

第四章 關鍵領域氣候變遷風險與衝擊評估

4.1 氣候變遷衝擊影響評估

4.1.1 極端降雨

一、臺南市地文性淹水模式建置

本計畫針對氣候變遷極端降雨對水災之影響評估，已蒐集臺南市歷年災害範圍與規模等資料如圖 4.1-1 所示，透過歷史上曾發生過的莫拉克颱風等災害事件，瞭解以往易淹水之區位。然而，增溫 1.5°C、增溫 2.0°C 等氣候變遷情形屬未來之狀況，目前並未發生，因此勢必透過數值模式模擬方式來針對未來可能狀況做進一步的分析與評估。

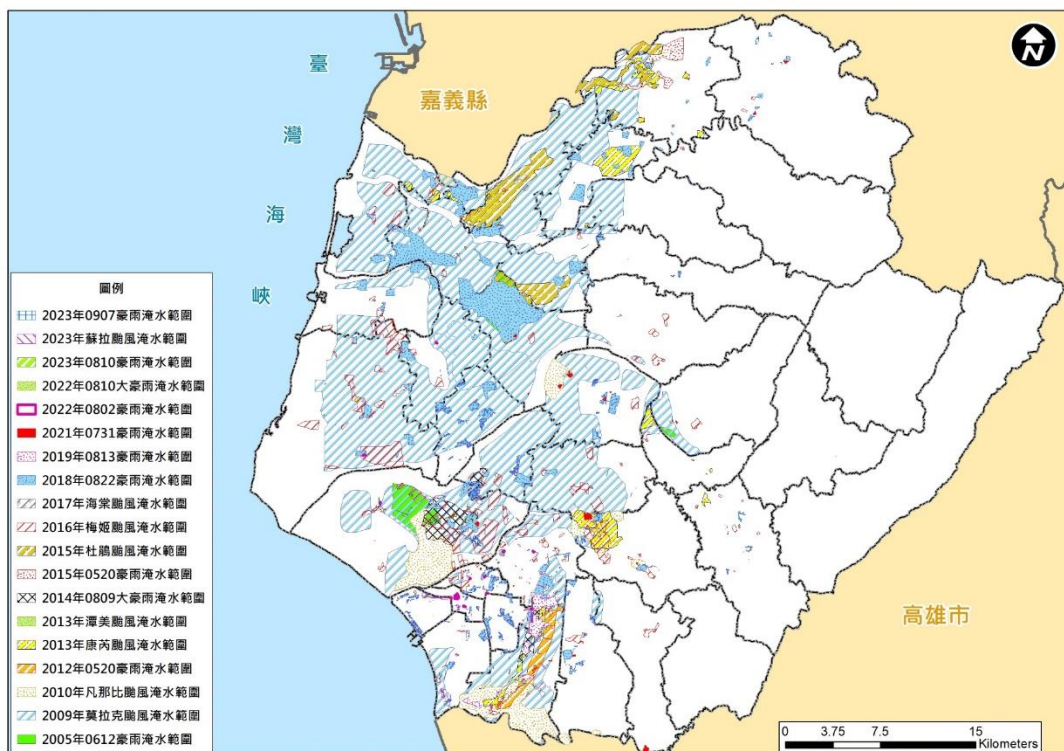


圖4.1-1 臺南市歷年重大颱風豪雨事件災害範圍

針對氣候變遷極端強降雨對水災影響範圍與規模之評估，本計畫係採用成功大學蔡長泰教授發展之地文性淹水模式，透過氣候變遷情境海水位(邊界條件)與降雨量(各種氣候變遷情境)之給定，模擬臺南地區承受之外水溢淹與內水蓄積範圍與程度，進而推估後續危害與風險。

「地文性淹水模式」為成功大學水利系蔡長泰教授所發展之適合台灣地區使用之淹水分析工具，並常為臺南市地區災害防救計畫等相關計畫所採用。由於降雨期間地表逕流、漫地流及渠流之匯聚現象與暴雨淹水氾濫過程相同，因此以擬似二維淹水模式理論發展地文性淹水模式(Physiographic Inundation Model, PI 模式)，可模擬複雜地形、地物、排水路與河系主、支流分布地區之洪水傳播態勢與洪澇淹水情形。由於地文性淹水模式屬分布型模式(distributed model)，因此應用此模式演算「區域降雨—逕流機制與洪流淹水」過程時，必須視不同精度需求將演算區域劃分為若干分區，每一分區視為一控制體，各相鄰分區間以水流連續方程式與流量率連接，以描述演算區域之淹水過程。模式運作相關說明如下：

(一) 分區原則

依據模式特性，將演算區域依下列原則劃分成若干分區(圖 4.1-2)：

1. 每一分區內應具相同水文氣象條件，否則應依水文氣象條件再予以細分，務使分區內具相同水文氣象條件。
2. 分區儘可能以各地物(如道路、堤防、天然岸堤等)為分區邊界，若為寬廣平原而無上述地物時，則依地形、坡度、坡向、地表植被、土地利用、表土質地等資訊，選擇適當分區邊界。
3. 為提高模式計算精度與效率，相鄰分區面積不宜差距過大。
4. 分區若是由陸地劃分而得，則此分區稱為平原分區；分區若是由排水路或河流劃分而得，則此分區稱為渠流分區。
5. 分區若與外界相鄰，則此分區稱為邊界分區；分區若不與外界相鄰，則此分區稱為內部分區。

對於分區有下列假設：

1. 每一分區中，假設有一在洪水期間均能正確辨識流向之處，該處稱為分區中心。
2. 每一分區水面假設為水平，可由分區中心之水位，代表整個分區水位，該水位稱為分區特性水位。
3. 假設分區蓄水量只與該分區特性水位有關。

4. 假設某特定時刻相鄰兩分區間之流量，只為該時刻此兩分區特性水位之函數。

(二) 水流連續方程式

任一分區 i 與其相鄰各分區間之水流連續方程式可表如下式：

$$A_{si} \frac{dh_i}{dt} = P_{ei} + \sum_k Q_{i,k}(h_i, h_k) \quad (4-1)$$

式中：

A_{si} 為 t 時刻 i 分區之水表面積；

P_{ei} 為 t 時刻 i 分區之有效降雨率，等於有效降雨強度與 i 分區面積之乘積；

$Q_{i,k}$ 為由 k 分區流入 i 分區之流量，正值代表水流由 k 分區流入 i 分區，負值代表水流由 i 分區流入 k 分區；

h_i 為 t 時刻 i 分區之水位；

h_k 為 t 時刻 k 分區之水位。

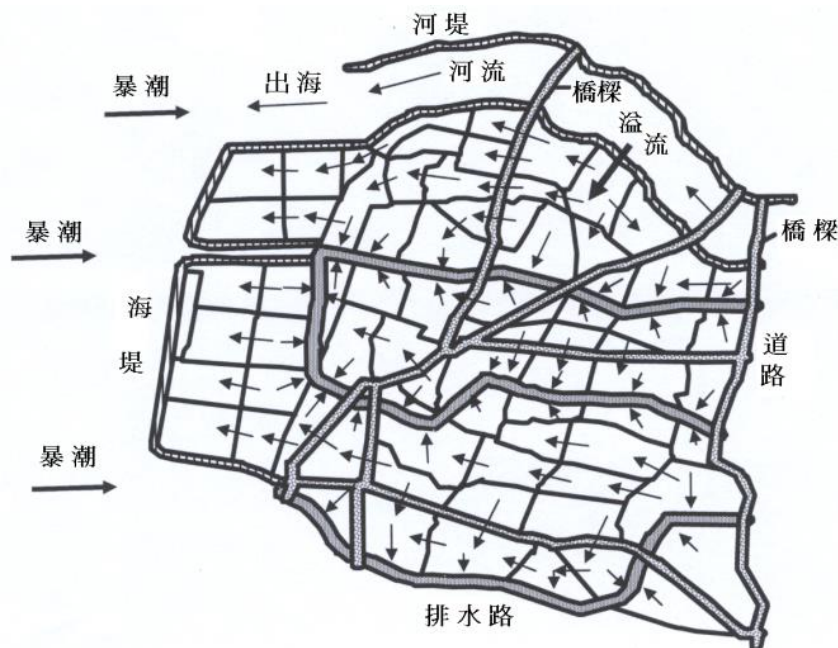


圖4.1-2 地文性淹水模式分區劃分示意圖



(三) 演算範圍

因縣市或鄉鎮市區間之界線並非絕對以分水嶺作為劃分依據，故若欲評估全臺南市之淹水潛勢，則必須將臺南市臨近之相關流域納入演算範圍，完全涵蓋八掌溪、急水溪、曾文溪、將軍溪等沿海河系、曾文溪、鹽水溪與二仁溪等流域。

(四) 計算格區之佈置

淹水潛勢分析計算格區之佈置係依據地形、地貌、道路、土地使用狀況與水工構造物等進行劃分，而本計畫在地形部分係透過精度 $1m \times 1m$ 數值地形圖(圖 4.1-3)、流域邊界與村里界等完成格區初步之佈置，再透過主要道路、河川、水庫、排水系統、堤防等進一步細分計算格區，最後則透過衛星影像劃分住宅區或部分特定區域，包括都會區街廓、道路等形狀。

除上述計算網格之佈置外，在地文性淹水模式中工程參數的改變能直接改變淹水模擬的結果，因此必需彙整蒐集並更新治水工程相關參數至模式中。治水工程參數的建置包括滯洪池之滯洪量(滯洪池分布如圖 4.1-4)、抽水站(分布如圖 4.1-5)及抽水機(含移動式及沉水式，分布如圖 4.1-6~圖 4.1-7)抽水量，另包括最新的河川、區域排水與雨水下水道(分布如圖 4.1-8)等相關資料。

依上述地形、地貌、土地利用、道路街廓、治水工程完成本計畫淹水模式計算格網佈置，如圖 4.1-9 所示。

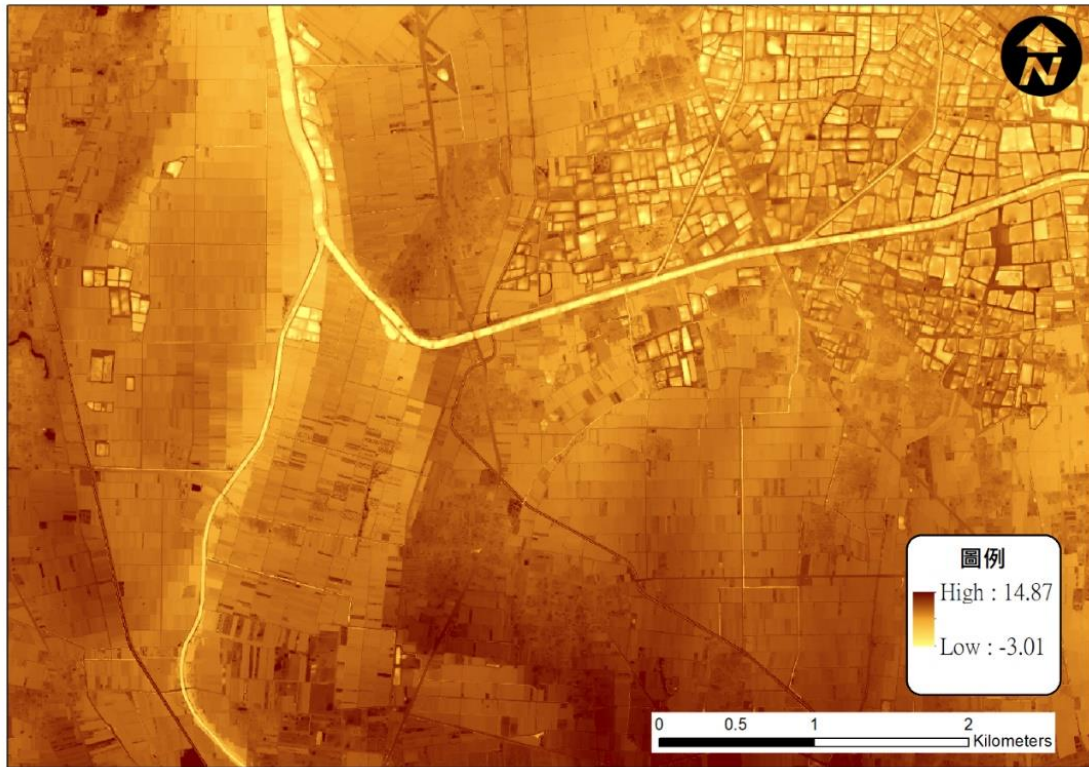


圖4.1-3 淹水潛勢分析採用之 1m × 1m 數值地形圖(摘錄示意)

