，烏克蘭境內約30%的地區（面積超過67,000平方英里）因地雷、絆網、誘殺裝置以及砲彈的碎片等嚴重污染，需要進行耗時、昂貴且危險的清理行動。¹⁷而廣闊的雷區不僅阻礙了烏克蘭的軍事反攻行動，同時也危及了近600萬平民的生存，使得該國最有價值的農地無法使用，影響了烏克蘭的經濟以及全球糧食供應。¹⁸

清除地雷的方法主要有4種，分別為機械除雷、炸藥除雷、人工排雷以及無人機排雷等，相關優缺點分析如表3所示。

烏克蘭面對此一威脅，採取了多元化的排雷策略，以應對其獨特的安全需求。囿於雷區面積太廣，其目前所使用的多種排雷方

式，以下簡介可能的6種排雷手段：

(一)人工排雷

為一種傳統的排雷方式，依靠人員手動搜索和清除地雷，雖然可以適應各種環境和地形進行工作，然而當前烏克蘭約有5,000名排雷人員，仍須20餘年才能清理6,700平方公里的土地，人員需要經過專門的訓練和穿戴安全裝備，無論時間及人力成本均較高。歐盟等國家已提供烏克蘭各類型排雷工具及探測儀等，期能儘速解決烏國當前的困境。¹⁹

(二)UR-77隕石排雷車²⁰

是一種蘇聯製的爆炸鏈式地雷清除車，改裝自MT-LB輕型多用途裝甲車底盤，可保護乘員免受砲彈碎片的傷害，可兩棲使用。其攜帶並可發射2枚帶有UZP-77掃雷線裝藥的DM-140火箭。每個UZP-77排雷線裝藥長

17 Luliia Osmolovska, "Walking on Fire Demining in Ukraine," GLOBSEC IDEAS SHAPING THE WORLD, Apr, 26, 2023, <<https://www.globsec.org/what-we-do/publications/walking-fire-demining-ukraine>>（檢索日期：2023年12月3日）

18 James Cowan, "Clear Landmines to rebuild Ukraine and feed the world," The Halo Trust, Jul, 19, 2023, <<https://www.halotrust.org/latest/halo-updates/news/clear-landmines-to-rebuild-ukraine-and-feed-the-world/>>（檢索日期：2023年12月3日）

19 Luliia Osmolovska, "Walking on Fire Demining in Ukraine," GLOBSEC IDEAS SHAPING THE WORLD, 2023. p. 14. At file:///Users/hanhan/Desktop/%E5%9C%B0%E9%9B%B7%E6%88%B0/Demining%20in%20Ukraine%20report%20ver5%20web.pdf（檢索日期：2023年11月27日）

20 Armtrac Ltd., "UR-77 Meteorit," WeaponSystems.net, <<https://armtrac.net/wp-content/uploads/SPEC-100-350-MK2-ISS-3.00-10-2018.pdf>>（檢索日期：2023年11月27日）

表3 排雷方式優缺點比較分析表

排雷方式	優點	缺點
機械除雷	速度快、效率高、成本低、安全性高，適合用於大面積的除雷任務。	機械設備可能會損壞或失靈，而且無法清除埋藏在深層的地雷或非金屬地雷。
炸藥除雷	能夠徹底摧毀地雷，避免再次造成威脅，而且不需要精確定位地雷的位置，只要在地雷附近引爆炸藥即可。	會產生巨大的噪音和震動，對環境和生態造成破壞，而且可能會引發鄰近的地雷連鎖反應，增加危險性。
人工排雷	能夠精準地找出地雷的位置和類型，並根據不同的地雷採取不同的拆除方法，避免不必要的爆炸，而且對環境和生態的影響最小。	速度慢、效率低、成本高，而且風險極大，需要高度的技術和勇氣。
無人機排雷	安全性高、靈活性好、可以利用圖像和機器學習來辨別地雷。	成本高、技術要求高、可能受到干擾或攻擊。

資料來源：本研究整理。

93公尺，重1,069公斤。

UR-77的單線可建立一條長80至90公尺、寬6至8公尺的通道，以供車輛通過，只要攜帶兩根掃雷線裝藥，車輛就可以將路徑再延長80至90公尺，或創建另一條路徑。然而，UR-77的爆炸性清雷方式也伴隨著諸多缺點。它會對環境造成極大的破壞，且對於不引爆的地雷缺乏精確的控制。此外，在密集或複雜的地雷佈局中，它可能無法完全清除所有的地雷，留下潛在的危險。

烏軍並未配賦UR-77隕石排雷車，但已自俄軍繳獲16輛，並作為攻擊武器使用，將原先用來在雷區開闢道路的掃雷線型裝藥用來作為近距離打擊俄軍的火力裝置，而非作為排雷之用。²¹

(三) Leopard 2R排雷車²²

又稱為重型掃雷車(heavy mine breaching vehicle)，是由芬蘭以豹2A4主戰坦

克為基礎改裝製造的排雷作業用車輛，烏軍採購的6輛係由芬蘭於2023年2月所提供。該車輛配備了掃雷犁和掃雷滾筒系統，以清除雷區的道路。同時配備地雷探測系統，可以定位和標記地雷的位置。透過犁地和碾壓的方式引導坦克和步兵戰車穿過雷區，從而使坦克和步兵戰車可以突破敵方防禦。

該車須編組較多專業人員操作，其中包括一名駕駛員、一名指揮官和一名排雷專家，目前已被芬蘭國防軍運用於世界各地的各種維和任務。它也出口到其他國家，包括阿拉伯聯合大公國和瑞士。該車輛已被證明是排雷行動的有效工具，但它也有一定的限制。例如，它無法在極端炎熱條件下運行，例如沙漠環境中的條件。

(四) T-62M坦克加裝KMT-6掃雷犁²³

T-62M主戰坦克是由前蘇聯以T-62主戰坦克為基礎的改良型，除改良射操系統、

21 自由時報，〈掃雷車當火砲用，烏軍UR-77「隕石」掃雷車打擊俄軍攻勢〉，《自由時報/軍武頻道》，2023年4月7日，<<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4262967>>（檢索日期：2023年11月27日）

22 Andrius Genys, "Leopard 2R," Military-Today.com, <https://www.militarytoday.com/engineering/patria_hmbv.htm>（檢索日期：2023年11月27日）

火力及馬力外，並增強了對穿甲彈及反戰車地雷的裝甲防護力；KMT-6掃雷犁係由兩個單獨的犁刀組成，可安裝在T-62M前方，其工作原理是將埋設的地雷挖出或碰倒，然後偏轉到外側，以避免被履帶碾壓引爆，進而讓坦克部隊快速脫離雷區。

(五)MV-4掃雷無人地面車輛²⁴

MV-4掃雷無人地面車輛，由克羅埃西亞道金公司(DOK-ING)製造，是專門為人道主義排雷任務而設計的掃雷無人地面車輛，使用輕型履帶式遙控排雷系統，可清除所有類型的殺傷人員地雷和未爆彈藥，適用於植被很少或沒有植被的地區進行排雷。

南韓政府於2023年12月中旬提供烏克蘭10輛MV-4無人排雷車，MV-4具有多用途、擔負多種任務功能的特性。根據使用者要求，可變型為叉車、鏟車、推土機、爪車等，功能多樣化，並可根據實戰需求隨時更換強有力的工具，且具有優良的越野機動性、堅固的裝甲防護力和強大的突擊能力。²⁵