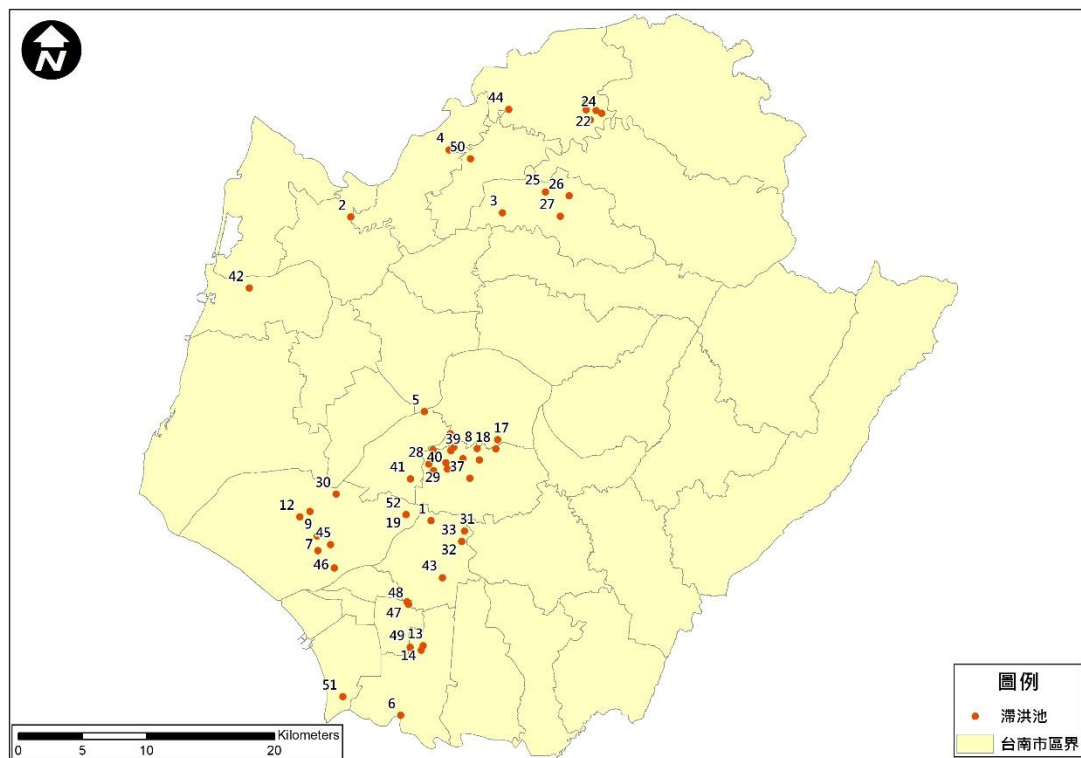


圖4.1-4 臺南市淹水模式採用水利設施-滯洪池分布圖

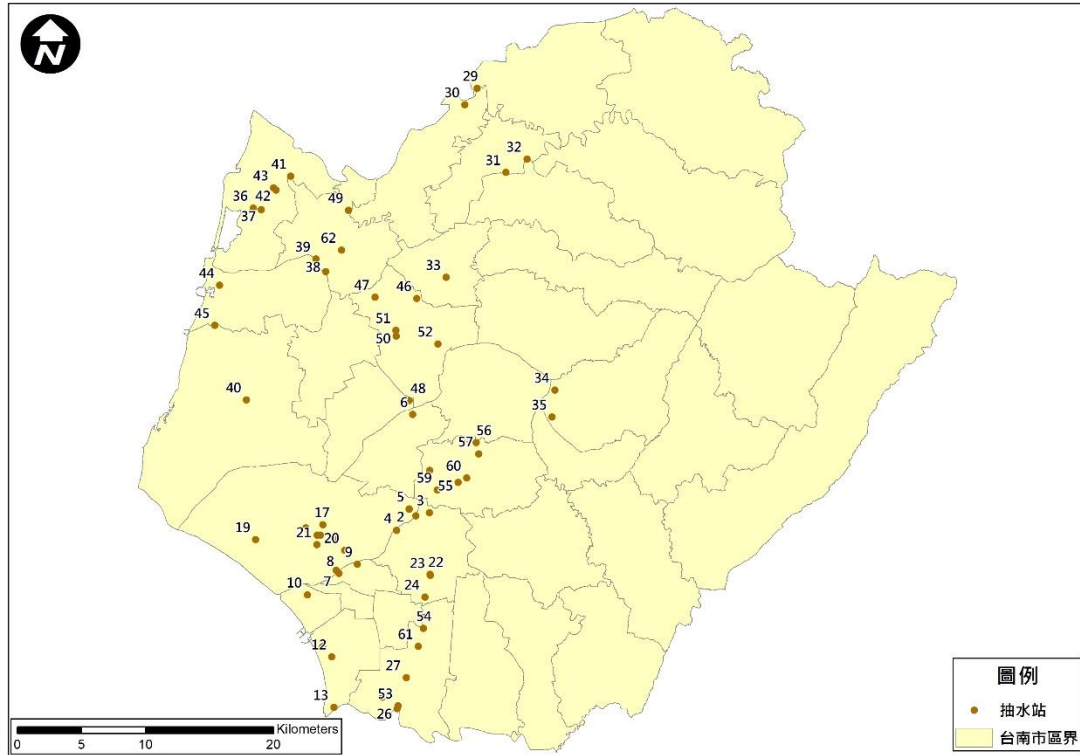


圖4.1-5 臺南市淹水模式採用水利設施-抽水站分布圖

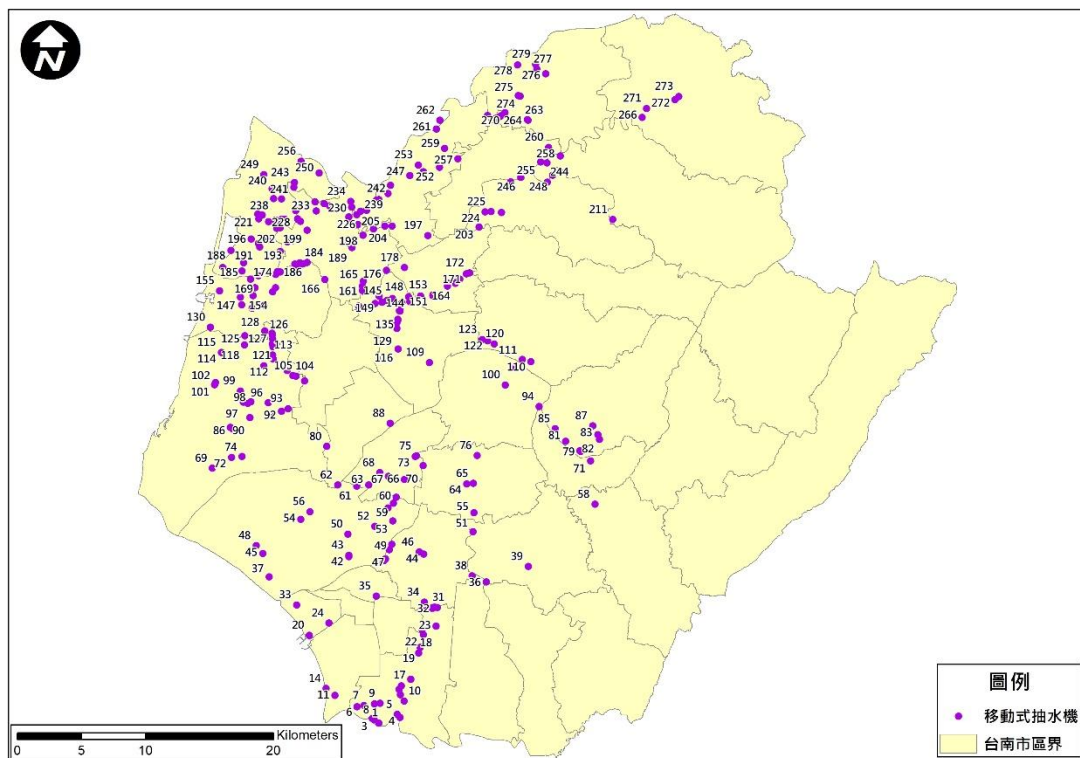


圖4.1-6 臺南市淹水模式採用水利設施-移動式抽水機分布圖

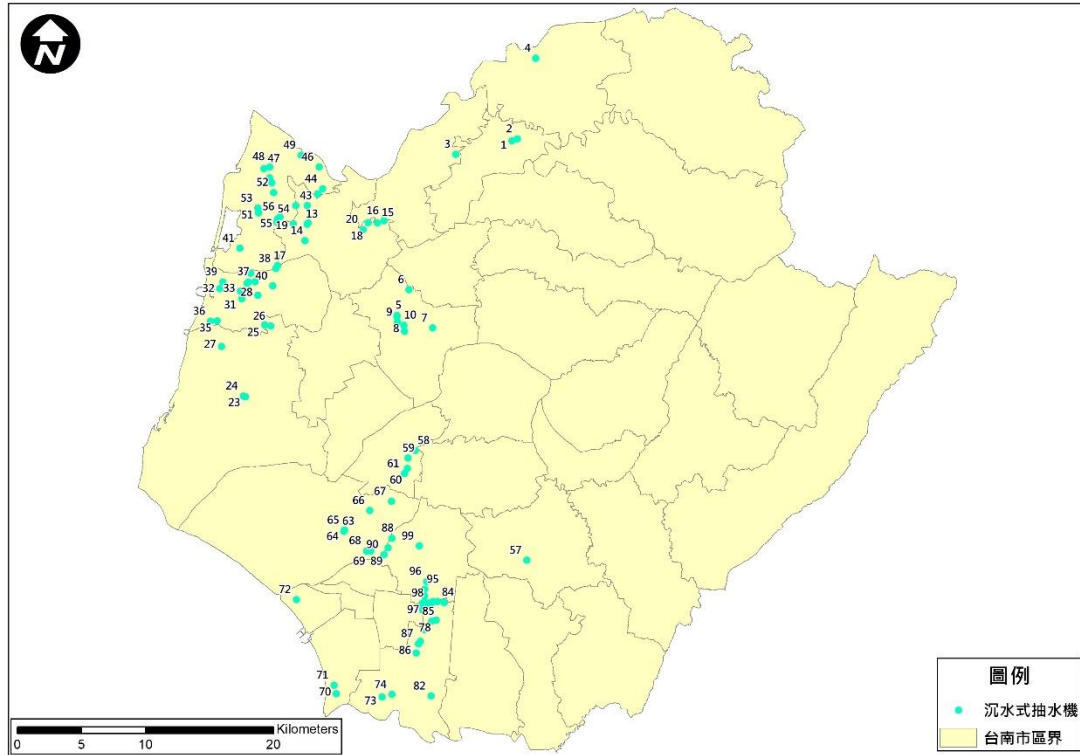


圖4.1-7 臺南市淹水模式採用水利設施-沉水式抽水機分布圖

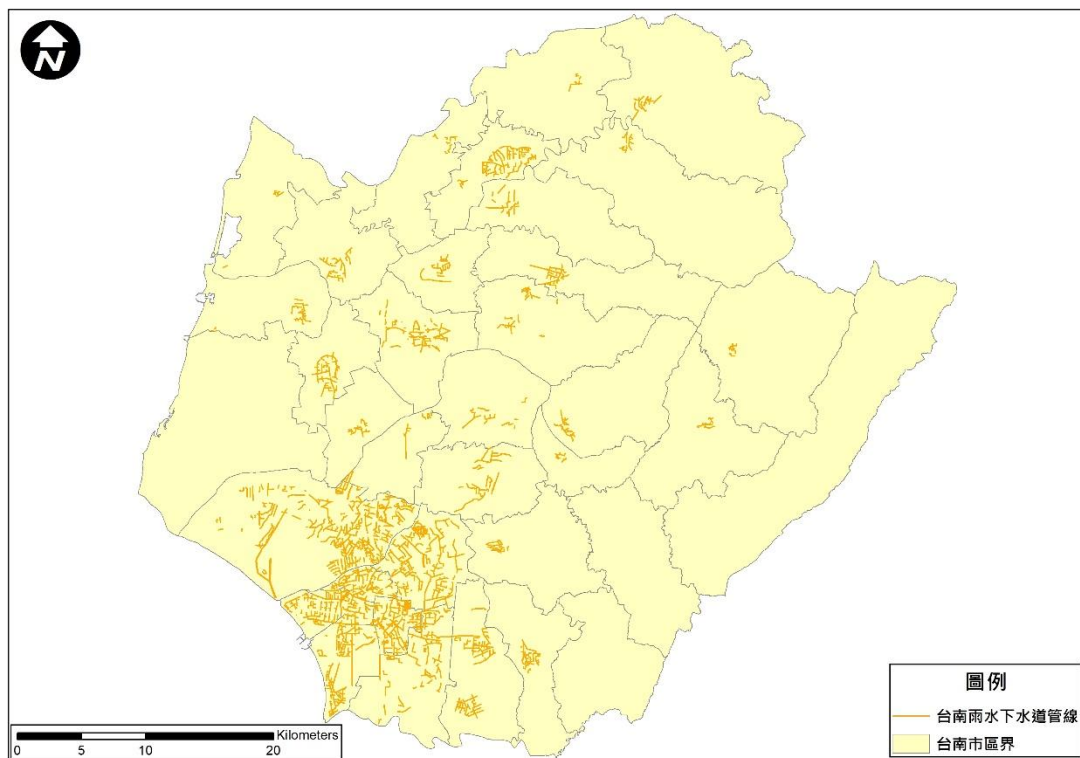


圖4.1-8 臺南市淹水模式採用雨水下水道分布圖

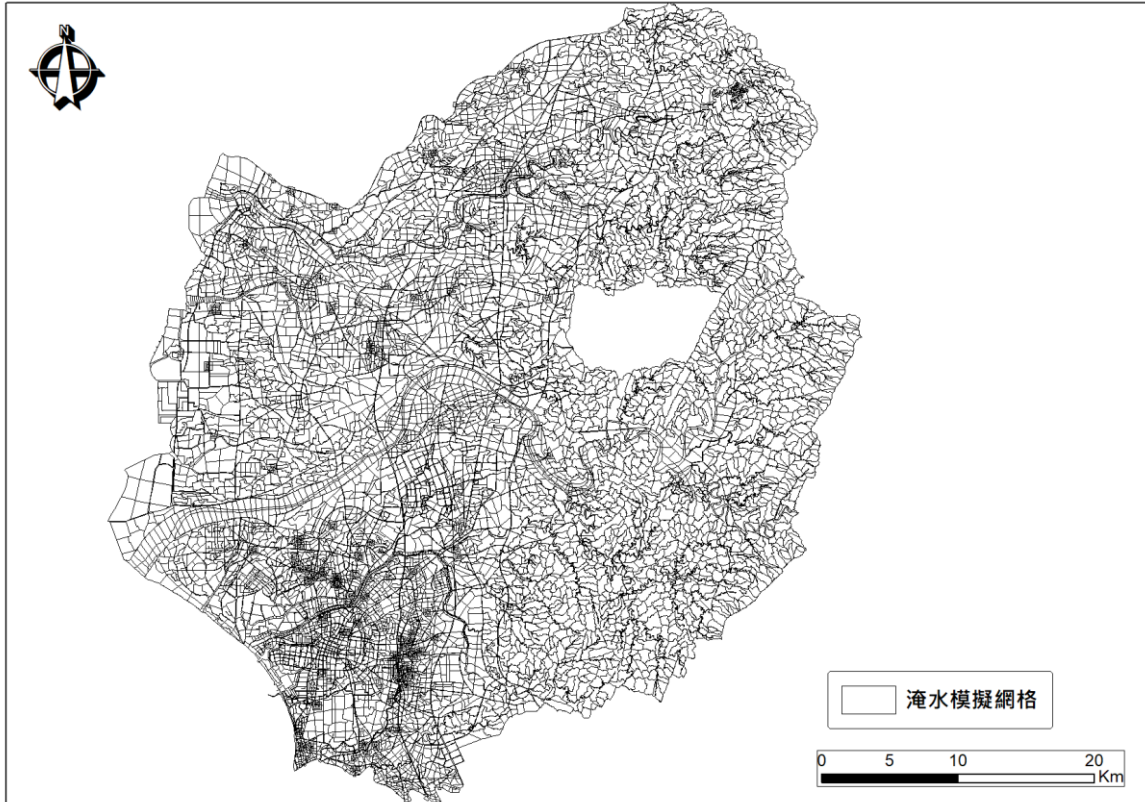


圖4.1-9 臺南市地文性淹水模式模擬網格示意圖

(五) 模式檢核

本計畫已針對模式進行檢核，使模式能反映真實災害情形後再投入氣候變遷情境之模擬，以莫拉克颱風事件驗證為例，模式以當時之地文條件、工程條件以及降雨量、水庫洩洪水量等進行淹水模擬分析，依所得結果可繪製臺南市最大淹水深度圖，若與莫拉克颱風期間 119 接獲民眾淹水受困之通報地點比較，可繪製二者套疊圖如圖 4.1-10 所示。由圖比較可看出莫拉克颱風期間民眾淹水受困之實際地點與模式分析出之淹水較深位置大部分皆吻合。

除早期較極端之莫拉克颱風檢校外，亦挑選近年相對大型降雨事件進行檢校，檢核之事件為 107 年 0823 豪雨事件，以該事件模擬結果與淹水調查圈繪範圍進行比對如圖 4.1-11 所示。由該圖可看出此次事件淹水調查圈繪範圍在模擬結果中多同樣呈現淹水之狀況，捕獲率約為 70%，顯示模式模擬結果相當值得參考。

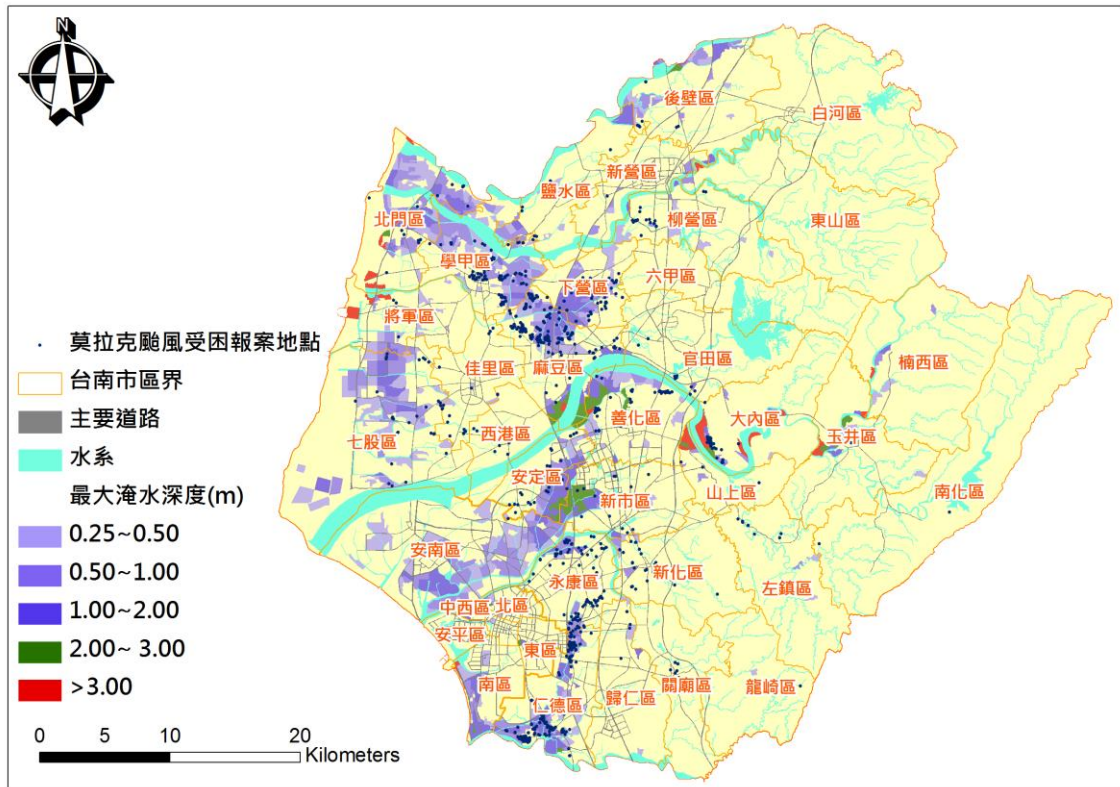


圖4.1-10 臺南市地文性淹水模式驗證範例-莫拉克颱風

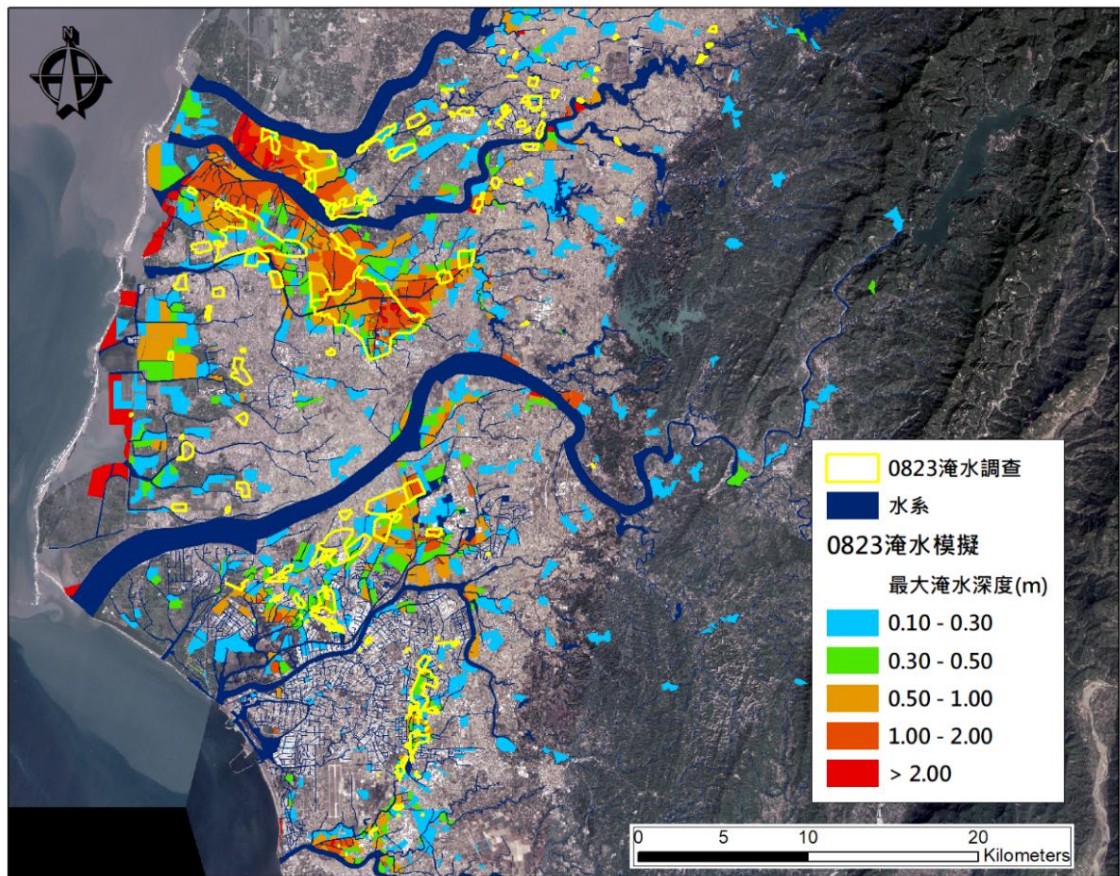


圖4.1-11 臺南市地文性淹水模式驗證範例-107 年 0823 豪雨

二、 極端降雨情境模擬

完成前述地文性淹水模式後，即可藉由不同情境外海潮位、水庫洩洪量及各地降雨量的輸入，完成不同水文情境下淹水深度的模擬作業。而針對氣候變遷情境之模擬，由於需比較氣候變遷前、後之差異，因此係先模擬「基期情境」作為變遷前模擬，而氣候變遷後則依變遷的劇烈程度分為「增溫 1.5°C 情境」與「增溫 2.0°C 情境」，各情境所用水文條件及模擬結果說明如下：

(一) 基期情境模擬

依據本計畫相關氣候變遷情境設定，基期之時間係定為 2014 年，因此本計畫採用「臺南市政府 103 年度災害防救深耕計畫」(2014)中，淹水模擬時採用之水文條件作為基期水文資料的設定。由於臺南市區排治水保護標準為 10~25 年，而河川保護標準則為 50~100 年，因此模擬時選用 2014 年水文資料中的 10 年重現期、25 年重現期、50 年重現期、100 年重現期等 4 種降雨分析結果作為淹水模式降雨量設定。在 2014 年資料中，各雨量站各重現期距一日暴雨事件之降雨量如表 4.1-1 所示，並將該表一日雨量值搭配各雨量站之一日雨型(參照經濟部水資源局「水文設計應用手冊」，民國 90 年)，估算各雨量站在各重現期距下之一日暴雨雨量組體圖。以北門站與白河站為例，其設計雨型如圖 4.1-12 所示；以白河站為例，100 年重現期距之一日暴雨雨量組體圖則如圖 4.1-13 所示。在地文性淹水模式中，各淹水模式計算網格可依徐昇網分配至相對應之雨量站(圖 4.1-14)，並採用各雨量站雨量值作為輸入參數。

在邊界條件部分，沿海邊界條件採用將軍潮位站之平均大潮歷線評估值(圖 4.1-15)，銜接水庫之區域則設定適當的水庫洩洪歷線作為邊界條件。其餘邊界則假設為封閉邊界，無流量交換情形。前述水庫洩洪歷線，亦參考 2014 年設定情形，在 25~100 年重現期一日降雨事件時，採用各水庫於莫拉克颱風期間洩洪歷線(圖

4.1-16)之 0.5 倍作為輸入條件；10 年重現期一日降雨事件時則假設水庫未洩洪。

以上述降雨條件與潮位、水庫洩洪量等邊界條件進行臺南市地文性淹水模式之模擬作業，可得基期情境下各重現期淹水模擬深度如圖 4.1-17~圖 4.1-20 所示，由圖可看出在基期情境下，臺南市 10~25 年重現期事件即有部分區位有淹水狀況，如曾文溪以北的沿海低地、麻豆與下營等低窪區、曾文溪以南則有安南、安定、新市、永康、仁德等行政區有淹水狀況，這些在基期情境已有淹水問題的行政區在氣候變遷情況下預期將受到更嚴重的淹水課題。

表4.1-1 古亭坑等雨量站基期情境各重現期一日暴雨量

站名	10 年(mm)	25 年(mm)	50 年(mm)	100 年(mm)
古亭坑	422	462	473	506
崎頂	371	415	428	464
木柵	411	451	463	497
媽祖廟	321	348	356	377
虎頭埤	362	402	414	448
台南	411	466	482	530
左鎮	380	467	497	600
新市	411	466	482	530
和順	323	370	383	424
北寮	380	467	497	600
善化	356	413	431	485
大內	394	449	466	517
玉井	392	467	493	574
七股寮	337	401	421	483
環湖	475	558	583	662
關山	665	768	800	894
佳里	326	385	404	462
楠西	412	493	520	604
曾文	532	650	688	806
王爺公	398	495	529	647
下營	402	486	513	598
北門	341	410	432	499
東原	441	542	575	677
新營	364	418	434	485
東河	392	492	527	646
大棟山	428	511	539	624

站名	10 年(mm)	25 年(mm)	50 年(mm)	100 年(mm)
馬頭山	606	724	760	867
白河	453	564	600	713
關仔嶺	544	638	667	757
岸內	345	396	412	461
小公田	488	582	611	700
龍美	617	743	783	907
南靖	368	436	458	523
中埔	488	582	611	700
大湖	662	821	871	1027

資料來源：「臺南市政府 103 年度災害防救深耕計畫」(2014)

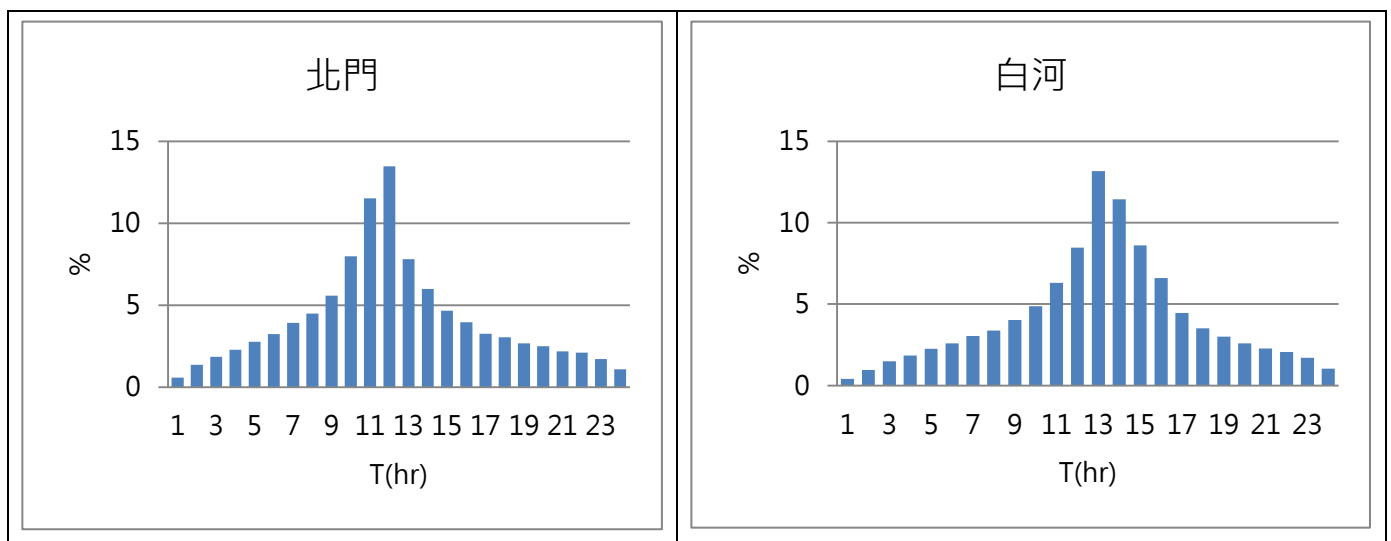


圖4.1-12 北門等雨量站一日暴雨設計雨型

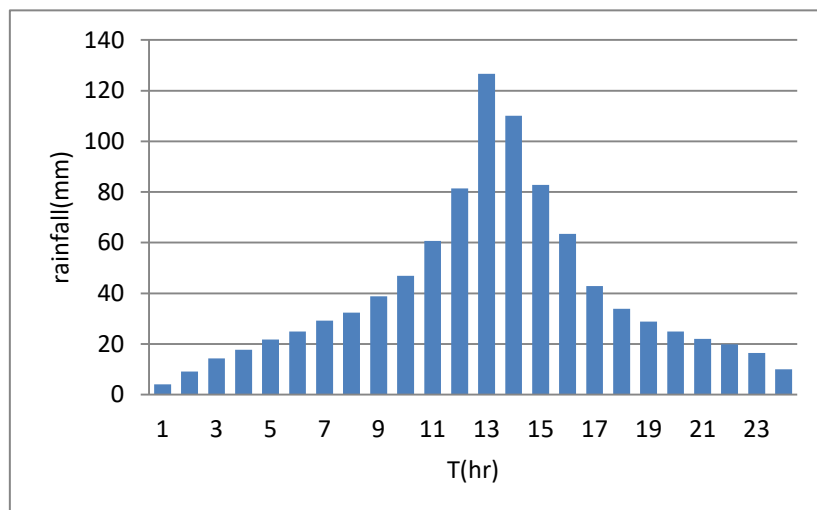


圖4.1-13 白河雨量站重現期距 100 年一日暴雨組體圖

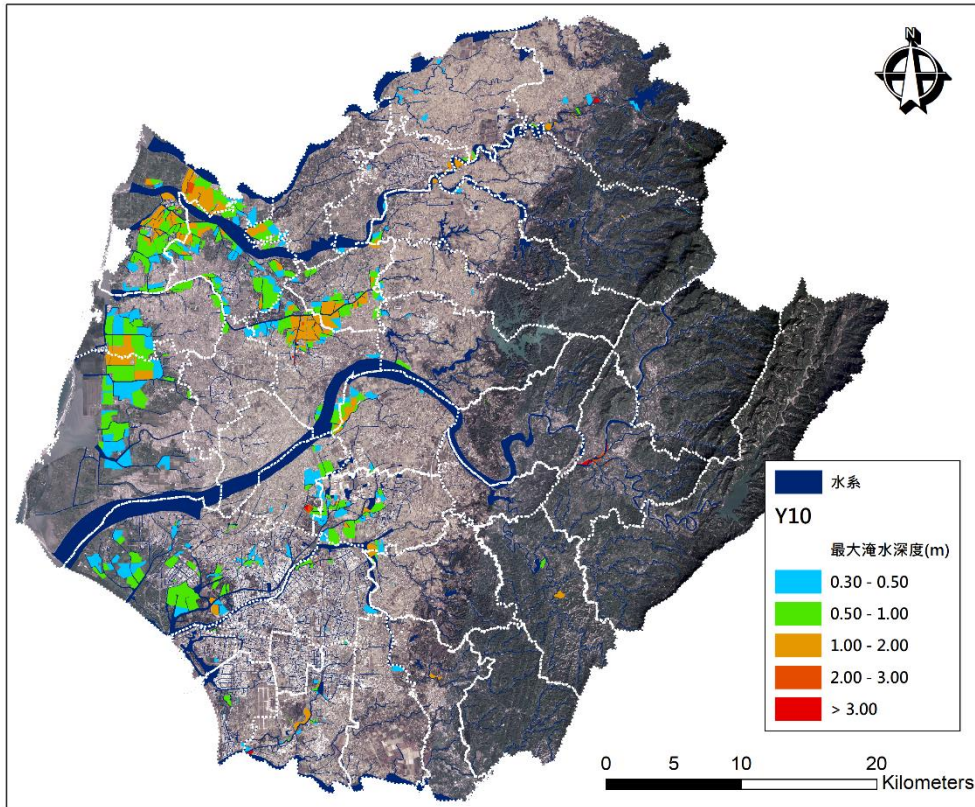


圖4.1-17 臺南市淹水模擬淹水深度-基期情境 10 年重現期降雨事件

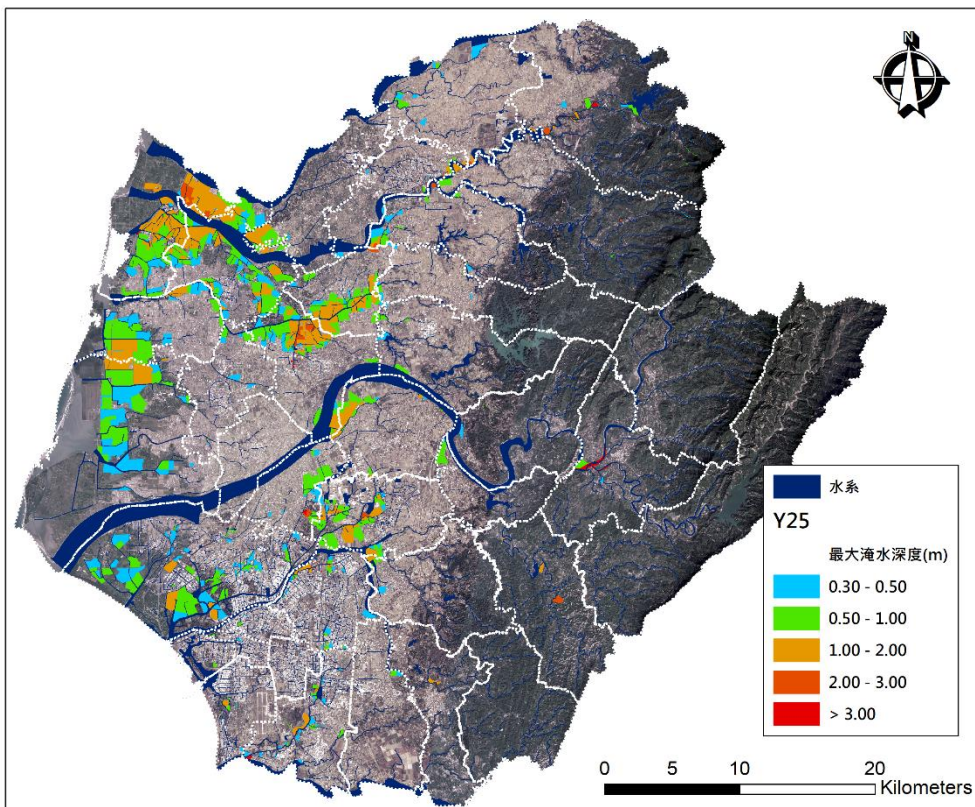


圖4.1-18 臺南市淹水模擬淹水深度-基期情境 25 年重現期降雨事件

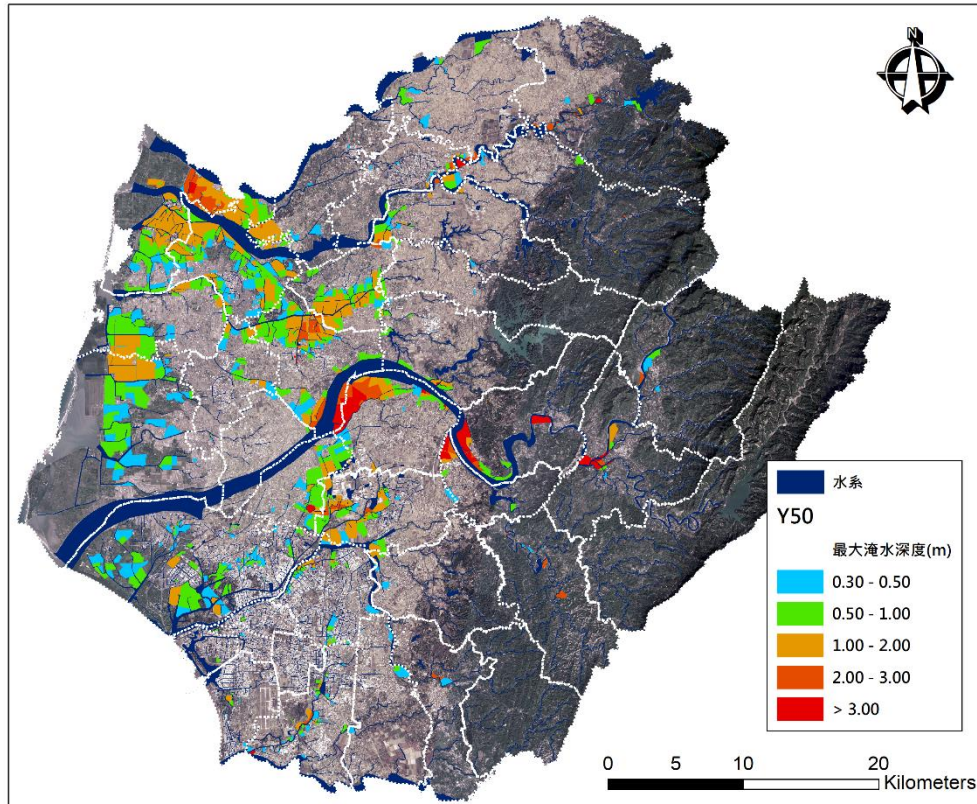


圖4.1-19 臺南市淹水模擬淹水深度-基期情境 50 年重現期降雨事件

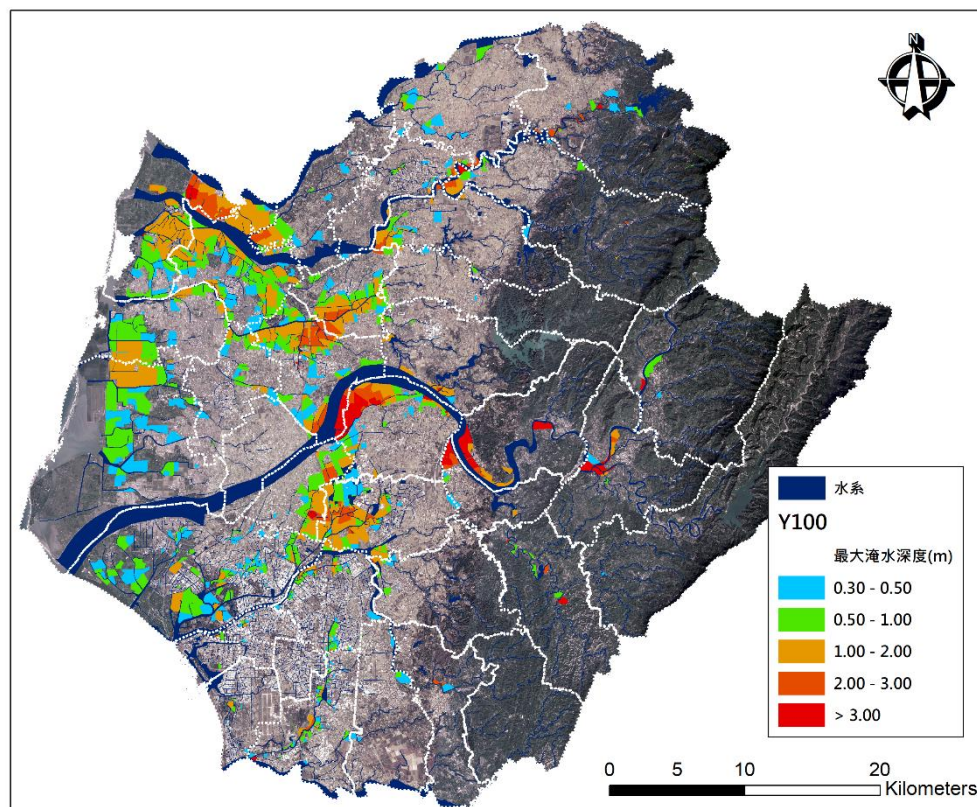


圖4.1-20 臺南市淹水模擬淹水深度-基期情境 100 年重現期降雨事件

(二) 增溫 1.5°C 與增溫 2.0°C 情境模擬

完成基期模擬後，以同樣的淹水模式搭配氣候變遷情境下的水文條件改變量重新模擬，即可得氣候變遷情境下的淹水模擬結果，因此需先針對氣候變遷情境下，水文條件的改變狀況進行設定。本計畫先根據氣候變遷 AR6 模擬結果中降雨分析結果進行分析，由於 AR6 模擬結果中僅有日雨量資料並無逐時雨量資料，故無法直接引用至淹水模式中，因此本計畫係就 AR6 模擬結果進行變化趨勢的分析，透過該結果中日均雨量之變化幅度，帶入至原基期設定的水文條件中。舉例來說，若增溫 1.5°C 階段的平均日雨量相對於基期期間平均日雨量增加 10%，那模擬增溫 1.5°C 之淹水狀況時，降雨量部分將一併增加 10% 來做為該情境之水文條件輸入模式中。

1. 氣候變遷降雨條件給定

本計畫針對基期期間與增溫 1.5°C、增溫 2.0°C 期間的日均雨量來進行統計分析，若將各情境期間一年四季每日的日雨量資料進行平均，則可得各情境平均日雨量如圖 4.1-21~圖 4.1-23 所示。由圖可知以全年平均去看氣候變遷日雨量變化，整體增加幅度並不明顯，尤其是增溫 1.5 度~2.0 度之間。若採用上述統計分析方式，但排除不易下雨的非汛期期間，僅採用汛期(5 月~10 月)的資料進行統計，則可得各情境平均日雨量如圖 4.1-24~圖 4.1-26 所示；同理，若只採用容易發生颱風等大型降雨事件的夏季期間(7 月~9 月)資料進行統計，則可得各情境平均日雨量如圖 4.1-27~圖 4.1-29 所示。

由上述各圖可看出，採用全年資料或汛期資料所得結果相似，增溫 1.5°C、增溫 2.0°C 與基期之間的差異並不十分顯著，但僅採用夏季期間資料時，基期至增溫 1.5°C 之間或者增溫 1.5°C 至增溫 2.0°C 之間，平均日雨量皆有十分顯著的增加。將圖 4.1-21~圖 4.1-23 與圖 4.1-27~圖 4.1-29 做進一步之計算，可



得基期至增溫 2.0°C 間，分別採用不同統計區間之日平均雨量增幅如圖 4.1-30~圖 4.1-32 所示，由圖可看出若以全年數據去平均，臺南市各地日雨量增幅 6%~17% 間；若以汛期數據去平均，日雨量增幅 6%~18% 間；若以夏季數據去平均，則日雨量增幅 20%~35% 間。此結果說明氣候變遷對臺南市全年總雨量的影響並不十分顯著，但會使得降雨更集中於夏季期間，可能使得大型颱風豪雨事件之降雨量顯著增加，造成臺南市更嚴峻之淹水問題。