(六)RPV-16溫壓火箭彈²⁶

溫壓彈(thermobaric bomb)是一種利用高溫高壓的爆炸來破壞目標的武器，它可以

引爆地雷中的炸藥，或者破壞地雷的結構，並同時清除了雷場及其他重要目標。惟溫壓彈屬於無差別攻擊武器，並會造成過度和不必要的傷害，雖尚未有國際法明確禁止溫壓彈使用，但根據日內瓦公約「禁止使用無法區分目標的無差別攻擊武器」，以及國際人道法「禁止造成過度以及不必要的傷害」等規範，若是使用溫壓彈攻擊建築區、學校或醫院的平民，根據1899年與1907年的《海牙公約》，很有可能被判觸犯戰爭罪。²⁷

烏克蘭擁有的RPV-16溫壓火箭彈，係由烏克蘭國家化學產品研究所研發，於2018年開始投入生產，並於2019年交付烏克蘭陸軍400具。該款飛彈採用預裝彈的一次性發射管，自帶光學瞄具和保險，射程高達1,000公尺，它採用碰炸引信引爆，觸發後，會產生直徑達7至8公尺左右的一團燃料空氣混合雲團，覆蓋面積約為120平方公尺。爆炸雲團中最高溫度可以達到2,500度，比合金鋼的熔點還要高1,000度，若直接命中，連合金鋼也會被融化。

表4臚列了烏克蘭目前可能擁有的排雷方法，除了人工排雷及RPV-16溫壓火箭彈（如項次1及6）外，其餘方式必須藉由烏

23 Hawk26講武堂，〈細品：T-62M坦克配備的特殊裝備KMT-6掃雷犁排除地雷的威脅〉，《網易》，2020年10月12日，〈<https://m.163.com/dy/article/FOO5JGAT0515974E.html>〉（檢索日期：2023年11月27日）

24 MILITARYLEAK.COM, <Republic of Korea Army Unveils MV-4 Mineclearing Unmanned Ground Vehicle>, MILITARYLEAK.COM/Guound Warfare, <<https://militaryleak.com/2020/05/21/republic-of-korea-army-unveils-mv-4-mineclearing-unmanned-ground-vehicle/#>>（檢索日期：2023年11月27日）

25 特種裝備網行業門戶，〈掃雷機器人—排爆多面手—DOK-ING MV-4多功能排爆機器人〉，《網易》，2022年8月16日，〈<https://www.163.com/dy/article/HESO07600531T8X5.html>〉（檢索日期：2023年11月27日）

26 自由時報，〈影片曝光！烏軍「溫壓手榴彈」轟爆俄軍步兵戰車〉，《自由時報／國際》，2023年3月9日，〈<https://news.ltn.com.tw/news/world/breakingnews/4234728>〉（檢索日期：2023年11月27日）

27 自由時報，〈威脅烏基礎設施！俄軍「見證者」無人機傳裝配溫壓彈頭〉，《自由時報／國際軍情》，2023年12月4日，〈<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4510279>〉（檢索日期：2023年12月5日）

表4 各種排雷方式說明

項次	名稱	說明	照片
1	人工排雷	排雷人員穿戴面罩及身體護具，在冒著極大的危險下，手持金屬探測器定位及偵測地雷可能的所在位置。一名排雷人員每天只能清理49至82平方英尺的區域，取決於地形以及爆炸物存在密度。	
2	UR-77隕石排雷車	UR-77的火箭彈可以在200至500公尺的範圍內部署掃雷線裝藥。UR-77相對於機械化的清雷方式，提供了快速且有力的清除手段，對於急需建立安全通道的軍事行動來說，是一種有效的選項。	
3	Leopard 2R排雷車	由芬蘭Patria公司所開發，以滿足芬蘭國防軍的作戰需求。該車輛的主要作用是清理雷區的道路，為其他車輛通過創造安全車道。它允許突擊部隊在敵軍建立防禦之前快速穿過障礙物。	
4	T-62M坦克加裝KMT-6掃雷犁	由前蘇聯以T-62主戰坦克為基礎的改良型，於坦克前方加裝KMT-6掃雷犁後，可排除大多數的反坦克地雷，包括機械布撒的炸車底地雷和埋設在土地中的地雷。	
5	MV-4掃雷無人地面車輛	操作人員可在1,500公尺左右距離無線控制，可行走在草地、沙灘、泥濘、雪地等複雜的路面上，處理0.8公尺高的障礙物，能跨1.2公尺寬的溝壑，其獨特的結構和低底盤的保護，能防止地雷爆破不會對機器造成嚴重損壞。	
6	RPV-16溫壓火箭彈	由烏克蘭國家化學產品研究所研發，提供烏克蘭武裝部隊對付躲在戰壕或堅固陣地裡的俄軍地面部隊，不僅會殺傷人員，還能炸毀輕型裝甲車，更是排雷的一大利器。	

資料來源：本研究整理。

軍在戰場上繳獲俄軍裝備（項次2及4）或尋求國外援助（項次3及5）始能獲得。由於在戰場上繳獲敵方裝備是經常發生的情形，而Leopard 2R排雷車則是烏克蘭較早接收的排雷裝備，因此本文認為在突破俄軍防線時，烏軍較有可能使用的是UR-77隕石排雷車、Leopard 2R排雷車或T-62M坦克加裝KMT-6掃雷犁（項次2、3及4）等方式。

參、想定設計及參數設定

假定在俄烏戰場中，烏軍試圖突破俄軍所建構之防線，在輔以快速的排雷措施下，烏軍以數輛戰車組成一小隊實施衝鋒；為利模擬模型的建構，想定設計及參數之設定如下所述：

一、俄軍防線

本文假設的防線與圖2相同，由鐵絲網、反坦克壕、龍牙與戰壕系統所組成，考量非所有的俄軍防線縱深均恰好為550公尺，可能會因地制宜進行調整，為瞭解雷場縱深在戰場上的作用，因此將防線上的雷區縱深設定為100、200、300、400及500公尺等5種水準。鐵絲網、反坦克壕及龍牙等阻絕設施暫不納入模擬模型中，可依模擬結果再實施綜合評估。

二、地雷分布與排雷方式

俄軍防線內的雷區佈有反坦克地雷及人員殺傷雷，由於本文不討論人員傷亡，因此模擬模型僅考量建置反坦克地雷；另因俄軍有多種佈雷方式，每種方式可能會在雷場上產生不同的分布型態，為簡化起見，假設防

線內的地雷分布符合獨立的隨機變數特性。儘管外媒聲稱部分雷區的地雷密度可高達每平方公尺5枚，²⁸ 但若以一輛寬度3.3公尺的T-62戰車來看，每前進1公尺就可能越過16.5枚地雷，對於阻絕一輛戰車行進而言顯然過當，因此本文將地雷密度視為可變參數，分別設定為每平方公尺0.5、1、1.5及2枚等4種水準。

烏軍的排雷工具有2：一是使用重型排雷車（例如Leopard 2R排雷車）或是在T-62M坦克加裝KMT-6掃雷犁（以下均簡稱排雷車），二是使用UR-77隕石排雷車開闢安全通道（以下簡稱UR-77）。因此排雷方案可以組合成4種水準：僅使用排雷車、僅使用UR-77、兩者並行及兩者均不採用。