由於近年臺南市較大型的淹水事件如莫拉克颱風或 107 年 0823 豪雨等事件皆發生於夏季期間，因此本計畫採用基期情境與氣候變遷情境間之夏季日平均雨量增幅作為臺南市氣候變遷情境之設定降雨條件。並依據不同淹水網格搭配前述分析成果，指定不同淹水網格有不同增幅量(相對於基期情境模擬時之降雨量參數)，將各情境增幅量加成至基期雨量條件中。以增溫 2.0°C 情境為例，各網格降雨量增加幅度如圖 4.1-33 所示。以圖 4.1-34 所點取之位置為例，基期情境、增溫 1.5°C 情境與增溫 2.0°C 情境下，其 100 年重現期一日降雨組體圖設定分別如圖 4.1-35~圖 4.1-37 所示。

2. 氣候變遷水庫洩洪量與外海潮位條件給定

在水庫洩洪量部分，亦依上述增幅量統計結果，採取各水庫所在位置之增幅比例加到基期模擬時採用之洩洪量歷線中，作為各氣候變遷情境的上游邊界條件；而下游邊界之沿海潮位部分，則在原本的平均大潮歷線上，平均加上海平面上升高度作為各氣候變遷情境的下游邊界條件，採增溫 1.5°C 情境下上升 20 公分，增溫 2.0°C 情境下上升 35 公分。

3. 氣候變遷情境各重現期降雨事件模擬結果

透過上述氣候變遷情境下降雨條件與潮位、水庫洩洪量等邊界條件的給定，完成氣候變遷條件下的臺南市淹水模擬作業，

所得結果如圖 4.1-38~圖 4.1-45 所示。由上述各圖可看出，相較於基期情境，氣候變遷情境下淹水情形加劇，氣候變遷情境 25 年重現期淹水狀況約相當於基期情境下 50~100 年重現期淹水狀況。