鏟雷犁可推移地面上的地雷，但仍有一定比例深埋在土壤中的地雷無法被鏟雷犁推移，因此可能損壞車輛使其無法推進，本文假定有5%的地雷無法被推移。此外，UR-77隕石排雷車的排雷效果雖較佳，但並無法完全排除通道上的所有地雷，本文假定對反坦克地雷的清除機率為99%。另假定UR-77的一發火箭可開闢一條長約90公尺、寬約8公尺的安全通道，故至少需6發火箭始能開闢長度500公尺的安全通道；模型簡化起見，假設UR-77的彈著偏差極小，6發火箭可順利排列成1條筆直的安全通道。

三、烏、俄軍攻防

烏軍以數輛戰車組成一小隊實施衝鋒，為求得所需戰車數量，²⁹ 模型中的戰車在數量上沒有限制；反之，若戰車的數量設定為

28 同註6。

29 本文在描述戰車於雷場行進時，或因依排雷方式不同，可能包含排雷車或加裝鏟雷犁的戰車。為避免敘述時過於冗繁，大部分情況下會簡稱為戰車。

有限，則可以利用模擬模型求得突破防線的機率。行進前，烏軍後方必須以火力制壓俄軍在戰壕系統後方的俄軍砲兵陣地，以避免行進中的戰車遭到砲擊；而假定烏軍制壓俄軍砲兵陣地的彈藥數量沒有限制，砲兵陣地的士兵會在戰壕系統內尋求掩蔽，進而無法攻擊行進中的戰車，但俄軍後方的火力支援會在一定時間內準備完成（設為平均數為90秒的指數分配），此時烏軍行進中的戰車會遭到俄軍反坦克武器的持續攻擊，假設攻擊對戰車的毀傷機率為70%，間隔為5、15、30、45及60秒等5種水準。

四、行進速度

在不同排雷方案下，烏軍戰車會以不同速度魚貫進入雷區，使用排雷車時，行進速度為時數10公里，如有使用UR-77，時速可增加至40公里；當第1輛戰車或排雷車誤觸反坦克地雷而受損，第2輛之後的戰車或排雷車會繞開受損車輛持續推進，依此類推。作戰的目標是在防線開闢一個缺口，以利烏軍後方兵力進入，因此當抵達戰壕系統前只要有1輛戰車或排雷車存活，則任務成功，但若全數戰車或排雷車均誤觸地雷或遭反坦克武器摧毀，則任務失敗。

綜合以上所述，可調整的參數計有：雷區縱深（100、200、300、400或500公尺）5種、地雷密度（每平方公尺0.5、1、1.5或2枚）4種、排雷方案（僅使用UR-77、僅使用排雷車；兩者均使用或兩者均不使用）4種及俄軍攻擊時隔（5、15、30、45或60秒）5種，計可組合成400種實驗(experimentation)，如表5所示。

依上述想定所設定之各種參數，在本文均視為「可變參數」。實務上，真實參數值可由「兵器實驗場」或「實戰演習」中獲得估算數據，然本文利用模擬「可重複性」的優點，逕以合理之數值設定之，以便對各種方案實施分析。另由於俄、烏2國之敵我兵力部署及戰術運用具有機敏特性，難自公開資訊中取得，故本文在建模時予以適度的「簡化」並以假設值遂行；爾後若本模型經業管單位採用，並加強參數之真實性，方能精進模型之精準度。

肆、模擬模型建構

模型(model)是系統的簡化，通常大多數研究只需考量會影響系統的因素。系統(system)則為一實體之集合（如一群人員或機

表5 模擬實驗組合設計

參數類別*	水準**	水準數	測量尺度
雷區縱深	100、200、300、400及500公尺	5	數值
地雷密度	0.5、1、1.5及2枚／平方公尺	4	數值
敵攻擊時隔	5、15、30、45及60秒	5	數值
排雷方式**	UR-77、排雷車、兩者均使用、兩者均不使用	4	類別

說明：
* 參數類別計4種，各參數依水準數，可產生400 (5×4×5×4 = 400)種組合。
** 排雷方式影響戰車行進速度及排雷率，如採排雷車，行進速度為時速10公里、排雷率為95%；如採UR-77，行進速度為時速40公里、排雷率為99%，如兩者均使用，行進速度為時速40公里。

資料來源：本研究整理。

器)，這些實體以某種邏輯的運作及相互作用以達到某種目的；³⁰ 如要對一個系統建立模型，則必須依研究目的決定系統及其環境的邊界。³¹ 而模型亦可區分為「實體模型」和「數學模型」，數學模型乃利用符號標記和數學方程式來描述系統，模擬模型則是一種特殊的數學模型。³²

模擬模型可再細分為靜態的(static)或動態的(dynamic)、確定的(deterministic)或隨機的(stochastic)、離散的(discrete)或連續的(continuous)。靜態模擬模型通常被稱為蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)，代表一個特定時間點（區間）的系統，動態模擬模型代表了隨時間變化的系統。³³ 本文建立的模型雖有考量時間因素，但在處理上視為固定參數，故仍屬隨機的蒙地卡羅模擬模型。

在建模的工具上，參考陳甫岳於2022年建構機場跑道修復模型的方式，³⁴ 採用了Microsoft Excel VBA程式語言，處理在Excel頁面上建置的模擬模型。Excel是相當普及的文書作業軟體，Excel VBA則可將使用者編輯儲存格的動作加以自動化，因此可以處理大量性、重複性的儲存格運算，³⁵ 因此非常適合從事靜態的蒙地卡羅模擬。

以下係針對如何運用Excel建構地雷戰的

模擬模型進行簡要說明：

一、地圖建置

雷區地圖建置在Excel儲存格上，可將Excel畫面上的儲存格視為一直角座標體系，儲存格的位置可視為座標點，座標以 (X_i, Y_i) 表示。假設1個儲存格為邊長0.33公尺之正方形，略為1枚反坦克地雷的直徑，因此3個儲存格概略為1公尺，若要開闢一個寬8公尺、長500公尺的通道，則必須利用36,000個儲存格建置地圖，也就是從座標(1, 1)到(1500, 24)的長方形區域。

二、地雷佈撒

若將佈撒地雷簡化為一系列的伯努利試驗(bernoulli trial)，令通道上的每個儲存格 (X_i, Y_i) 有無地雷的狀態為 M ，地雷佈撒時，出現地雷的機率為 p ，狀態可記為1，反之則記為0，即：

$$\Pr (M = 1) = p$$

$$\Pr (M = 0) = 1 - p$$

如伯努利試驗成功，則該儲存格註記為1，若否，則維持為空白（如圖3，為利識別，註記為1的儲存格著為綠色）。 p 的值取決於地雷密度，由於每平方公尺最多僅能容納9枚地雷，每平方公尺的地雷數量假如為1，則 p 為0.11。

30 Averill M. Law, *Simulation Modeling and Analysis* (New York: McGraw-Hill, 2007), p. 4.

31 Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson & David M. Nicol, *Discrete-event System Simulation* (New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005), p. 12.

32 張最良、李長生、趙文志、丁富力，《軍事運籌學》（北京：軍事科學出版社，1993），頁153。

33 同註31，頁13。

34 陳甫岳，〈機場跑道修復模擬模型之建構〉，《2022第三十屆國防管理學術暨實務研討會論文集上》。2022年6月，頁160-170。

35 Microsoft，〈使用巨集錄製器自動化工作〉，《Microsoft支援》，<<https://support.microsoft.com/zh-tw/office/%E4%BD%BF%E7%94%A8%E5%B7%A8%E9%9B%86%E9%8C%84%E8%A3%BD%E5%99%A8%E8%87%AA%E5%8B%95%E5%8C%96%E5%B7%A5%E4%BD%9C-974ef220-f716-4e01-b015-3ea70e64937b>>（檢索日期：2022年5月9日）

三、排雷及戰車行進

排雷過程同地雷佈撒般可視為伯努利試驗，在排雷車經過的軌跡上（如使用UR-77則為整個通道），由左至右、由上至下地逐一進行伯努利試驗，令通道上的每個儲存格 (X_i, Y_i) 排雷後的狀態為 E ，排雷成功的機率為 q ，如恰有地雷的儲存格排雷成功，則該儲存格的註記改為0（原先沒有地雷的亦記為0，以呈現戰車經過的軌跡，為利識別則著為灰色，如圖4），若否，則表示戰車觸雷損傷，註記維持為1，並由下一輛戰車接替前進，即：

$$\Pr(E = 0 \mid M = 1) = q$$

$$\Pr(E = 1 \mid M = 1) = 1 - q$$

$$\Pr(E = 0 \mid M = 0) = 1$$

$$\Pr(E = 1 \mid M = 0) = 0$$

戰車在地圖上係由左至右前進，每向右前進1個儲存格，即再由上至下檢查1個戰車寬度內（不含兩履帶間距）的每個儲存格有

無地雷，如無則繼續向前推進。本文參考蘇製T-62戰車的寬度3.3公尺作為行進寬度，履帶寬度假設為4個儲存格。

四、敵反制火力

在俄烏戰場上，反坦克飛彈是雙方經常用來反制戰車的武器，其具備較高的精準度，使得在建模上也可將其視為伯努利試驗。除此之外，也大量運用多管火箭、榴彈砲、自殺無人機或是攜掛砲彈的無人機等武器，甚至不同種類武器交替使用。但各類武器的參數特性均有所不同，例如射程、速度、精準度、毀傷率及被攔截率等，進而可能影響模擬結果，建模方式自然有其差異。本文為凸顯地雷對於作戰損耗的影響，在敵的反制火力上假設為單一類型，爾後當可視研究需要逐步增加不同類型。

反坦克飛彈屬精準武器，建模上與曲射武器不同的是，曲射武器通常需考量彈著偏差，而精準武器則多視為伯努利試驗。因此，

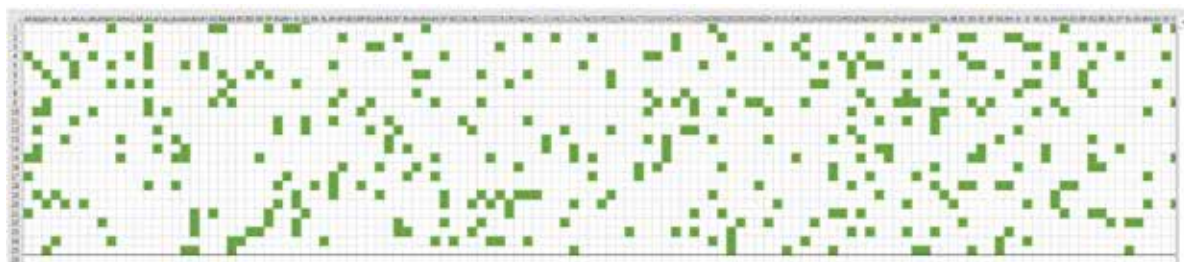


圖3 地雷佈撒示意圖($p = 0.11$)

資料來源：本研究整理。

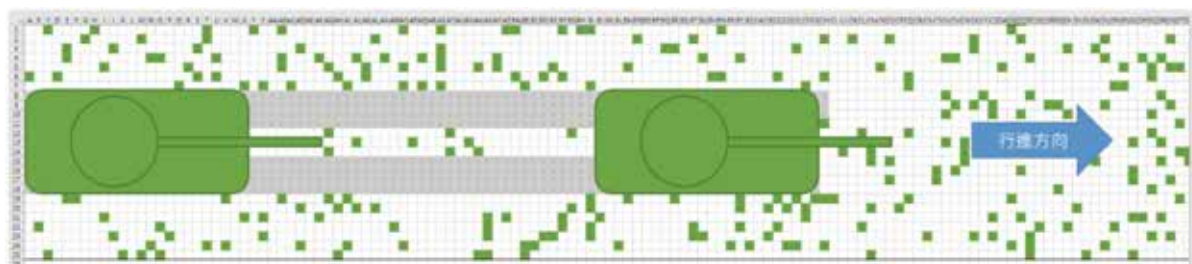


圖4 戰車行進軌跡示意圖

資料來源：本研究整理。

模型省略了飛彈發射的過程，直接給定飛彈來襲的時間間隔，一旦時間間隔條件滿足，即針對第一輛戰車以伯努利試驗決定其是否損毀，間隔越短，表示敵的火力越密集。

五、程式流程

本文採用Excel VBA作為模擬程式工具，將佈雷、排雷及敵反坦克飛彈是否命中等一系列事件發生的機率視為伯努利試驗，程式僅以1個簡單的sub程序（編輯行數大約220餘行），即可處理大量及重複性的儲存格運算。本文限於篇幅，不針對程式的細節加以描述，讀者可參考程式流程圖（如圖5）。

伍、統計模型建構與模擬數據分析

本研究假設雷區縱深、地雷密度及俄軍攻擊時隔對烏軍突破地雷陣所需戰車數屬於直接效果(indirect effect)，另排雷方式（包含UR-77及排雷車2種）則為雷區縱深及地雷密度對應變數的干擾變數(moderating variables)，概念如研究架構圖（圖6）所示。

上述假設意味著雷區縱深、地雷密度、俄軍攻擊時隔及排雷方式等4種變數可能會影響突破防線所需的兵力大小，變數的選擇係參考自軍事準則及學術文獻，分述如後：

- 一、美軍準則依據擾亂、遲滯、轉向及阻止等戰術上的需求，將「雷區縱深」設定為100至320公尺不等，如此對敵之傷亡率達50%至80%，必要時可將「地雷密度」增加以提升傷亡率。³⁶
- 二、Jacobs(1979)將地雷戰的攻防以卜瓦松過程(Poisson process)建立一數學模型，