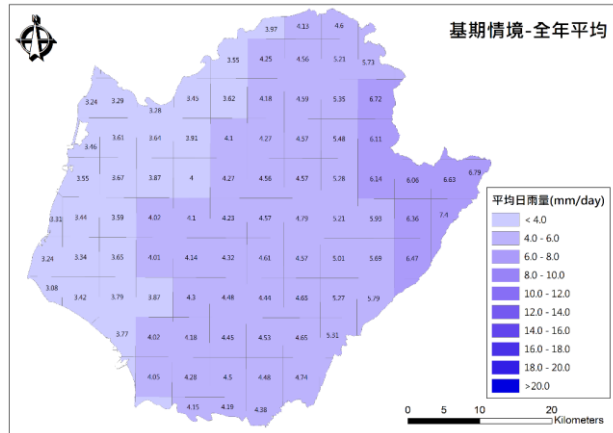


圖4.1-21 臺南市基期情境全年平均日雨量

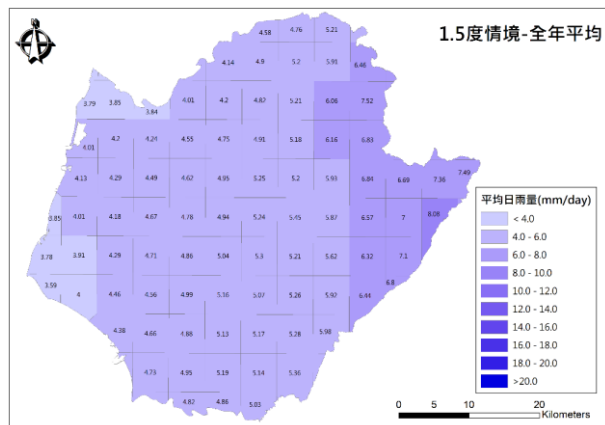


圖4.1-22 臺南市增溫 1.5°C 情境全年平均日雨量

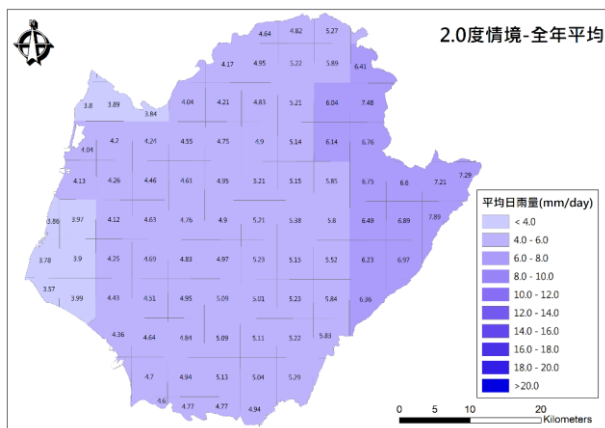


圖4.1-23 臺南市增溫 2.0°C 情境全年平均日雨量

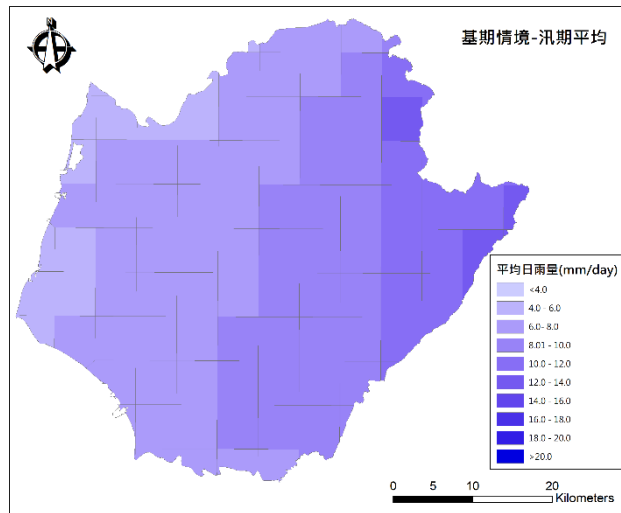


圖4.1-24 臺南市基期情境汛期平均日雨量

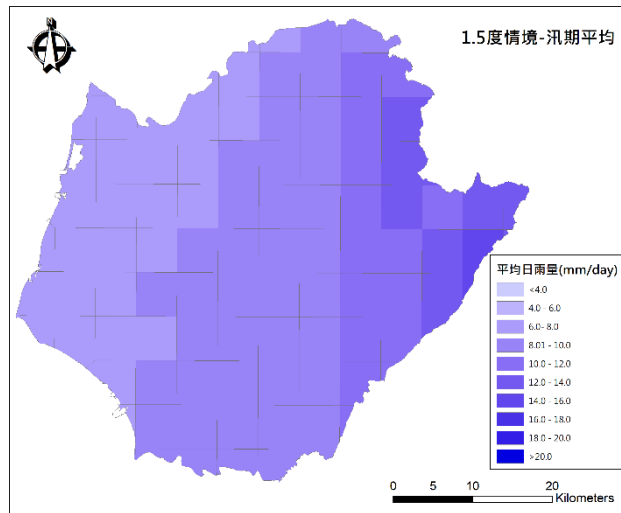


圖4.1-25 臺南市增溫 1.5°C 情境汛期平均日雨量

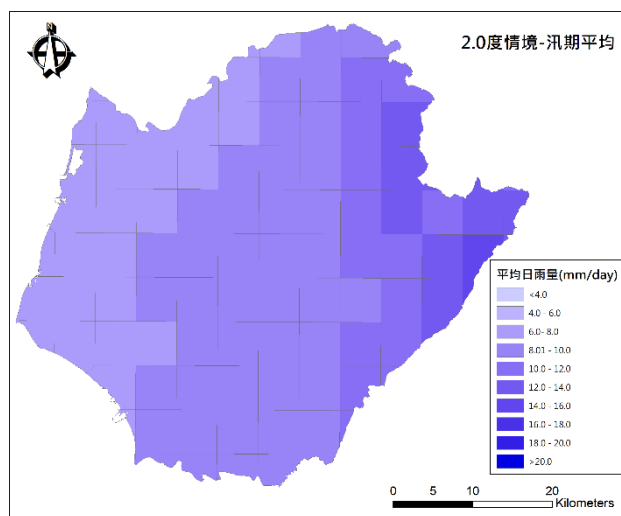


圖4.1-26 臺南市增溫 2.0°C 情境汛期平均日雨量

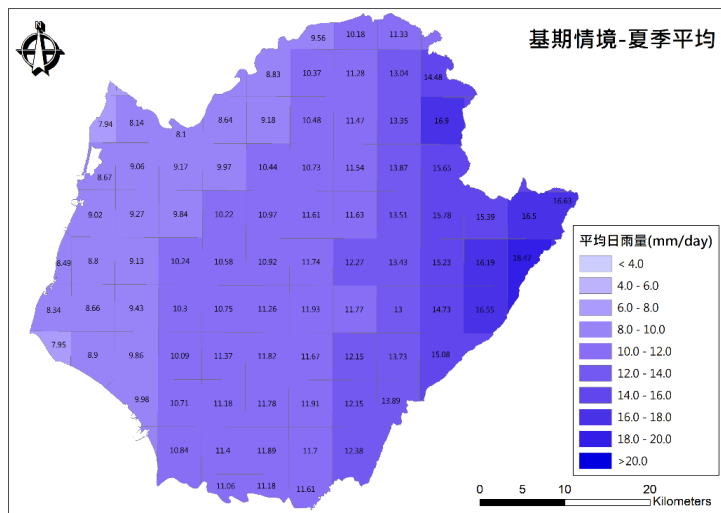


圖4.1-27 臺南市基期情境夏季平均日雨量

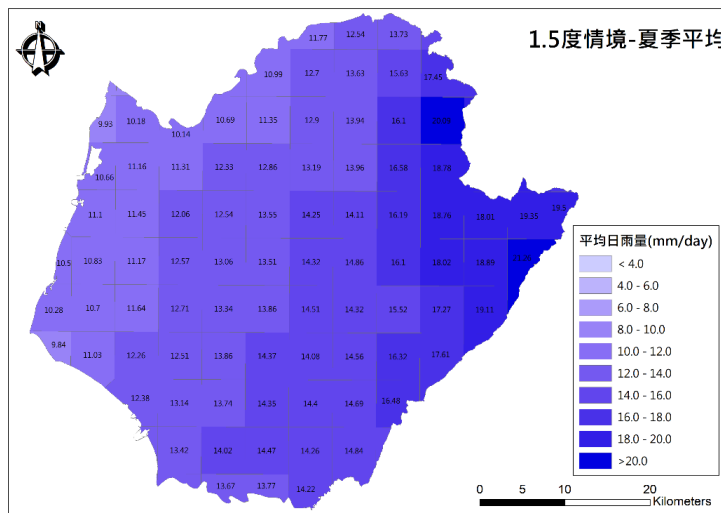


圖4.1-28 臺南市增溫 1.5°C 情境夏季平均日雨量

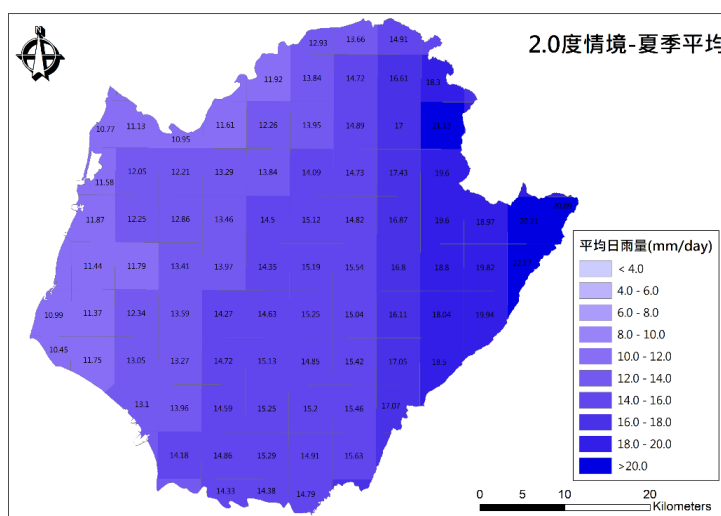


圖4.1-29 臺南市增溫 2.0°C 情境夏季平均日雨量

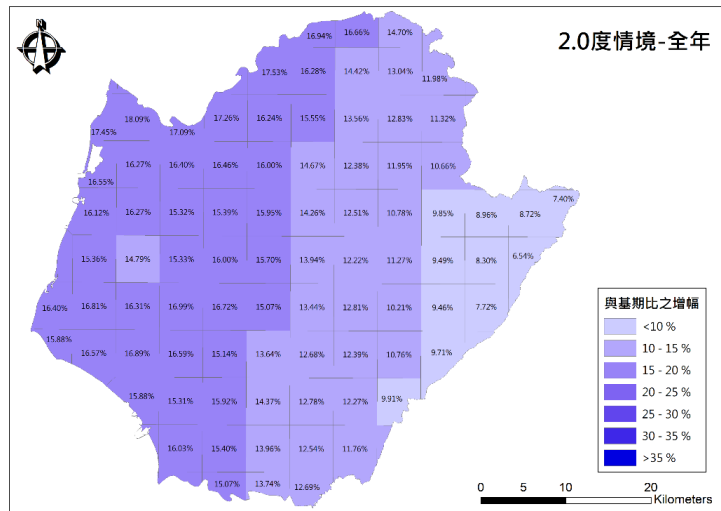


圖4.1-30 臺南市增溫 2.0°C 相較於基期情境之全年日雨量增加比例

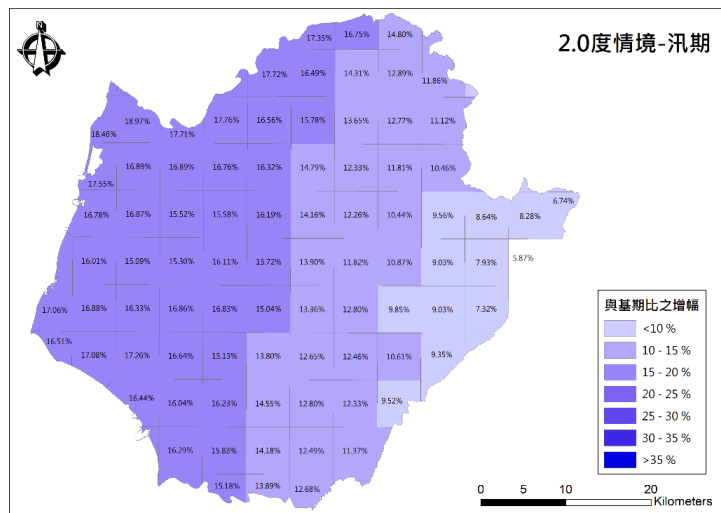


圖4.1-31 臺南市增溫 2.0°C 相較於基期情境之汛期日雨量增加比例

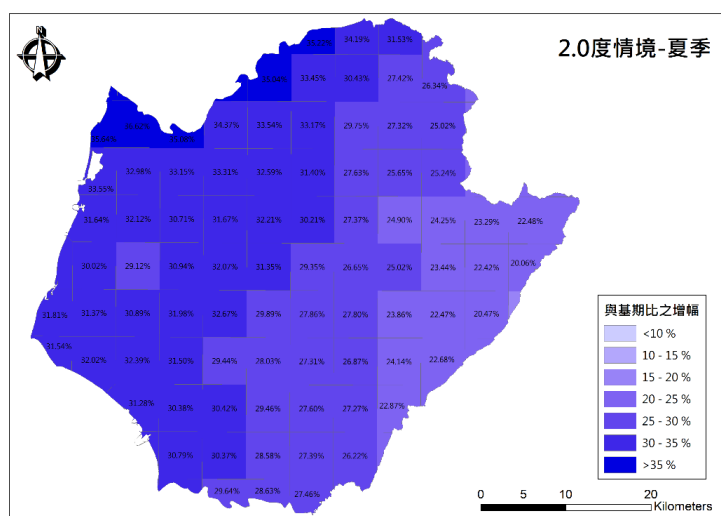


圖4.1-32 臺南市增溫 2.0°C 相較於基期情境之夏季日雨量增加比例

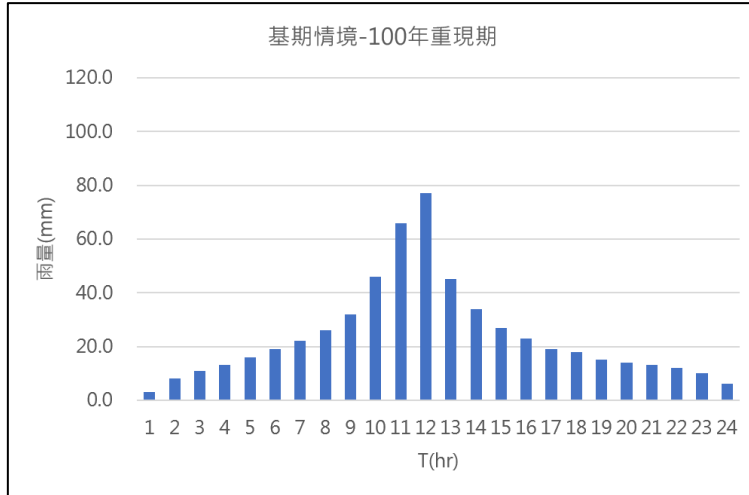


圖4.1-35 示範淹水網格設計降雨組體圖-基期情境 100 年重現期

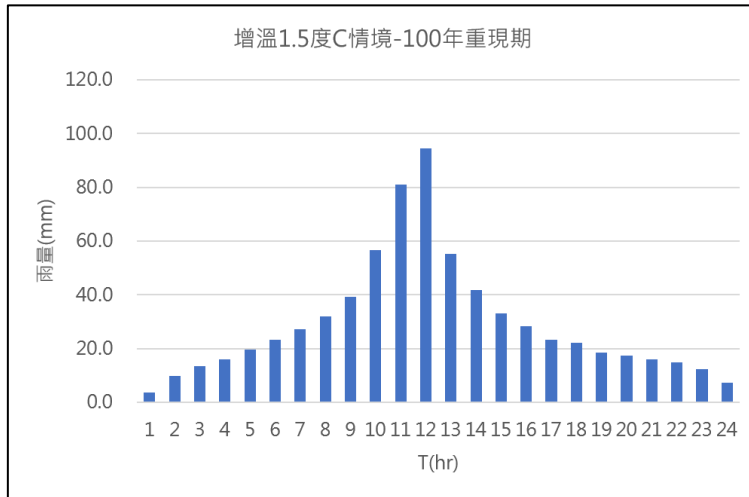


圖4.1-36 示範淹水網格設計降雨組體圖-增溫 1.5°C 情境 100 年重現期

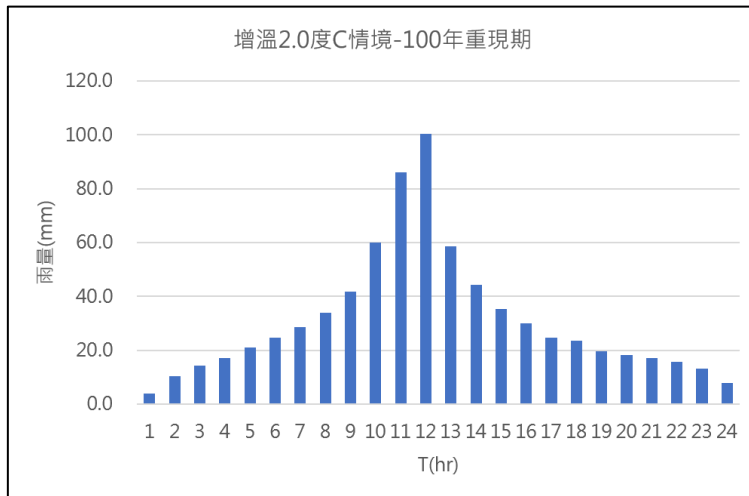


圖4.1-37 示範淹水網格設計降雨組體圖-增溫 2.0°C 情境 100 年重現期

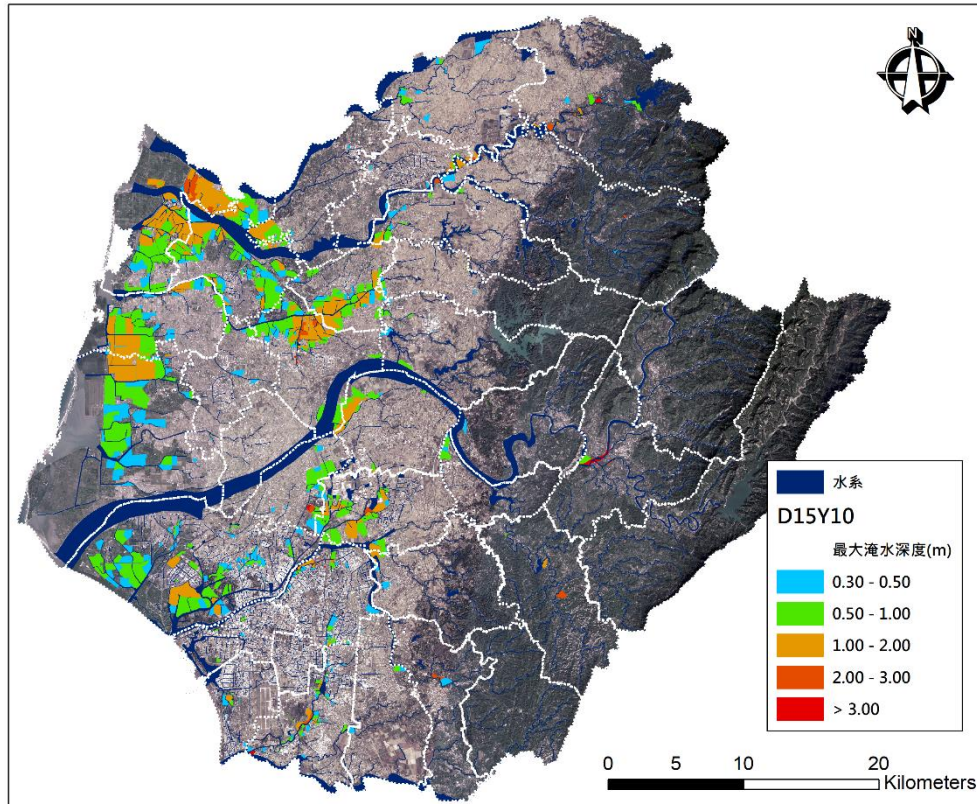


圖4.1-38 臺南市淹水模擬淹水深度-增 1.5°C 情境 10 年重現期降雨事件

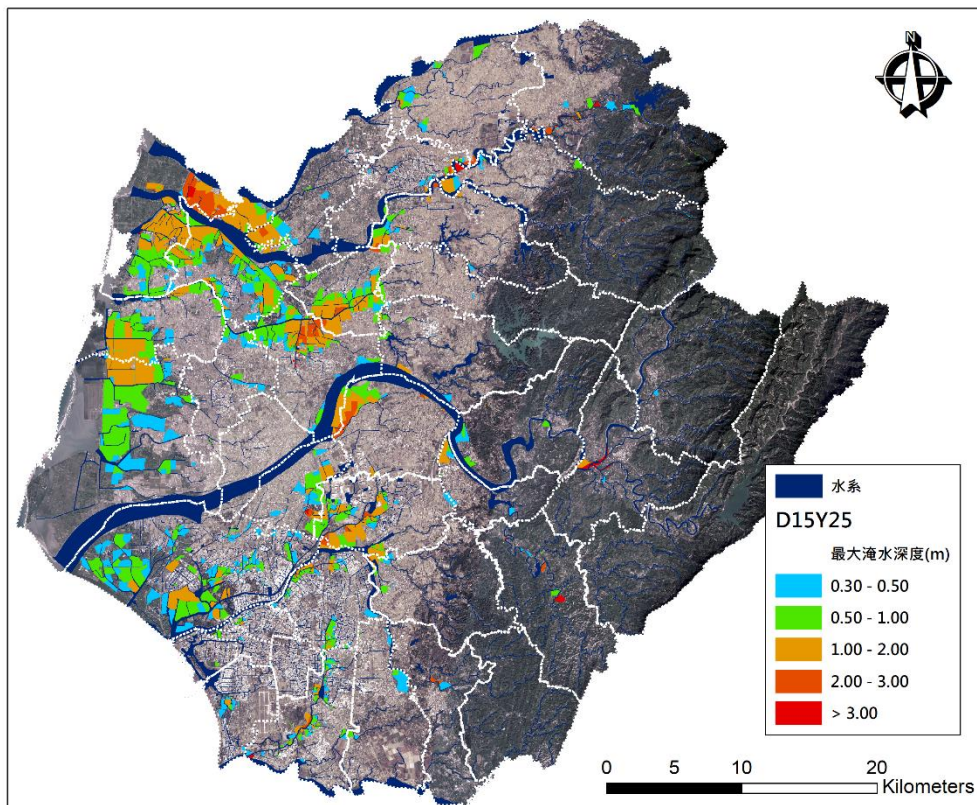


圖4.1-39 臺南市淹水模擬淹水深度-增 1.5°C 情境 25 年重現期降雨事件

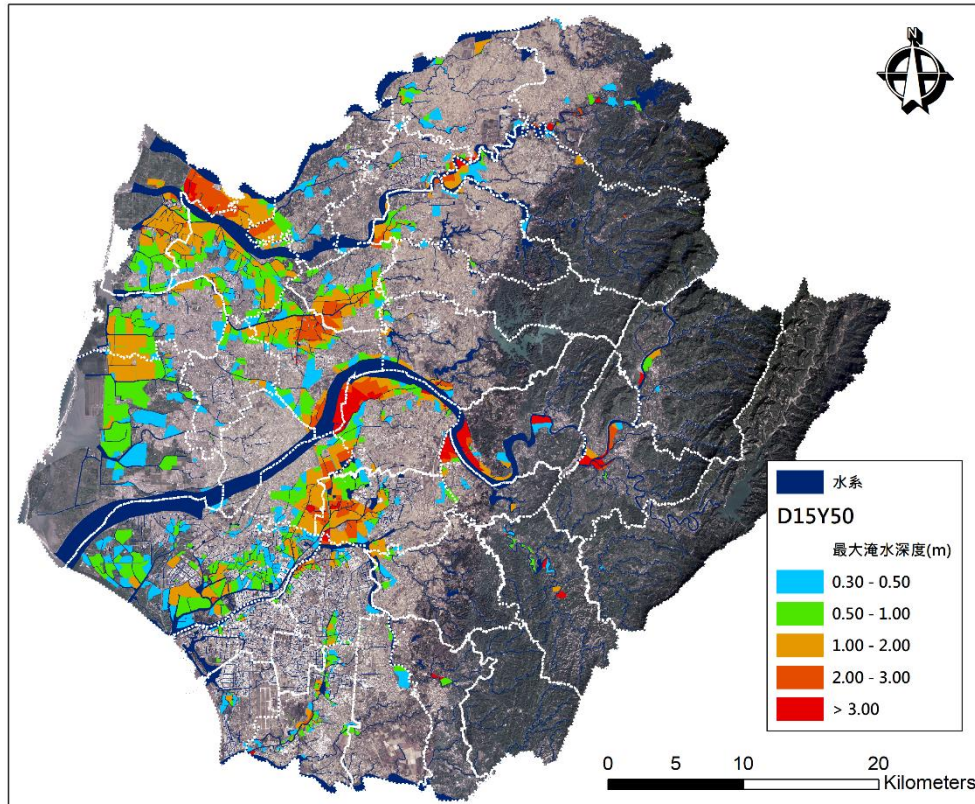


圖4.1-40 臺南市淹水模擬淹水深度-增 1.5°C 情境 50 年重現期降雨事件

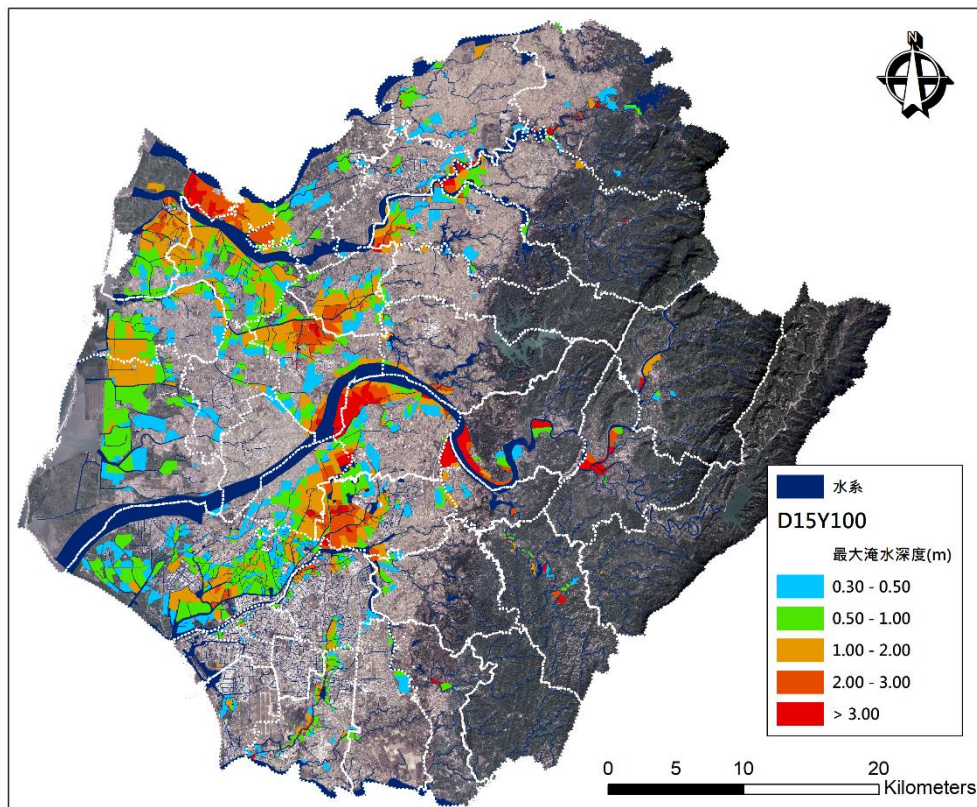


圖4.1-41 臺南市淹水模擬淹水深度-增 1.5°C 情境 100 年重現期降雨事件

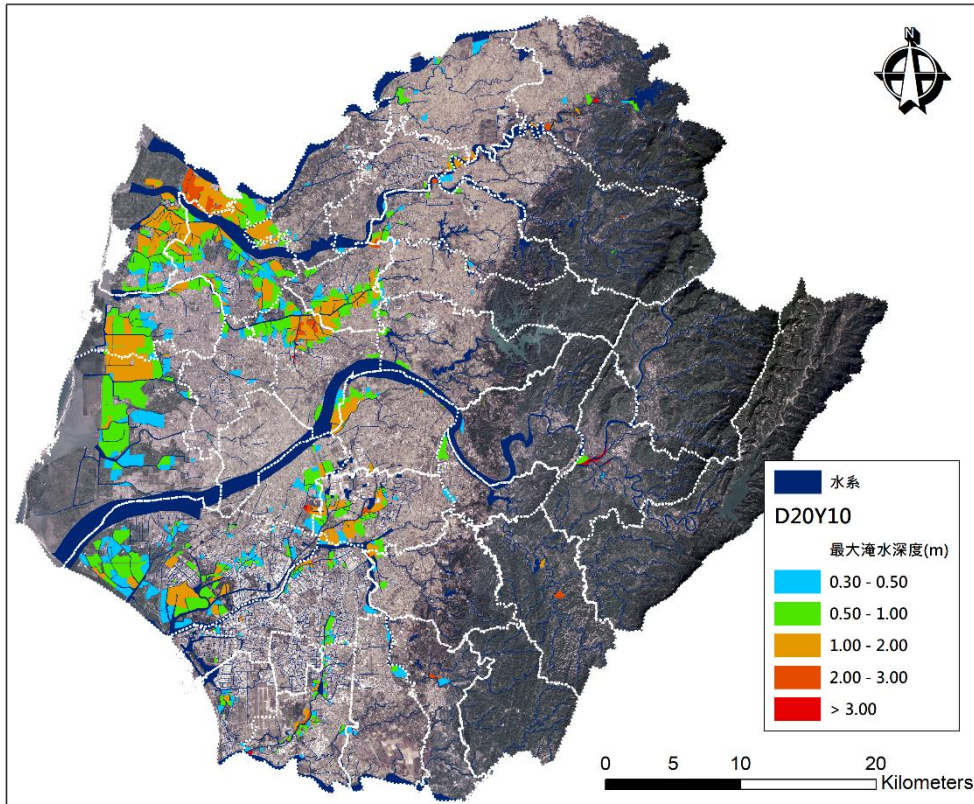


圖4.1-42 臺南市淹水模擬淹水深度-增 2.0°C 情境 10 年重現期降雨事件

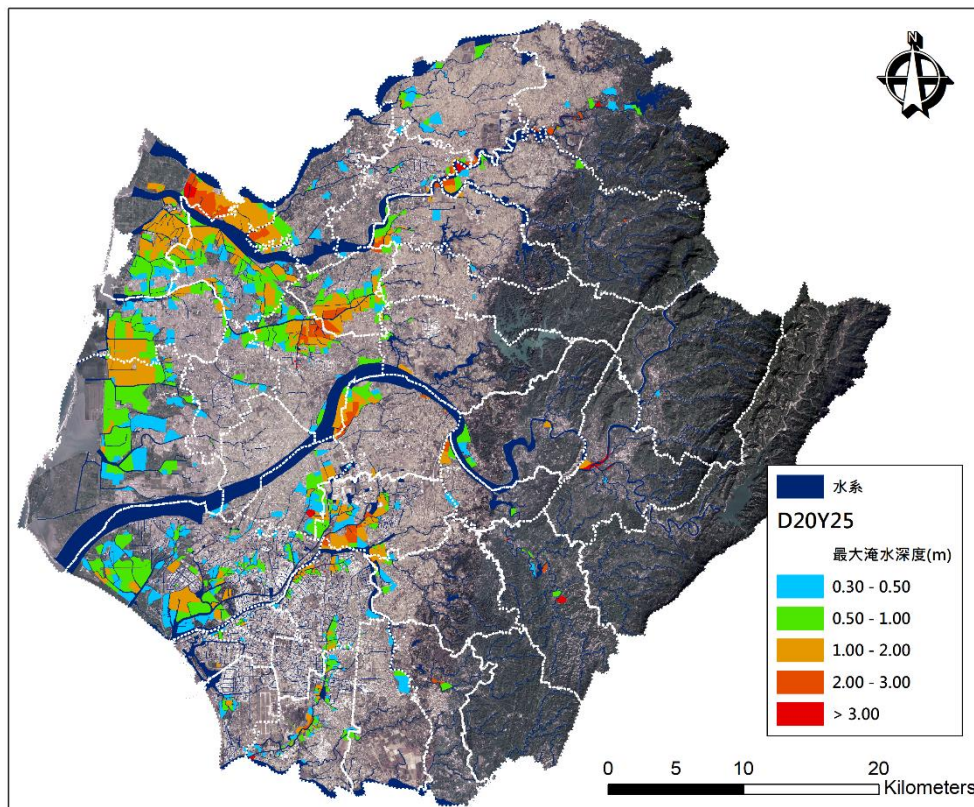


圖4.1-43 臺南市淹水模擬淹水深度-增 2.0°C 情境 25 年重現期降雨事件

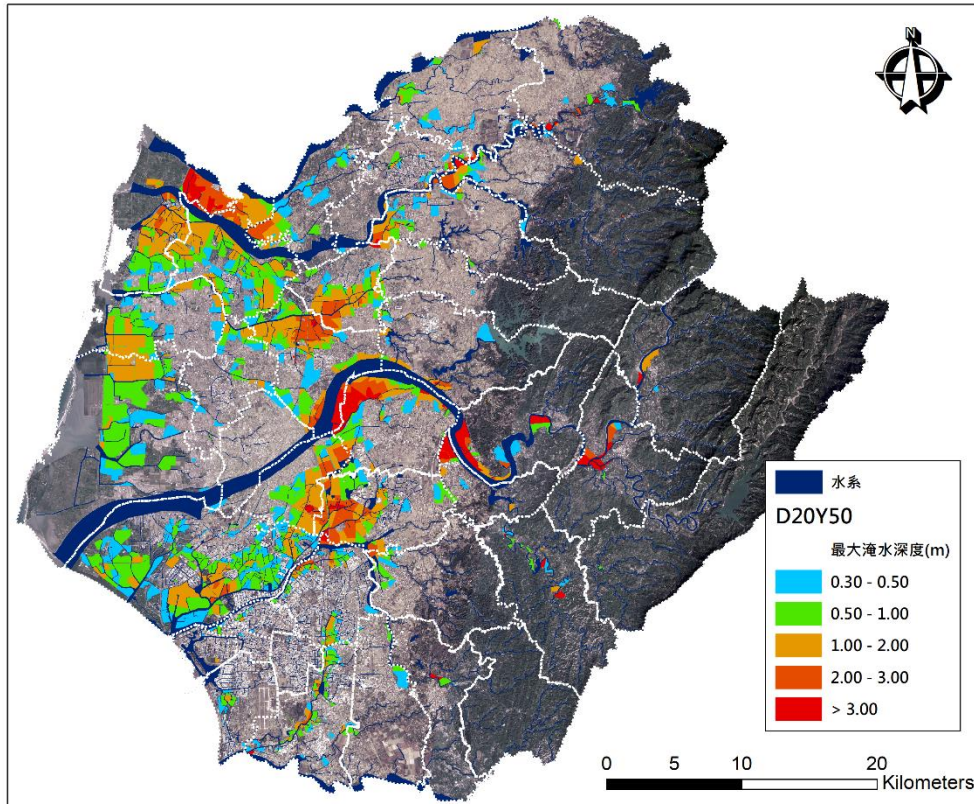


圖4.1-44 臺南市淹水模擬淹水深度-增 2.0°C 情境 50 年重現期降雨事件

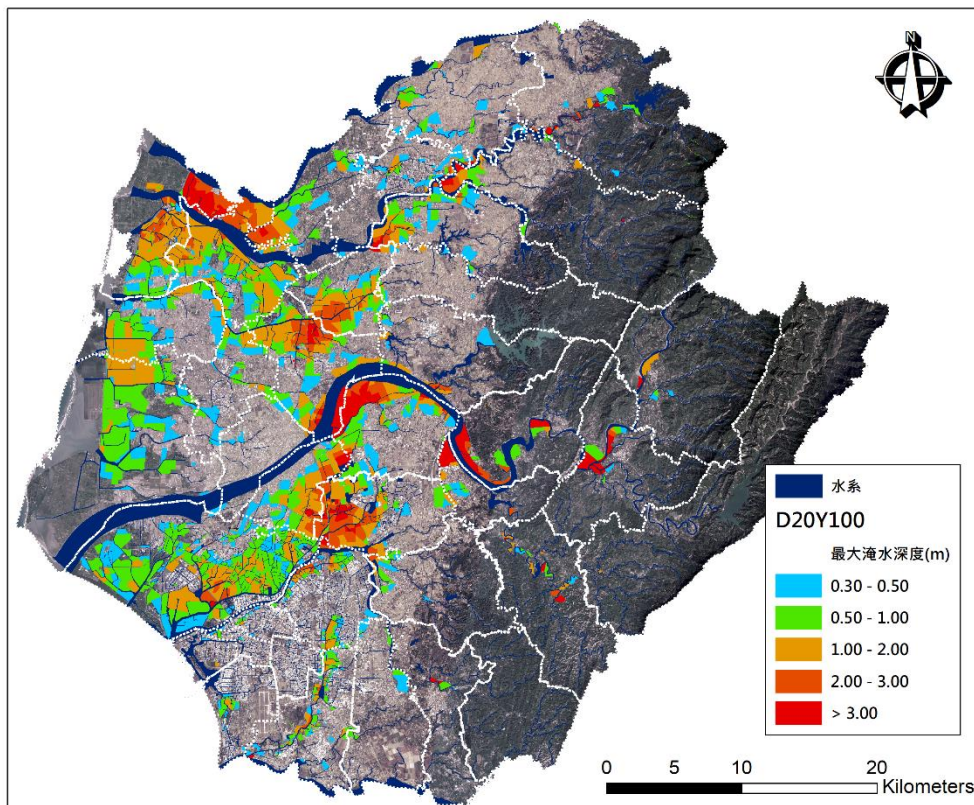


圖4.1-45 臺南市淹水模擬淹水深度-增 2.0°C 情境 100 年重現期降雨事件

三、 極端降雨危害度分析

前文中，透過臺南市地文性淹水模式配合各種水文條件完成各種情境的淹水模擬圖，而各淹水模擬圖中又有各種淹水深度，這些圖資勢必要經過整合後才能了解各區的危害度高低。本計畫設定之極端降雨淹水危害度評估方式如圖 4.1-46 所示，說明如下：