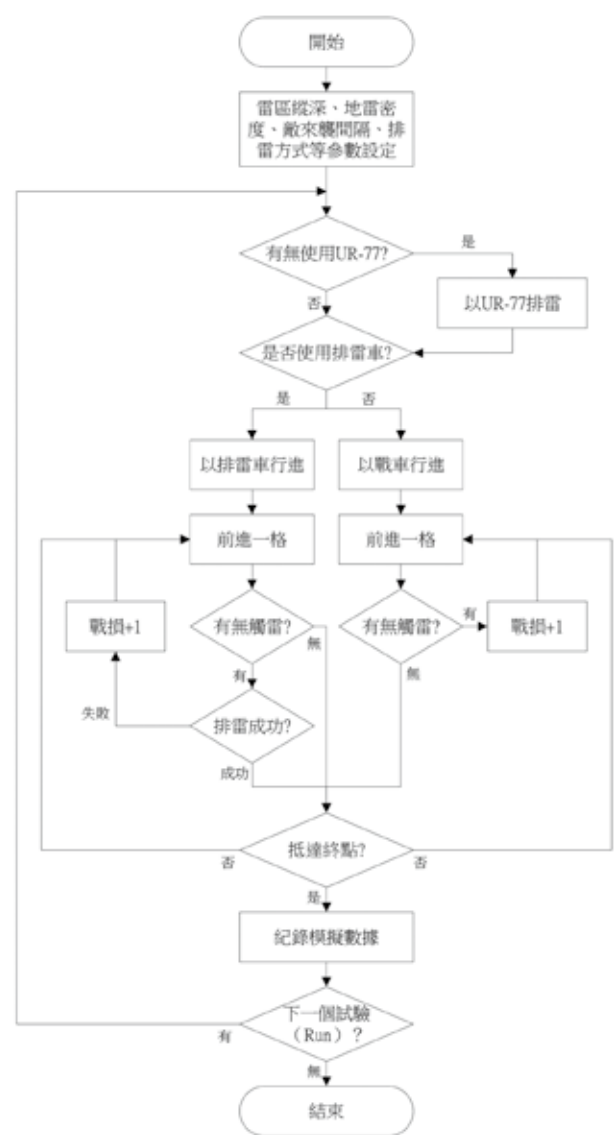


圖5 程式流程圖

資料來源：本研究整理。

以估計戰車突穿雷區的成功機率。³⁷ 其中，「雷區縱深」及「地雷密度」均為其參數之一；另該模型雖未考量「攻擊時隔」，但隱含在「對戰車的偵獲率」參數之中。³⁸

三、「排雷方式」的使用如同將「雷區縱

36 吳珮瑄，〈戰術型雷區運用之探討〉，《陸軍工兵半年刊》，2020年5月，頁53-56。

37 Jacobs, P. A., *A Model for the Defense of a Mine Field* (California: Naval Postgraduate School., 1979), p. 2.

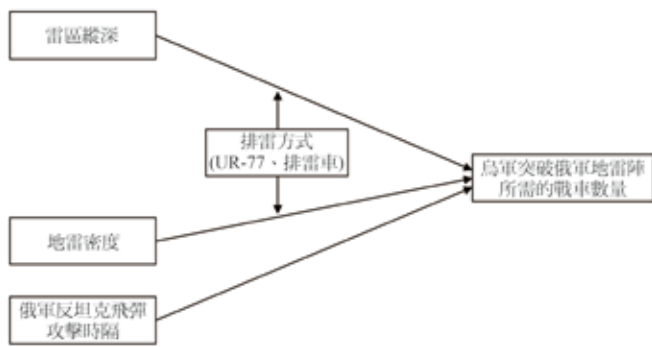


圖6 研究架構圖

資料來源：本研究整理。

深」縮短或將「地雷密度」降低，因此將其視為「雷區縱深」及「地雷密度」的干擾項。

職是之故，依上述各變數分別給予不同水準下，可產生400種實驗組合（如表5），在每種實驗分別給予30次試行(replication)，³⁹以產生12,000次試驗(run)；由於分析這些試驗恐難使用簡單的統計圖一一呈現，因而在統計模型上採用了多元迴歸模型(multiple regression models)加以配適，反應函數如後：

$$E\{Y\} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_{14} X_{14} + \beta_{24} X_{24} + \beta_{15} X_{15} + \beta_{25} X_{25} + \beta_{45} X_{45} + \beta_{145} X_{145} + \beta_{245} X_{245}$$

其中：

Y：烏軍突破俄軍地雷陣所需的戰車數量。

X₁：雷區縱深，範圍自100至500公尺。

X₂：地雷密度，每平方公尺0.5至2枚地雷。

X₃：俄軍反坦克飛彈攻擊時隔，在5至60秒間。

X₄：排雷方式，使用UR-77，虛擬變數(dummy variable)，有使用為1，未使用為0。

X₅：排雷方式，使用排雷車，虛擬變數，有使用為1，未使用為0。

X₁₄：雷區縱深(X₁)與UR-77(X₄)的交互項(interaction term)。

X₂₄：地雷密度(X₂)與UR-77(X₄)的交互項。

X₁₅：雷區縱深(X₁)與排雷車(X₅)的交互項。

X₂₅：地雷密度(X₂)與排雷車(X₅)的交互項。

X₄₅：UR-77(X₄)與排雷車(X₅)的交互項。

X₁₄₅：雷區縱深(X₁)與X₄₅的交互項。

X₂₄₅：地雷密度(X₂)與X₄₅的交互項。

由於模型假設排雷方式為雷區縱深(X₁)及地雷密度(X₂)的干擾變數，又排雷方式係為2個虛擬變數(X₄, X₅)，因而可以組合成不排雷(0, 0)、使用UR-77(1, 0)、使用排雷車(0, 1)及兩者均使用(1, 1)等4種組合，為了確知(1,1)組的斜率有無不同，因此創造了X₄₅交互項，使本模型的虛擬變數嚴格上為X₄、X₅及X₄₅等3個，進而為了驗證這3個虛擬變數的干擾效果，須將這3個虛擬變數對雷區縱深(X₁)及地雷密度(X₂)2個自變數創造交互項，使得整個模型的自變數達到12個。

值得注意的是，由於模型中有7個自變數為交互項，很自然地，自變數之間必然產生相關性，共線性(collinearity)的存在實不

38 同註37，頁2-3。學者Jacobs為了簡化模型，假設守方一旦發現攻方的戰車出現在雷區，就必然可使用己方之戰車將其殲滅（以直射武器連續射擊至殲滅為止），故對戰車的偵獲率為其必要參數，因而也省略了攻擊時隔；而在現今的俄烏戰場上，因偵測手段及技術以大幅提升，因此本研究傾向省略偵獲率，復因現今對戰車的攻擊多以反坦克飛彈或是攜掛砲彈的無人機等較為精準的武器為主，發射第一枚飛彈與第二枚飛彈之間必然有足以讓戰車行進的時間間隔，故考量攻擊時隔反而更貼近戰場實況。

39 本研究特別將每種實驗分別給予30次試行，以確保其算術平均數服從常態分配，對迴歸分析的「常態性」基本假設有所助益，以增進模型的信度。

可避免；然即使出現共線性，模型仍是「最佳線性不偏估計式」(Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)，因此就軍事決策而言，共線性對模型的解釋及預測並未造成阻礙，因此本文並未刪減自變數或進行進一步的矯正措施。⁴⁰

迴歸模型係以調整後判定係數(Adjusted R^2)判斷模型配適度，較高的 R^2 意味著模型具有較高的解釋力，配適後的調整後判定係數達97.6%(如表6)，顯示模型已達到相當高的解釋力，無論是各自變數係數或是模型整體，在統計上均為顯著，符合建模時的設想。

由於排雷方法可區分為4組，分別是「僅使用UR-77」、「使用排雷車」、「兩者均使用」及「兩者均不使用」，因此以下分別由雷區縱深及地雷密度來看不同組別對戰車耗損的影響：

一、雷區縱深

雷區縱深越長，所需消耗的戰車數量會越多；在不使用任何排雷裝備下，雷區縱深每增加100公尺，平均會多損耗196.8輛戰車。若考量到交互作用，當僅使用UR-77或排雷車下，雷區縱深每增加100公尺，平均損耗的戰車數僅需增加9.9及17.4輛；倘若兩者排雷方法均使用，平均增加的戰車損耗數可下降至6.8輛(如表7)。

二、地雷密度

地雷密度越密集，所需消耗的戰車數量越多；在不使用任何排雷裝備下，地雷密度每平方公尺增加1枚地雷，平均會多損耗298輛戰車。若考量到交互作用，當僅使用UR-77或排雷車下，地雷密度每平方公尺增加1枚地雷，平均損耗的戰車數為需7.9及38.4輛；倘若兩排雷方法均使用，平均增加的戰車損耗數可下降至0.4輛(如表8)。

三、敵來襲間隔

反坦克飛彈來襲間隔越密集，所需消耗的戰車數量越多，與排雷方式無關。俄軍每減少1秒射擊間隔，就會增加烏軍0.343輛戰車耗損，相較於雷區縱深及地雷密度2變數來說，效果小了許多。

四、排雷方案固定下的效果

由於實驗組合達400種，若逐一臚列每種組合下應變數的估計值將使本文的篇幅過於龐雜，而在迴歸分析中，已確知雷場縱深及地雷密度2變數的效果較大，因此本文僅針對在4種排雷方案下，且固定敵反坦克飛彈來襲間隔為5秒，分別探討2種情境：

(一)雷場縱深在500公尺下，不同地雷密度所需戰車數量的估計值(如圖7上)。

(二)地雷密度在每平方公尺2枚下，不同雷場縱深所需戰車數量的估計值(如圖7下)。

不同排雷方案下，圖7上顯示雷區縱深

40 若以變異數膨脹因子(Variance Inflation Factor, VIF)是否大於10以診斷共線性，模型中計有9個自變數的VIF值大於10，分別是 $X_4(21)$ 、 $X_5(21)$ 、 $X_{14}(13)$ 、 $X_{24}(14)$ 、 $X_{15}(13)$ 、 $X_{25}(14)$ 、 $X_{45}(31)$ 、 $X_{145}(17)$ 及 $X_{245}(19)$ ，本文認為不刪減這些自變數或採取矯正措施的理由如後：

- 一、斜率在模型上的解釋非常重要，又因本模型的虛擬變數所衍生的交互項產生了不同組別的斜率，這些斜率對軍事決策而言顯然具有良好的意涵。
- 二、即使出現共線性，但模型仍是不偏估計式，不影響模型整體的解釋及預測能力。
- 三、系統模擬的特點之一即是可以大量的樣本資料求得一接近真值的近似值，接近真值既然是模擬的目標，因此，若採用矯正措施卻使估計式略為偏誤或使配適度下降，並非本文所要得到的結果。

表6 對烏軍突破俄軍地雷陣所需的戰車數量迴歸分析摘要

自變項	非標準化係數 B(SE)	標準化係數 β	t 值	F 值	調整後 R^2
(常數)	-363.328 (2.766)		-131.378***		
雷區縱深	1.968 (.006)	.942	335.505***		
地雷密度	297.991 (1.484)	.564	200.774***		
敵來襲間隔	-.343 (.021)	-.023	-16.393***		
UR77	360.289 (3.802)	.610	94.759***		
排雷車	324.042 (3.802)	.548	85.226***		
雷區縱深*UR77	-1.869 (.008)	-1.140	-225.319***	41284.3***	.976
地雷密度*UR77	-290.062 (2.099)	-.726	-138.191***		
雷區縱深*排雷車	-1.794 (.008)	-1.094	-216.216***		
地雷密度*排雷車	-259.625 (2.099)	-.650	-123.690***		
UR77*排雷車	-314.764 (5.377)	-.461	-58.538***		
雷區縱深*UR77*排雷車	1.763 (.012)	.882	150.230***		
地雷密度*UR77*排雷車	252.121 (2.968)	.520	84.934***		

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$
資料來源：本研究整理。

表7 雷區縱深每增加100公尺所需消耗戰車數量

組合	僅使用UR-77	僅使用排雷車	兩者均使用	兩者均不使用
雷區縱深每增加100公尺下所需消耗戰車數	9.9輛	17.4輛	6.8輛	196.8輛

資料來源：本研究整理。

表8 地雷密度每平方公尺增加1枚所需消耗戰車數量

組合	僅使用UR-77	僅使用排雷車	兩者均使用	兩者均不使用
每平方公尺增加1枚地雷下所需消耗戰車數	7.9輛	38.4輛	0.4輛	298輛

資料來源：本研究整理。

對戰車消耗數量的影響，而圖7下顯示地雷密度對戰車消耗數量的影響；可以確知的是，完全不排雷的方案是絕對不可行的，無論雷區縱深及地雷密度為何，欲突破雷區所造成的損傷都會相當巨大。使用UR-77的效果略優於使用排雷車，原因乃是在模擬參數的設定中，UR-77的排雷率較高，且戰車通過時的速度也較快，如此可以減少敵反坦克飛彈的影響。在資源許可下，同時使用2種排雷方式是最明智的方案，如此可以減少許多損耗；在雷區縱深及地雷密度每平方公尺2枚之下，估計的戰車損耗是39.2輛，這意味著依

烏軍的戰車庫存量可以同時進行多點突破，以獲致最大的成功概算。

陸、結 語

一、模型的意義、限制與貢獻

整體而言，本文模型中所考量的雷區縱深、地雷密度、反坦克飛彈來襲間隔及排雷方法，對試圖突破防線的戰車部隊來說，至關重大。沒有排雷手段的推進是完全不可行的，會導致重大的損傷，依模型估計出在雷區縱深500公尺、地雷密度每平方公尺2枚及敵來襲間隔時間5秒的狀況下，平均需要使