在極端降雨造成的淹水模擬圖中，依一般之理解，淹水深度高區域之危害度一定高於淹水深度低區域，因此同一張淹水圖淹水深度的高低所得危害度分數亦有高低之分。而針對同一氣候變遷情境(如基期情境)，若某 A 區域在低降雨量之 10 年重現期即淹水，另一 B 區域則於 10~50 年重現期事件時皆未淹水，100 年重現期事件才發生淹水，則可理解 A 區域之危害度應高於 B 區域。同理，比較同一重現期事件，某 C 區域在基期時即有淹水狀況，另一 D 區域則是在發生氣候變遷升溫 2.0 度 C 的情況下才發生淹水，那 C 區域之危害度亦應高於 D 區域。

運用上述概念，本計畫端降雨淹水危害度計算時，係採用數張淹水模擬圖疊加之方式，在模擬的 3 種氣候變遷情境與 4 種重現期事件，合計共 12 張淹水模擬圖中，針對各淹水計算網格在淹水 50 公分以上時計 2 分，淹水 20~50 公分時計 1 分，若 12 張圖皆得 2 分，則該區域即可得最高危害度的 24 分。以此方式可統計臺南市各區域(淹水計算網格)的危害度如圖 4.1-47 所示。圖中危害度分數未得分者為無淹水危害之區域，分數 1~5 分者為低危害度，分數 6~10 分者為中低危害度，分數 11~15 分者為中危害度，分數 16~20 分者為中高危害度，分數大於 20 分者為高危害度。

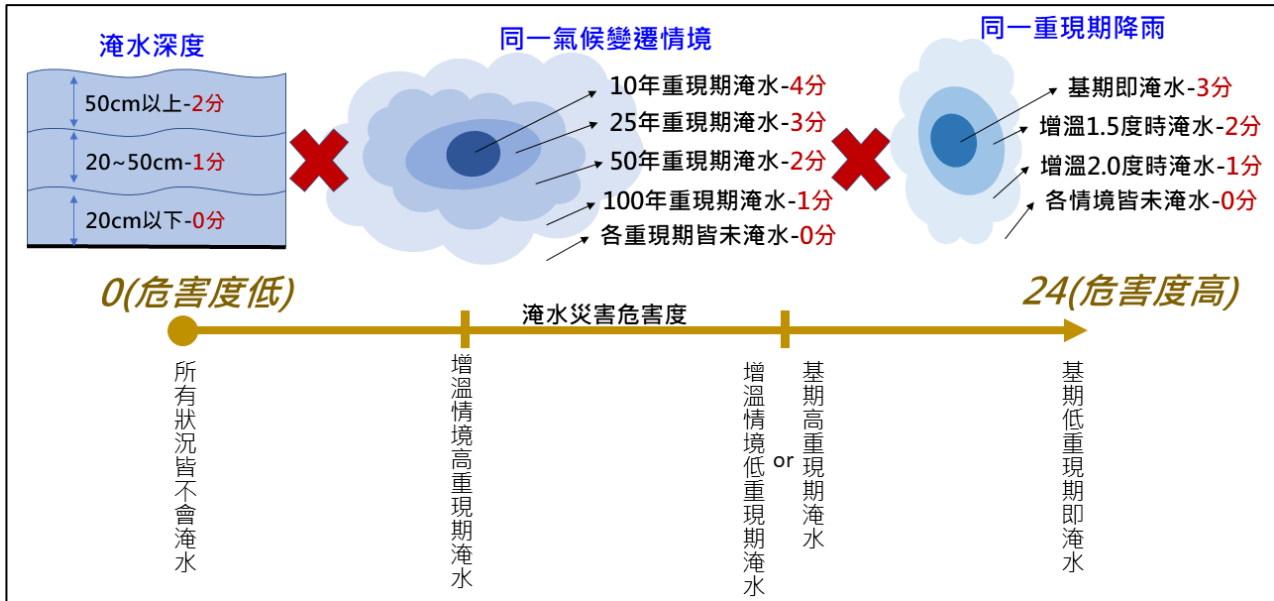


圖4.1-46 極端降雨淹水模擬危害度評分示意圖

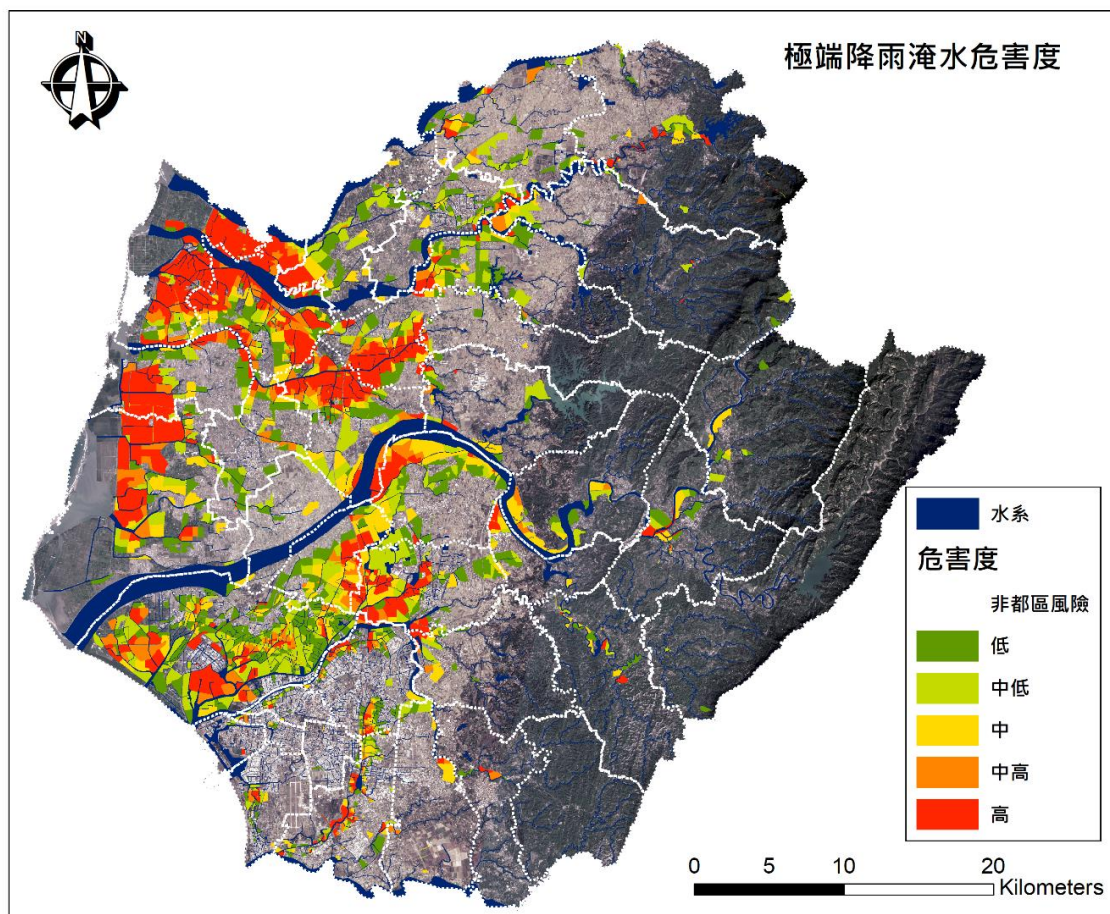


圖4.1-47 臺南市極端降雨淹水危害度

四、 極端降雨風險與情境議題分析

一般進行風險分析，多採用「風險=危害度 x 暴露度 x 脆弱度」的計算方式進行分析，而本計畫針對極端降雨風險分析方式，將針對各種議題進行評估，並以各議題可能對應之調適對策作為脆弱度指標。在各議題調適對策已開始施行，且相關資料明確且已完整蒐集之狀況下，亦會採用風險=危害度 x 暴露度 x 脆弱度的計算方式進行分析；但若該項議題之調適策略尚未普遍施行，在缺乏相關脆弱度資料的狀況下，則僅會透過風險=危害度 x 暴露度來指認該項議題未來應關注區域，做為未來調適對策訂定之參考，並可透過後續調適作為之執行狀況，來掌握該項議題脆弱度指標進步情形。舉例說明如下：

(一) 調適對策已開始施行且脆弱度資料完整

一般風險分析多採用「風險=危害度 x 暴露度 x 脆弱度」的計算方式進行分析，舉例來說，在極端降雨淹水風險分析中應包含「加強非工程淹水預警設備」的議題，該議題下可能的調適對策為「針對淹水風險區佈建淹水感測器」，因此脆弱度指標可定義為「淹水感測器服務範圍」。然而，並非所有淹水區都需要佈建淹水感測器來做淹水監測，而是應針對人口或住宅較密集的區域來佈建，因此除了各情境淹水深度作為危害度外，另應考量「人口密度」或「住家密度」作為暴露度，以瞭解哪些區域是人口密集的淹水區，進而掌握各區域佈建淹水感測器的優先順序。本計畫在這樣的議題分析中，風險分析以淹水模擬計算網格為分析單位，危害度為前一小節所述之極端降雨淹水危害度(前文圖 4.1-47)，暴露度則是以門牌系統套疊淹水模擬計算網格所計算出之「單位面積家戶密度」(如圖圖 4.1-48，脆弱度指標則為既有淹水感測器服務範圍(如圖 4.1-49)。上述淹水感測器服務範圍目前並無文獻揭明每個淹水感測器適當之服務半徑為多少(該半徑太大可能使淹水判斷精度降低、太小雖精度高但恐會高估需佈建數量)，本計畫依團隊過去淹水調查經驗採用服務半徑 750 公尺作為設定。將上述危害度、暴露度、

脆弱度作套疊分析，可得「未在淹水感測器服務範圍內之住家淹水區」作為「加強非工程淹水預警設備」議題之風險評估結果(如圖 4.1-50 所示)。在該圖中，可發現北區大興街一帶、永康鹽行與三崁店一帶、安南區媽祖宮路一帶...等以往易淹水區未在淹水感測器服務範圍內。

(二) 調適對策未普遍施行或欠缺脆弱度資料

脆弱度資料的缺乏會使得風險評估無法採用「風險=危害度 x 暴露度 x 脆弱度」的方式進行分析，但仍可透過「風險=危害度 x 暴露度」的方式掌握風險區，在後續調適對策擬定時瞭解應投入資源的區位，或待未來對策施行並建立脆弱度資料後，追蹤風險的變化與各區調適對策辦理進度。

在極端降雨淹水風險中將面臨「既有都市計畫區淹水問題加劇」的課題，該議題下可能的調適對策為「海綿城市的推動」，因此脆弱度指標可定義為「海綿城市減洪量或雨水涵養體」。然而，並非所有淹水區都需要推動海綿城市工作，而是應先針對都市計畫區，並考量都市計畫區的人口或住宅密度來評估優先順序。因此，進行相關風險分析時，一樣先以各情境淹水深度作為危害度，後考量「都市計畫區」為第一個暴露度，另再考量「人口密度」或「住家密度」作為第二個暴露度，以瞭解哪些區域是「人口密集的易淹水都市計畫區」，進而評估各區域推動海綿城市工作的優先順序。本計畫在這樣的議題分析中，風險分析以淹水模擬計算網格為分析單位，危害度為極端降雨淹水危害度(前文圖 4.1-47)，暴露度則包含「都市計畫區範圍」(如圖 4.1-51)與「單位面積家戶密度」(前文圖 4.1-48)，脆弱度指標則因目前海綿城市工作推動量體數據欠缺而未納入，但僅就危害度與暴露度套疊分析成果，亦可得「未來需加強海綿城市工作之中高風險區」作為「海綿城市的推動」議題之風險評估結果(如圖 4.1-52 所示)。

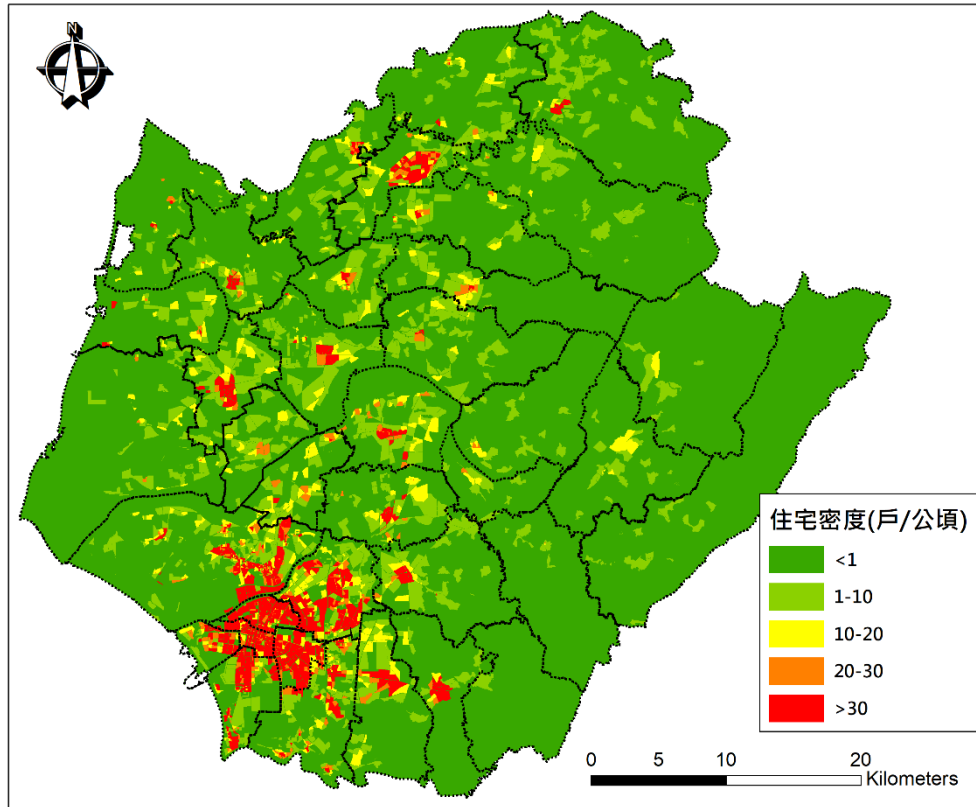


圖4.1-48 臺南市單位面積家戶密度圖(統計單元：淹水模擬計算網格)