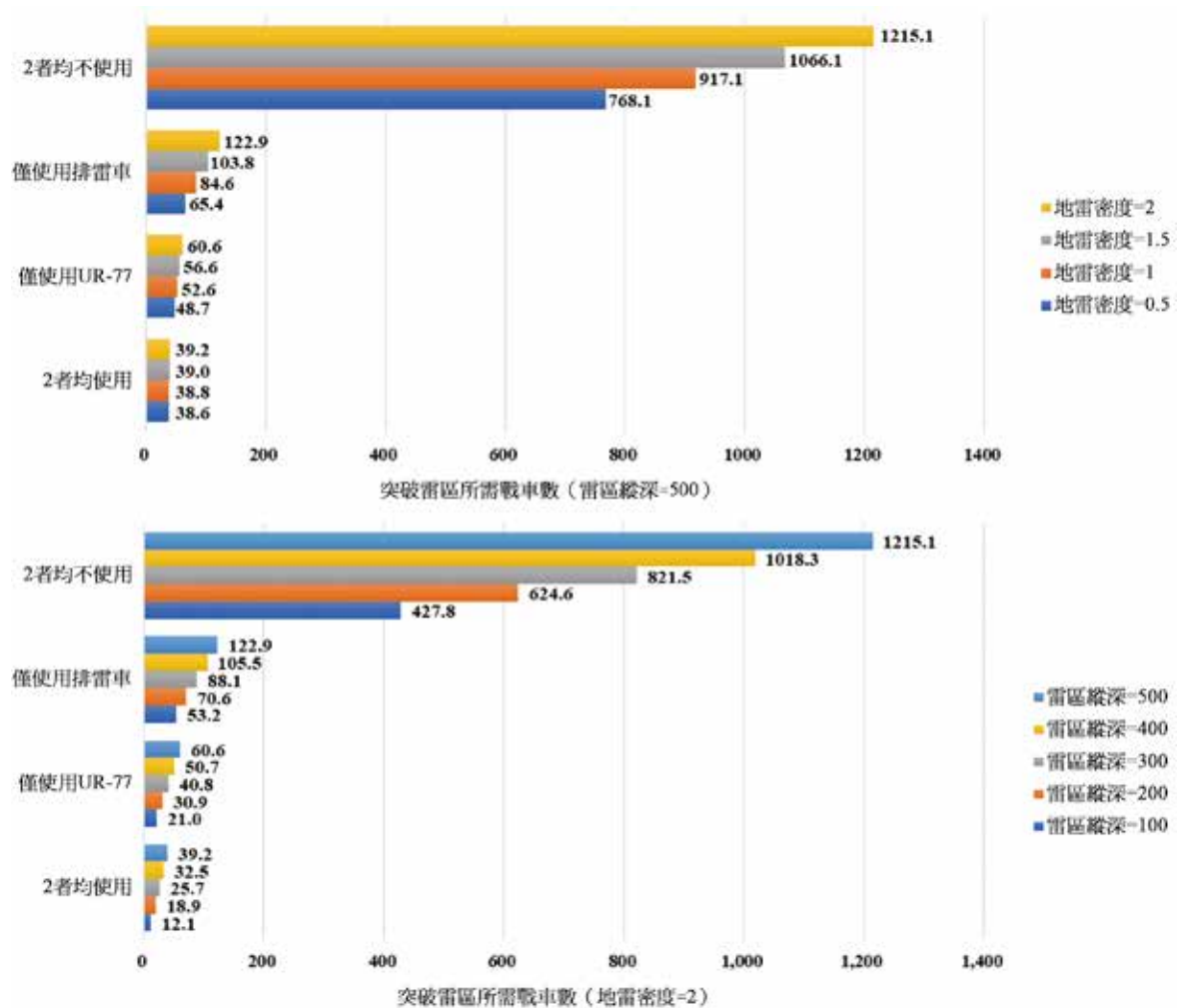


圖7 不同排雷方案下雷區縱深及地雷密度對戰車消耗數量的影響

資料來源：本研究整理。

用1,215.1輛戰車始能突破防線，而這已經完全超過了烏軍所獲得的軍援數量，即使烏軍能順利穿越雷區，恐怕也已耗盡大部分的戰力。如果烏軍使用自俄軍繳獲而來的UR-77，在相同的狀況下則僅需消耗60.6輛戰車，倘再利用排雷車，則只需39.2輛戰車就能突破防線。故而，此模型可協助攻守任一方預知戰果，進而利於自身的戰力保存，抑或是降低傷亡。

然而，模型是系統的簡化。戰場上的各種複雜因素如果都要考量在內，即使是簡化的模型也會變得無比複雜。在本文的案例中，俄軍的防線尚有鐵絲網、反坦克戰壕及龍牙等阻絕工事，後方尚有各類飛彈、火炮及各種空中兵力，若要將這些因素均考量在內，則建模時的資訊需求會更多，建模的整體時間也會隨之增加。當然，克服之法無他，平時可多累積程式庫及數據庫，以待急需之用。

複雜的建模問題尚可透過既有的套裝軟體解決，在國內的軍事作業研究領域中，無論是「延伸式防空模擬模式」(Extended Air Defense Simulation, EADSIM)，或是「合成化戰區作戰研究模式」(Synthetic Theater Operations Research Model, STORM)，帶給建模及分析人員極大的便利；然而，這些軟體也猶如黑盒子，若使用者過度依賴軟體卻不明其學理基礎或其中的運行原理，則易犯了「garbage in, garbage out」的錯誤。因此，期盼藉由本文彰顯建模思維的重要性，並也希望對軍事作業研究相關人員在建模方法的思考上能夠有所助益。

二、後見之明：對俄烏地雷戰的評價

烏軍的大反攻始終未突穿俄軍的防線，顯見蘇洛維金將俄軍的雷區縱深從120公尺增

加至550公尺實屬明智之舉；從本研究的模型來看，在拓寬的雷區縱深下，降低地雷密度依然可以達到不錯的效果。例如，在雷區縱深從120公尺、地雷密度每平方公尺2枚、敵反坦克飛彈來襲間隔為5秒及使用排雷車下，平均戰車損耗的估計值是56.7輛；若雷區縱深增加至500公尺，但地雷密度同時下降至每平方公尺0.5枚，平均戰車損耗的估計值則為65.4輛。這意味著增加4倍雷區縱深下，即使減少4倍地雷密度也不會降低雷區的效果，更何況俄軍若再增加地雷密度，烏軍就更難進雷池一步了。

俄軍設置廣袤的雷場，或許意味著在戰爭初期的攻擊能力不足。模型顯示，從俄軍每減少1秒射擊間隔，可以增加烏軍0.343輛戰車耗損；對烏軍進行密集的射擊雖可有效阻止其推進，然而對俄軍來說，在綿延千里的防線密集設置火力代價不斐，在戰爭初期的短期內也難以辦到。所謂「取用於國，因糧於敵」，利用佔領敵方土地以拓寬雷場，既可阻絕敵軍，進一步則爭取時效以積極從事自身的軍需生產，可以看出俄羅斯打算用時間及空間「等待」出勝利的果實。

烏軍在策略上，挑選縱深較淺或地雷密度較低的雷區是必要的，如果可以選擇，雷區縱深的重要性則優於地雷密度，如此可以較快地穿越雷場。當然，加快行進速度可以彌補縱深較長的缺點，前提是必須要有更好、更多的排雷手段。此外，在模型中，俄軍反坦克飛彈的攻擊對烏軍戰車的損傷效果雖較低，但仍有一定的影響，也並非完全無需留意。

以系統模擬的角度來看，烏軍如欲突破俄軍防線，註定需要承擔大量的戰車耗損，以烏軍原先的戰車庫存加上外國的奧援，其

數量即使可以突破防線，然後續亦可能面臨無戰車可用或是戰車數量少於俄軍的困境。如何提高排雷的有效性，並增加戰車推進的速度，方是突圍成功且能確保反攻持續力的不二法門。可惜的是，烏軍繳獲俄軍的排雷設備太少，獲得他國援助排雷設備的時效又太慢，直到反攻結束，仍在陸續獲得排雷設備。在歷史的後見之明下，吾人仍不經感慨，烏軍在反攻前是否曾做過類似的評估呢？

三、對國軍之借鏡及未來研究方向

在臺海作戰場景中，臺灣可供共軍登陸之地乃在於灘岸上，此與俄烏戰爭中的蘇洛維金防線有著非常顯著的不同；前者為縱深短淺的海灘，後者則多為廣袤的平原。故而，本研究的模擬結果是否能類比在臺海戰爭，並在國軍的建軍備戰上提供建言？恐怕在模型上必須重新設計並另執行模擬。而早在2022年12月29日，美國國務院即宣布對我國出售14套「火山布雷系統」(volcano mine system)，總價計1億8,000萬美元，輿論喧騰一時，甚有媒體稱臺灣即將成為「地雷島」；⁴¹ 究竟是否該採購此類系統，本研究認為這可能涉及到「實然—應然問題」(is-ought problem)，由於筆者並非政策上的決策者，此類有關價值判斷的問題只能留給相關人員自行研析，而模擬的方法則可供為其研析之用。

由於臺灣可供共軍登陸之灘岸大多縱深短淺，且另須考量設置戰壕及阻絕工事的空間，因而無法同蘇洛維金防線般增加雷區縱深；以本研究的模型判斷，僅能提高地雷密度並加強灘岸殲敵之火力，方能增加敵之傷亡。然而，共軍的登陸作戰與烏軍的戰

車衝鋒相去甚遠，攻守雙方必然均涉及了各軍種的聯合作戰，在雙方各種攻守武器的交織影響下，戰況之複雜性可想而知，斷然無法以本研究之方法加以簡化。此時，運用EADSIM或STORM等套裝軟體執行模擬，或為較佳且較有效率之方式；而套裝軟體若無戰鬥階層之功能，本研究之模型可做為輔助之用，為其產製出戰役或戰略層級之模擬參數。

故而，臺海作戰場景中的地雷戰必然交織著攻守雙方多軍種及多武器載台的攻防，此時的地雷戰也並非主角，而是複雜作戰中的一部分。但系統模擬仍會是理解並分析其中堂奧絕佳方法，不但需要基礎的方法，也需要合併運用進階的工具，有待後續進一步地研究將其實現。

(收件：113年3月26日，接受：113年6月25日)

41 同註11。

參考文獻

中文部分

專書

張最良、李長生、趙文志、丁富力，1993。
《軍事運籌學》。北京：軍事科學出版社。

期刊論文

吳珮瑄，2020/5。〈戰術型雷區運用之探討〉，《陸軍工兵半年刊》，頁52-62。
陳甫岳，2022/6。〈機場跑道修復模擬模型之建構〉，《2022第三十屆國防管理學術暨實務研討會論文集上》，頁160-170。
曾祥穎，2023/12。〈俄烏戰爭對我建軍的啟示〉，《陸軍學術雙月刊》，第59卷第592期，頁29-52。

網際網路

Hawk26講武堂，2020/10/12。〈細品：T-62M坦克配備的特殊裝備KMT-6掃雷犁排除地雷的威脅〉，《網易》，<<https://m.163.com/dy/article/FOO5JGAT0515974E.html>>。
Microsoft，〈使用巨集錄製器自動化工作〉，《Microsoft支援》，<<https://support.microsoft.com/zh-tw/office/%E4%BD%BF%E7%94%A8%E5%B7%A8%E9%9B%86%E9%8C%84%E8%A3%BD%E5%99%A8%E8%87%AA%E5%8B%95%E5%8C%96%E5%B7%A5%E4%BD%9C-974ef220-f716-4e01-b015-3ea70e64937b>>。
加德納，2023/9/18。〈烏克蘭對俄軍的反攻是否正在取得進展〉，《BBC中文網》

，<<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/world-66841236>>。

安德烈，2023/10/27。〈烏克蘭反攻為何失敗？〉，《法國國際廣播電台》，<<https://www.rfi.fr/tw/%E4%B8%AD%E5%9C%8B/20231026-%E7%83%8F%E5%85%8B%E8%98%AD%E5%8F%8D%E6%94%BB%E7%82%BA%E4%BD%95%E5%A4%B1%E6%95%97>>。

自由時報，2023/3/9。〈影片曝光！烏軍「溫壓手榴彈」轟爆俄軍步兵戰車〉，《自由時報》，<<https://news.ltn.com.tw/news/world/breakingnews/4234728>>。

自由時報，2023/4/7。〈掃雷車當火砲用，烏軍UR-77「隕石」掃雷車打擊俄軍攻勢〉，《自由時報》，<<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4262967>>。

特種裝備網行業門戶，2022/8/16。〈掃雷機器人一排爆多面手—DOK-ING MV-4多功能排爆機器人〉，《網易》，<<https://www.163.com/dy/article/HESO07600531T8X5.html>>。

張茗喧，2022/9/17。〈澤倫斯基：不反攻俄軍 外國恐減少軍援〉，《中央通訊社》，<<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202209170080.aspx>>。

游凱翔，2023/9/2。〈臺灣會變地雷島？火山布雷系統一篇看懂〉，《中央通訊社》，<<https://www.cna.com.tw/news/aip/202301195006.aspx>>。

新浪軍事，〈普京稱美制戰車坦克正在烏美妙燃燒〉，《微博》，<<https://m.weibo.cn/status/N5fKAgYEZ?jumpfrom>>。

=weibocom>。

外文部分

專書

Averill M. Law, 2007. *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.

Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L Nelson, & David M. Nicol, 2005. *Discrete-event System Simulation*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Jacobs, P. A., 1979. *A Model for the Defense of a Mine Field*. California: Naval Postgraduate School.

網際網路

Andrew Stroehlein, 2022/6/15. "Background Briefing on Landmine Use in Ukraine," Human Rights Watch, <<https://www.hrw.org/news/2022/06/15/background-briefing-landmine-use-ukraine>>.

Andrew Stroehlein, 2022/6/13. "Landmine Use in Ukraine," Human Rights Watch, <<https://www.hrw.org/news/2022/06/13/landmine-use-ukraine>>.

Andrius Genys, "Leopard 2R," Military-Today.com, <https://www.militarytoday.com/engineering/patria_hmbv.htm>.

Armtrac Ltd. "UR-77 Meteorit," WeaponSystems.net, <<https://armtrac.net/wp-content/uploads/SPEC-100-350-MK2-ISS-3.00-10-2018.pdf>>.

Daniel Bpffey, 2023/8/23. "Ukraine Desperate for Help Clearing Mines, Says Defence Minister," The Guardian, <<https://www.theguardian.com/world/2023/aug/13/>

[ukraine-desperate-for-help-clearing-mines-says-defence-minister](https://www.theguardian.com/world/2023/aug/13/ukraine-desperate-for-help-clearing-mines-says-defence-minister)>.

Daniele Palumbo and Erwan Rivault, 2023/5/22. "Ukraine war: Satellite Images Reveal Russian Defences before Major Assault," BBC news, <<https://www.bbc.com/news/world-europe-65615184>>.

David Axe, 2023/9/5. "To Slow The Ukrainian Counteroffensive, the Russian Army Quadrupled The Size of Its Minefields," Forbes, <<https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2023/09/05/to-slow-the-ukrainian-counteroffensive-the-russian-army-quadrupled-the-size-of-its-minefields/?sh=7875cc7669e8>>.

Eve Sampson and Samuel Granados, 2023/7/22. "Ukraine is Now the Most Mined Country. It Will Take Decades to Make Safe," The Washington Post, <<https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>>.

James Cowan, 2023/6/19. "Clear Landmines to Rebuild Ukraine and Feed the World," The Halo Trust, <<https://www.halotrust.org/latest/halo-updates/news/clear-landmines-to-rebuild-ukraine-and-feed-the-world/>>.

Luliia Osmolovska, 2023/4/26. "Walking on Fire Demining in Ukraine," GLOBSEC IDEAS SHAPING THE WORLD, <<https://www.globsec.org/what-we-do/publications/walking-fire-demining-ukraine>>.

MILITARYLEAK.COM, 2020/5/21. "Republic of Korea Army Unveils MV-4 Mineclearing Unmanned Ground Vehicle,"

MILITARYLEAK.COM/Guound Warfare,
<[https://militaryleak.com/2020/05/21/
republic-of-korea-army-unveils-mv-
4-mineclearing-unmanned-ground-
vehicle/#](https://militaryleak.com/2020/05/21/republic-of-korea-army-unveils-mv-4-mineclearing-unmanned-ground-vehicle/#)>.

Pietro Bompreszi, Katelyn Bushnell, André Frank, Ivan Kharitonov, Christopher Schade, Leon Weiser and Christoph Trebesch, 2023/9/7. "Ukraine Support Tracker," The Kiel Institute for the World Economy, <[https://www.ifw-kiel.de/topics/
war-against-ukraine/ukraine-support-
tracker/](https://www.ifw-kiel.de/topics/war-against-ukraine/ukraine-support-tracker/)>.

Valery Zaluzhnyi, 2023/10/27. "Ukraine's Commander-in-chief on the Breakthrough He Needs to Beat Russia," The Economist, <[https://www.economist.com/
europe/2023/11/01/ukraines-commander-
in-chief-on-the-breakthrough-he-needs-to-
beat-russia](https://www.economist.com/europe/2023/11/01/ukraines-commander-in-chief-on-the-breakthrough-he-needs-to-beat-russia)>.