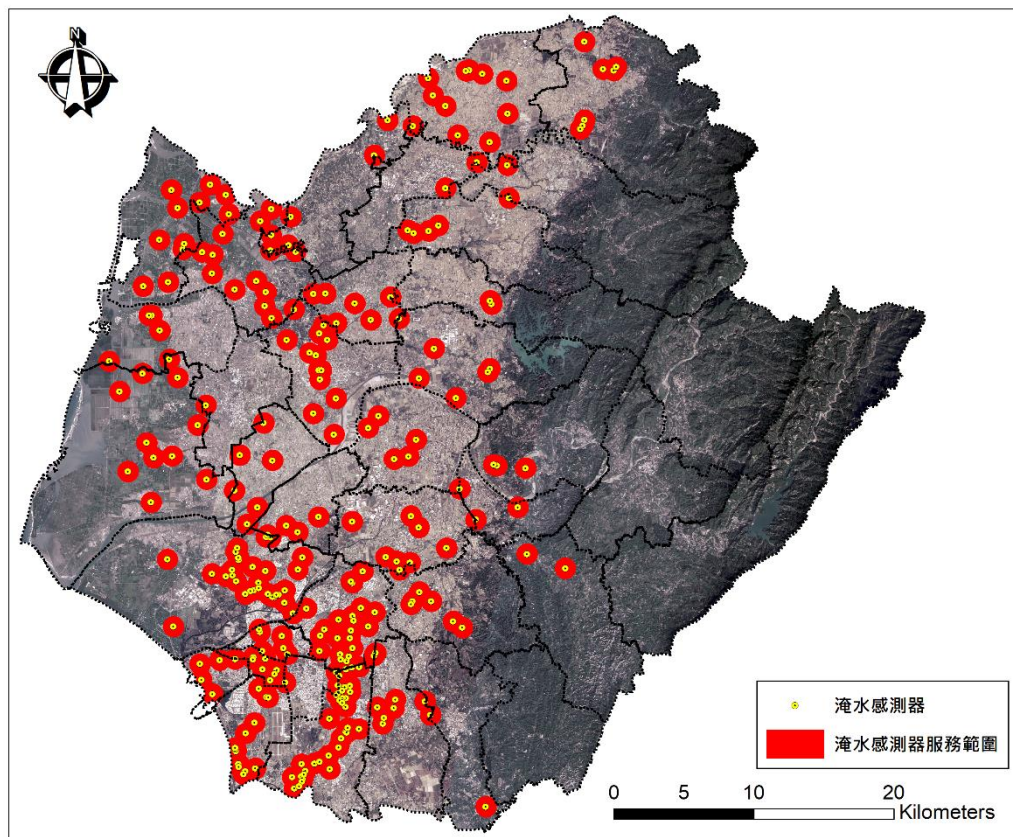


圖4.1-49 臺南市既有淹水感測器與其服務範圍

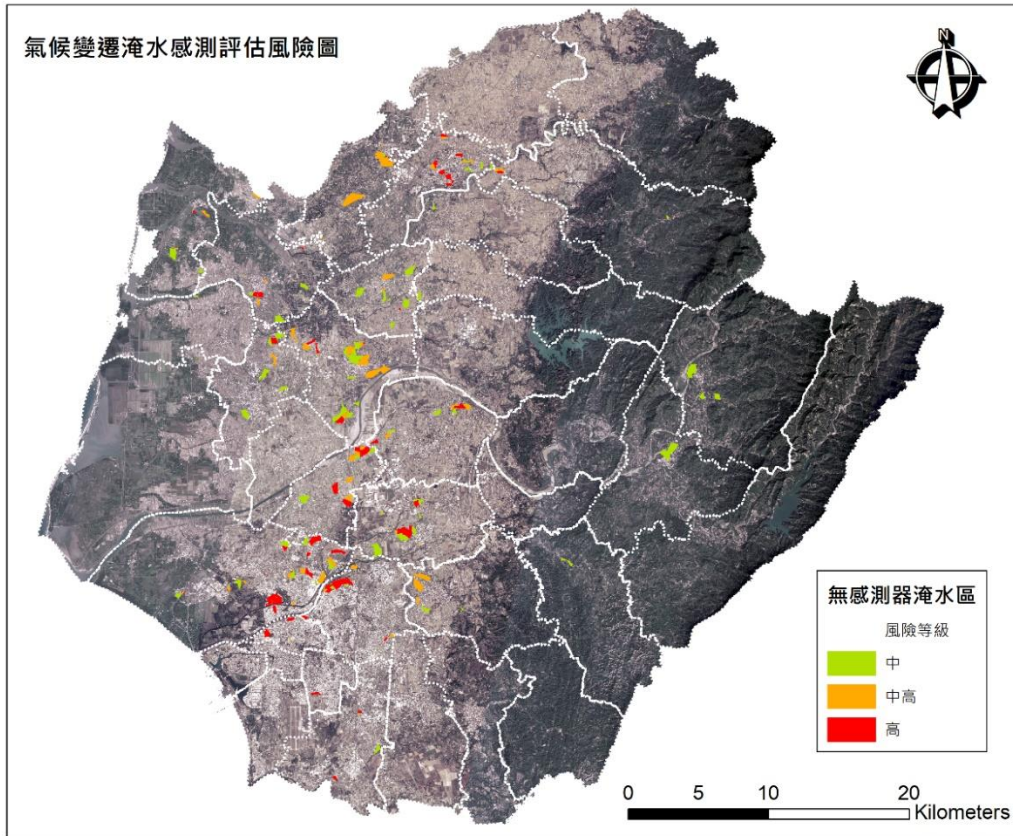


圖4.1-50 臺南市氣候變遷淹水預警設備風險評估圖

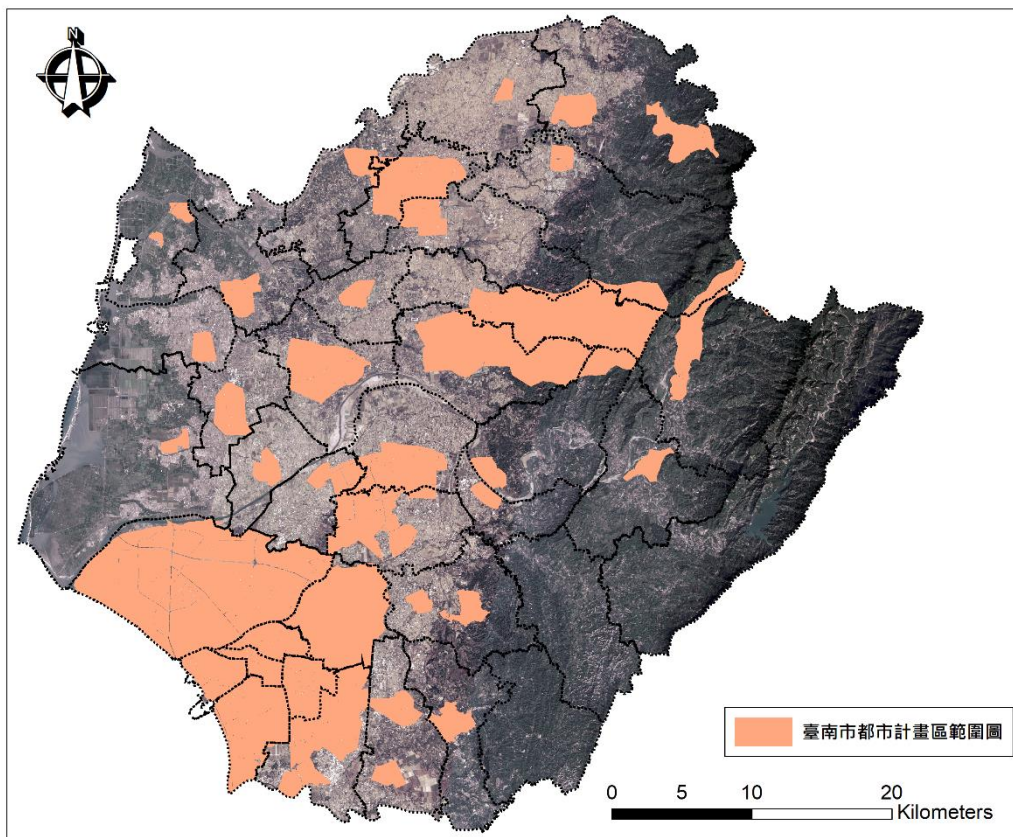


圖4.1-51 臺南市都市計畫區範圍圖

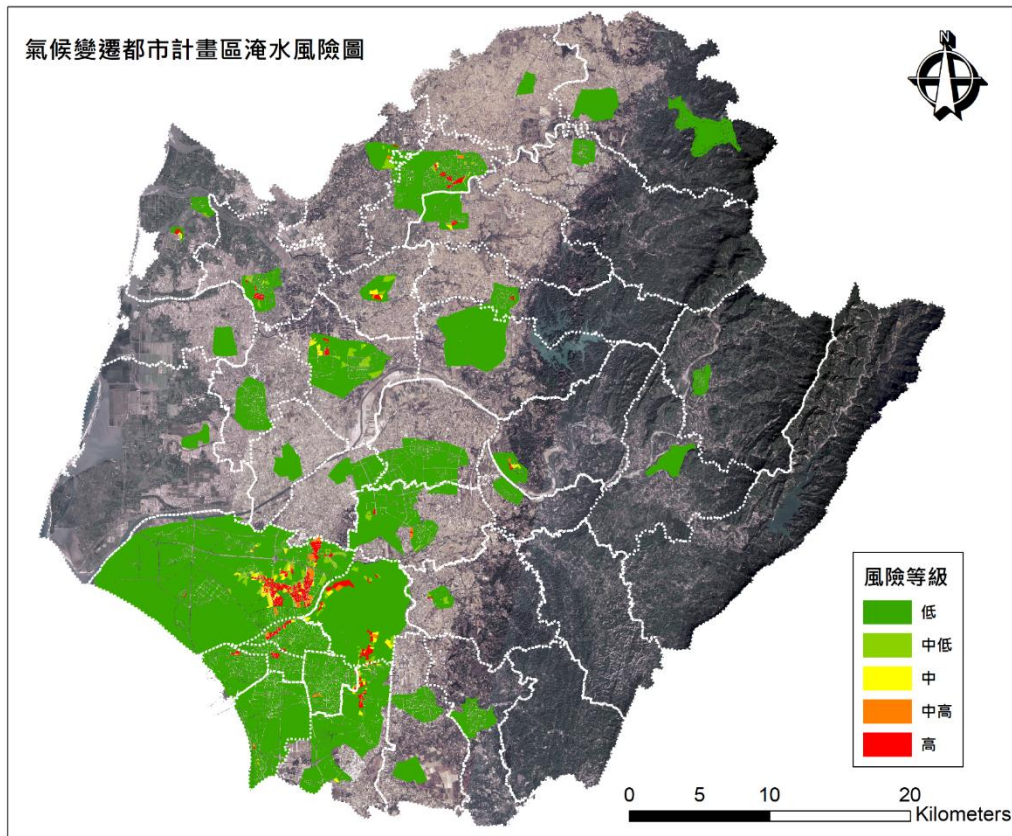


圖4.1-52 臺南市氣候變遷都市計畫區淹水問題加劇風險評估圖

4.1.2 土砂災害

一、 災害風險評估方法

本團隊將針對各集水區中的聚落進行既有土砂風險評估，藉由蒐集聚落軟硬體防災能力(保育治理工程、自主防災社區、維生通道等)情形，據以量化評估氣候變遷下土砂災害之風險調適能力。一般而言，針對災害調適能力的評估可依循常用的災害風險評估方式來進行，此風險可藉由危害度、暴露度、脆弱度等層面來進行探討與評估，其風險定義如下：



圖4.1-53 风险分析計算因子示意圖(以臺南市南化區關山里亞美坑溪為例)

(一) 危害度

土石災害大多可由土石堆積深度及土石運動速度進行評估，原因為土石災害對於保全對象的破壞為土石淤埋及土石顆粒對構造物的撞擊力、磨蝕等，故大多數學者選擇土石堆積深度及土石運動速度，或者將兩者組合成動量或動能用以評估其對構造物之破壞力。

選定的災害類型，分別為山崩與土石流與洪水、挾砂等三種不同類型造成之影響，分別根據山崩地滑地質敏感區、崩塌潛勢，土石流影響範圍、大規模崩塌潛勢區影響範圍以及河道深度變化量等。

(二) 暴露度

IPCC AR4 對於脆弱度的界定較具綜合性，除強調系統對於災



害衝擊的暴露度與敏感度特性外，亦涵蓋調適力，故可將脆弱度表示為下列函數：脆弱度=f(暴露度,敏感度,調適力)。而根據 UNISDR(2009)、IPCC(2013)對於暴露度的定義：可能暴露於風險下的單位，如人口、生活圈、基礎建設、經濟、社會、環境資源及文化資產等之存在，可能受到不利影響的各個元素，可以視為地區遭受到天然災害時，地區之先天條件。

本計畫建議選定維生通道強度、受土砂災害影響聚落、聚落與維生通道距離河道之水平及垂直距離(距河川遠近、地勢高低)、及土地利用程度等主軸進行暴露度分析，其中維生道路之孤島效應乃本區之重點風險評估項目；土地利用程度則採用國土利用調查成果，進行分級量化。

(三) 脆弱度(韌性)

應用於坡地災害之社會脆弱度因素分類之四個取向，包括：可能最大損失(保全人數、結構物損失、傢俱家電、交通工具的損失)、環境建設(土地使用、道路交通、治理工程)、自保能力(依賴人口、警消人力、避難所與受災次數等)、復原與適應能力(財力、社會支持、保險)等。本團隊主要將脆弱度分成：「社會與經濟」、「制度與體系」兩個面向，社會與經濟指地區外在社會人文的狀態，由此可得知一地區在受到天然災害之衝擊下，其災害復原的速度；從制度與體系可得知一地區之防救災能力及資源之分配，在天然災害來臨時，可降低災害所造成的損失及風險，且增加抵抗災害的能力。

針對坡地土砂災害本團隊預計在社會與經濟面選定包含弱勢人口(老人、幼童)、人口密度、高中學歷以上(教育程度)人口數、平均所得與自主防災社區等指標，其中弱勢人口及人口密度則是以最小統計區資料中三段年齡組資料進行評估；平均所得為各村里於綜合所得稅申報統計資料；自主防災社區可將各村里兵棋推演次數及實兵演練次數進行評估；在制度與體系面選定距警察、消

防、避難與醫療單位距離(以路網分析作為服務依據)，這些設施愈充分，愈有公共資源與空間，彈性處理或恢復颶洪災害相關衝擊，故具有較高韌性。

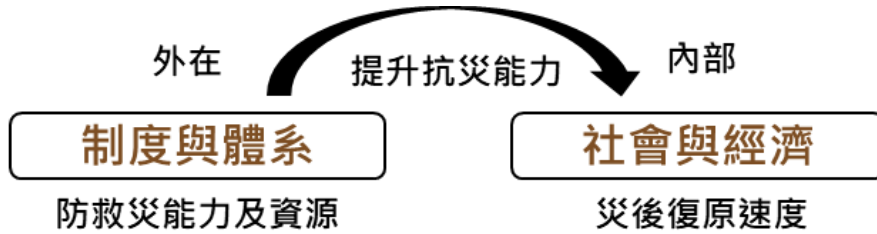


圖4.1-54 风险分析計算因子示意圖

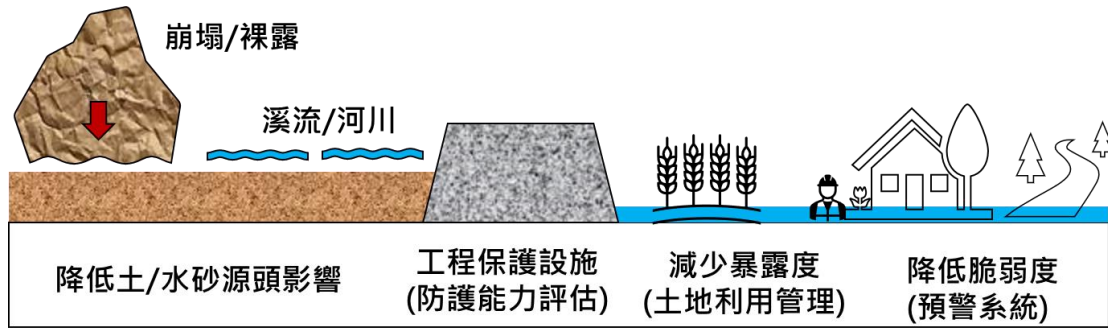
由上述危害度、暴露度及脆弱度定義及應用於相關土砂災害後，藉由選定範圍內之脆弱度指標進行风险分析及評估瞭解地區在受到天然災害之衝擊下，其災害復原的速度與抵抗災害的能力，進而相關風險改善策略。

為評估既有治理工程基礎設施及重要防救災設施系統，受到不同土砂災害衝擊後的防護能力，依據災害事件類別，進行各種土砂模式之參數率定與設定，推估設施衝擊狀態，配合災害損失推估分析，進而評估設施耐災能力。



資料來源：：(2021 年) 從韌性城市思維評估基礎設施抗災能力提升之面向

圖4.1-55 既有設施耐災能力評估示意圖



資料來源：改繪自(2019年)都市低窪易淹水地區災前韌性評析與強化策略之研究

圖4.1-56 減少土/水砂災害風險示意圖

針對土砂災害面建議選定各因子衡量方式及資料來源彙整如表 4.1-2 所示。於評估階段著重該區受孤島效應所造成之影響(如某處橋梁或道路中斷後影響保全對象類型、數量等，緊急搶修類型與影響時間等)。

表4.1-2 土砂災害風險因子量化評估表

面向	因子	衡量方式	資料來源	
危害度	山崩地滑地質敏感區	是否位於地質敏感區內	經濟部地質調查及礦業管理中心	
	歷年崩塌地圖資	是否位於崩塌範圍內	農業部林業及自然保育署 農業部農業發展及水土保持署	
	土石流潛勢溪流集水區	是否位於土石流潛勢溪流集水區	農業部農業發展及水土保持署	
	土石流影響範圍	是否位於土石流影響範圍(影響區)	農業部農業發展及水土保持署	
	潛在大規模崩塌範圍	是否位於大規模崩塌範圍內	農業部林業及自然保育署	
	地形變化量		多期地形變化量	本計畫分析內政部光達成果
			多期地形平均變化量	
	歷史坡地災害	89-109 年歷史坡地災害區位	國家災害防救科技中心	
降雨增幅因子	土石流警戒雨量達標頻度	TCCIP 氣候變遷情境雨量條件		
暴露度	維生通道重要度	道路設計強度等	交通部交通路網圖資	
	聚落分布	聚落分布區位	內政部	
	土地利用程度	根據土地利用強度給予得分值	內政部土地利用圖資	

面向	因子	衡量方式	資料來源
脆弱度	避難單位	本計畫路網分析成果 計算服務範圍 3、5、15、30、60 分鐘 及道路不可及等 7 類級	內政部消防署 臺南市政府
	醫療單位		
	消防單位		
	警察單位		
	弱勢人口 (老人)	最小統計區內 65 歲以上人口密度	內政部統計處
	弱勢人口 (幼童)	最小統計區內 1~14 歲人口密度	內政部統計處
	人口密度	(最小統計區面積)/(人口數)	內政部統計處
	平均所得	各村里綜合所得稅平均所得	內政部統計處
	自主防災 能力	兵棋推演次數+實兵演練次數	農業部農業發展及水土保持署

參考來源：李欣輯、楊惠萱，(2012)；楊惠萱等，(2014)；(2020)「南部地區大規模土砂災害減災與防災整合機制」；(2022)「111 年度 荖濃溪上游集水區(玉穗溪至梅山口段)大規模土砂流出風險量化與跨域對策研擬」。

二、 各風險面向量化評估

因應不同領域研析應用，在土砂風險分析空間下，考量局部資料尺度為村里尺度，如自主防災社區推動、所得稅等，而在人口面則以最小人口統計區為主，而崩塌、土石流、坡地災害點位則以單點為主，風險分析主軸仍以人類社會系統為分析對象，故以人口面之最小人口統計區為土砂面風險分析之空間單元，針對各面向指標調整說明如下：

(一) 危害度

1. 坡地災害潛勢

針對坡地災害潛勢因子進行蒐集資料，瞭解既有土砂災害熱點區位。

(1) 歷史崩塌區位

本計畫蒐集農業部林業及自然保育署 93-107 年與農業部農村發展及水土保持署 108~112 年全島崩塌地判釋資料，彙整為歷史崩塌資料。由歷史崩塌資料顯示，臺南市主要崩塌區位於南化水庫上游(順向坡、砂頁岩互層易造成崩塌)、左鎮與龍崎區(月

世界之淺層崩塌易沖刷)。

在資料處理面分別計算最小統計區所涉及重疊之面積，並計算其面積比例，以定義其災害潛勢。

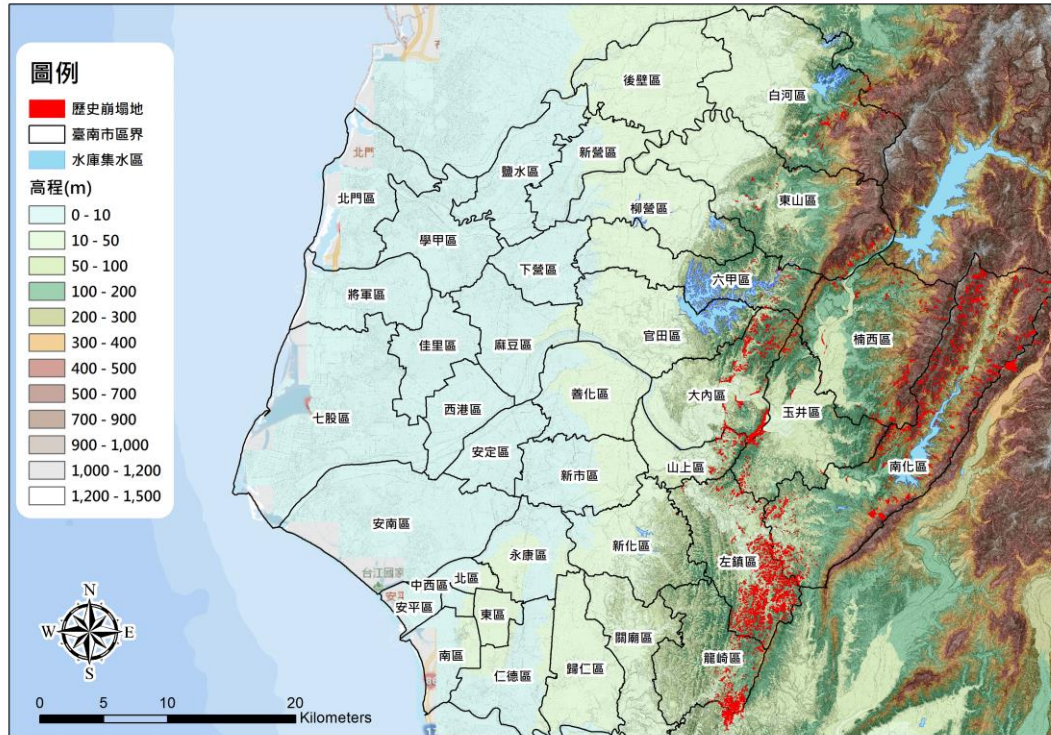


圖4.1-57 臺南市歷史崩塌區位

表4.1-3 臺南市歷史崩塌災害表

行政區	時間	災害名稱	類型	災害概述
六甲區	2019.08.15	大丘里市道 174 上邊坡崩塌	崩塌	六甲區大丘里市道 174 上邊坡崩塌，土石流阻斷道路。
左鎮區	2018.08.24	澄山里崩塌災害	崩塌	0823 熱帶低壓期間，臺南左鎮 171-1 線區道因當地邊坡崩塌，過嶺部落路段遭土石沖毀，道路中斷約 165 公尺。
南化區	2018.06.19	179 區道崩塌災害	崩塌	0619 豪雨期間山區多雨造成土石鬆脫，南化區 179 區道有兩、三處邊坡小碎石塊掉落，不影響來往車輛通行。16.5 公里處邊坡小面積坍方，土石夾帶樹木滑落占據半線車道。
新化區	2013.08.29	大坑尾漢龍宮崩塌災害	崩塌	新化區大坑尾漢龍宮後方發生崩塌，土石入侵民宅，造成民宅受損並造成人員受傷。
東山區	2009.08.09	南勢村崩塌災害	崩塌	南勢村 41-17 號民宅莫拉克颱風後發現後方坡地坍落，土石堆積於民宅旁。
南化區	2008.07.17	玉山村青山宮崩塌災害	崩塌	卡玫基颱風期間青山宮旁野溪上游受超大豪雨沖蝕產生局部崩坍伴隨土石漫流，造成 6 棟民宅受損、無名橋淤埋。
南化鄉	2007.08.14	西埔村崩塌災害	崩塌	0809 豪雨期間南 173 區道道路路基掏空約 12 公尺，崩塌土石影響住戶 2 戶。
龍崎區	1999.08.08	兵仔舍滑崩災害	崩塌	崎頂村兵仔舍發生大規模山崩，造成一棟民舍、器具、果園等跌落山谷，幸無人傷亡。13 日清晨 7 時，現場再度發生崩塌，使另一農舍與產業道路滑落、塌陷。
左鎮區	1998.07.29	326 電塔滑移倒塌災害	地滑	左鎮鄉澄山村山豹地區潛在順向坡滑動，發生山崩滑動引起 326 號超高壓線電塔倒塌，造成臺南以北地區大停電。

資料來源：臺南市政府消防局「臺南市政府災害防救深耕第 3 期計畫委託服務案」

(2) 山崩與地滑地質敏感區

本計畫蒐集經濟部地質調查及礦業管理中心之山崩與地滑地質敏感區資料。而山崩與地滑地質敏感區係指曾經發生土石崩塌或有山崩或地滑發生條件之地區，及其周圍受山崩或地滑影響範圍，當中包含岩屑崩滑、岩體滑動、落石與順向坡等不同災害型態，為地質災害潛勢之一。



在資料處理面分別計算最小統計區所涉及重疊之面積，並計算其面積比例，以定義其災害潛勢。

(3) 潛在大規模崩塌區

自 98 年莫拉克颱風後，為了避免小林村大規模崩塌災害再次發生，農業部林業及自然保育署進行 101~105 年「國有林大規模崩塌潛勢區判釋與危險度評估計畫」進行大規模崩塌潛勢區判釋，根據計畫成果瞭解於臺南市行政範圍內，共計有 42 處潛在大規模崩塌區(南化區 28 處、楠西區 11 處、東山區 3 處)。一般而言，大規模崩塌大致可以分為冠部、陷落區和隆起區，主要特徵有主崩崖、次崩崖、冠部崩崖、冠部裂隙、反向坡與陷溝等線性構造要項。大規模崩塌具有規模大、土砂量高及高致災性等特質，為重要災害潛勢之一。

在資料處理面分別計算最小統計區所涉及重疊之面積，並計算其面積比例，以定義其災害潛勢。

(4) 歷史坡地災害

本計畫蒐集國家災害防救科技中心 89-109 年坡地災害資料庫，該資料庫內包含歷年農業部農村發展及水土保持署、交通部公路局、內政部消防署災情傳遞系統、各報章雜誌之報導及災後勘查等災害紀錄之資料，作為歷史災害案例因子。在資料處理面分別計算最小統計區所涉及災害點位密度，作為坡地災害潛勢因子。

(5) 地形變異總量與平均變異量

本計畫利用影像相減法將內政部提供之多期地形進行地形變異量分析，瞭解歷年既有變異熱點，如崩塌、沖刷、河道運移等。在資料處理面分別計算最小統計區所涉及地形變化量，分別計算最小統計區地形變異總量與平均變異量，作為坡地災害潛勢因子。

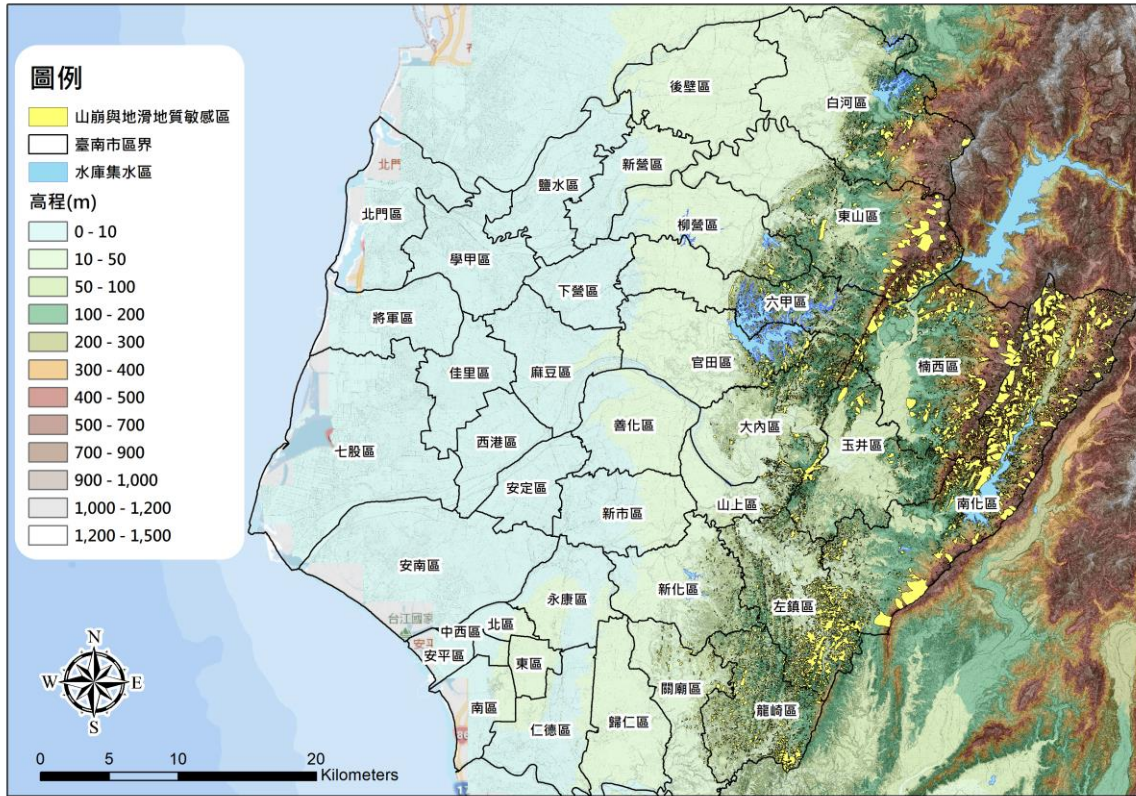


圖4.1-58 臺南市山崩與地滑地質敏感區分布

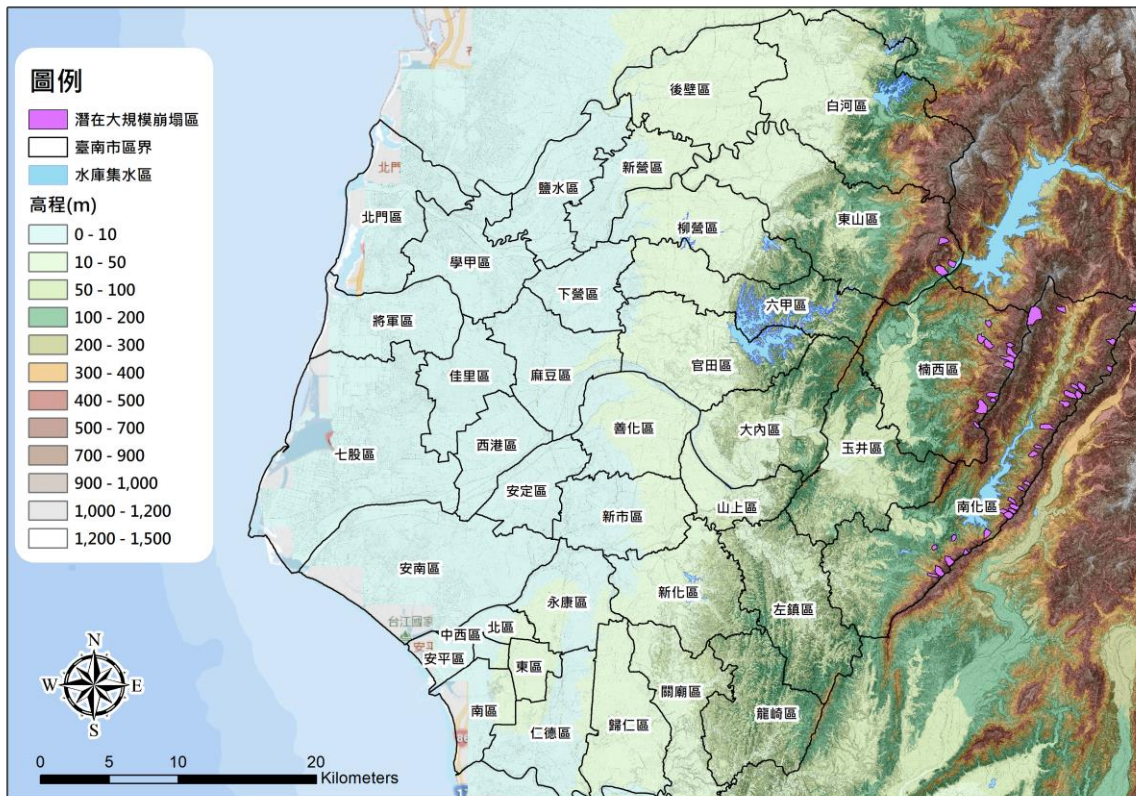


圖4.1-59 臺南市潛在大規模崩塌分布

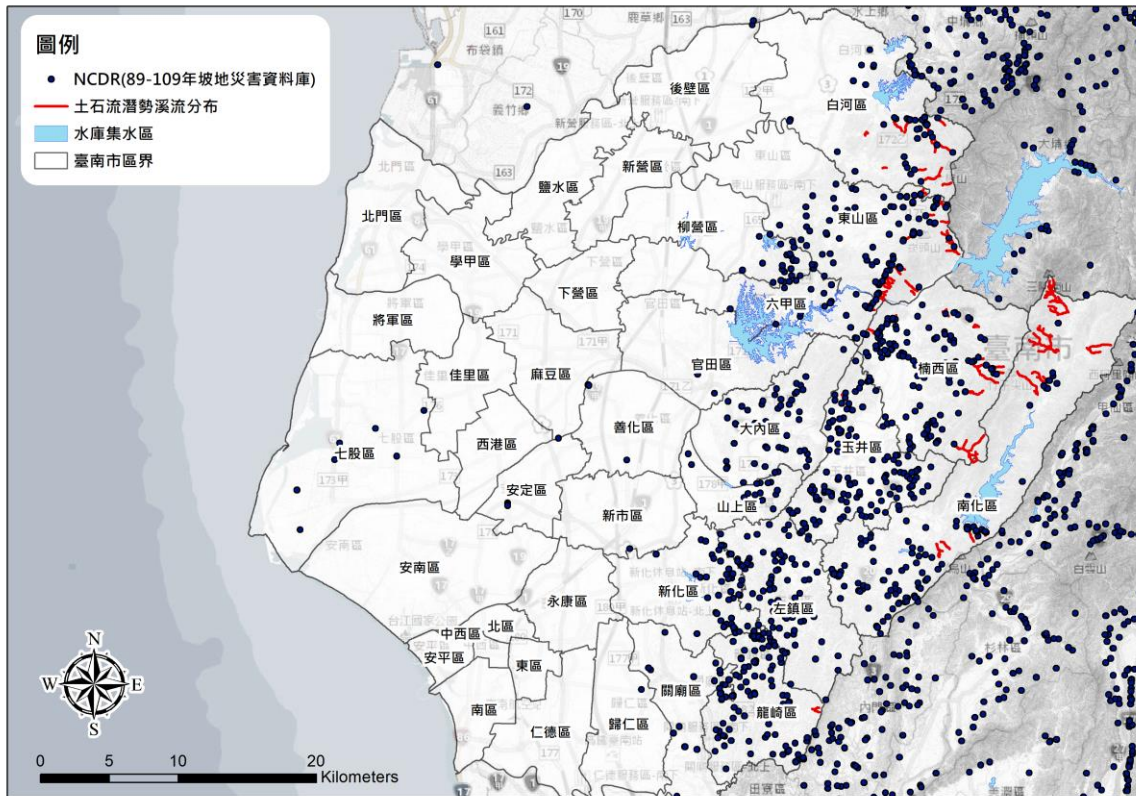


圖4.1-60 臺南市歷史坡地災害分布

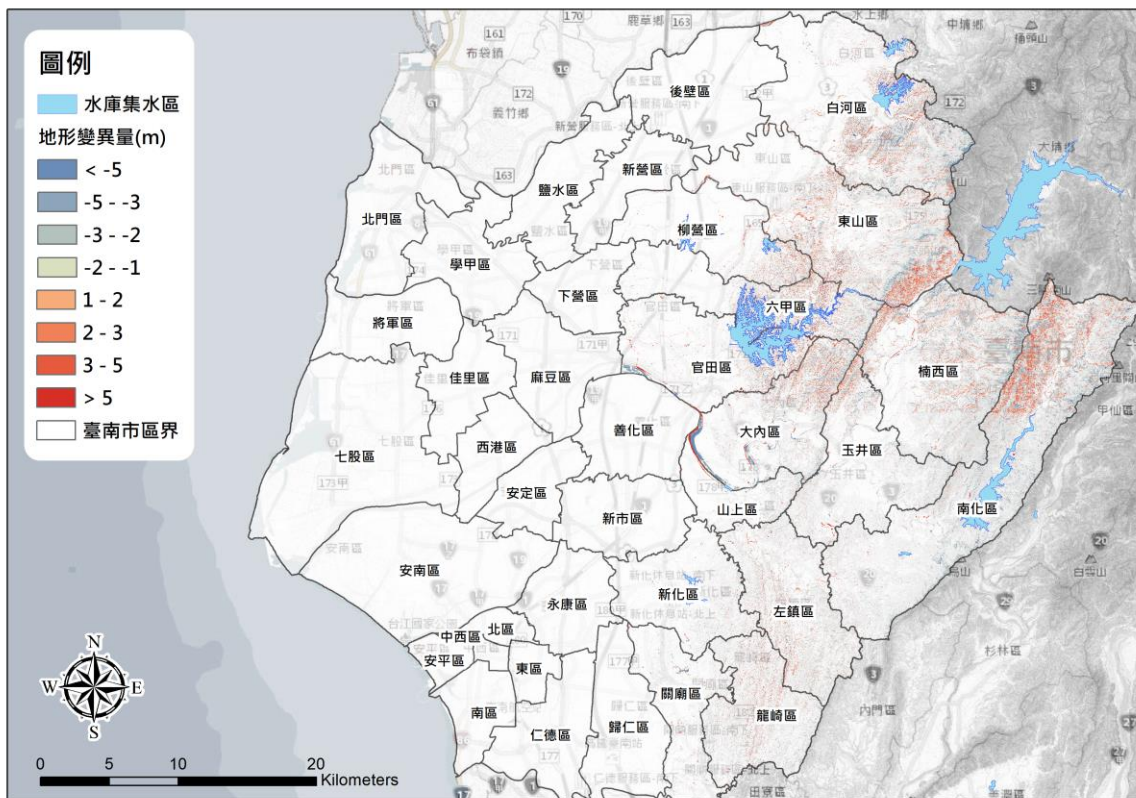


圖4.1-61 臺南市地形變動量分布

(6) 土石流潛勢溪流集水區/影響範圍

針對臺南市各行政區進行坡地災害之潛勢評估。根據農業部農村發展及水土保持署 113 年度土石流潛勢溪流資料，目前臺南市內有 48 條土石流潛勢溪流，包含 8 條高潛勢、9 條中潛勢、24 條低潛勢以及 7 條持續觀察之土石流潛勢溪流。臺南市歷史上有多次土石流災害之發生，多位於臺南市東側淺山地區，當中災情較嚴重者如南化區南市 DF042(亞美坑)、南市 DF048(羌磺坑)等土石流災害事件。



羌磺坑青山宮遭土砂淤埋(98/8/9)

亞美坑橋遭土石流沖斷(98/9/1)

圖 4.1-62 臺南市莫拉克災害照片(以羌磺、亞美坑為例)

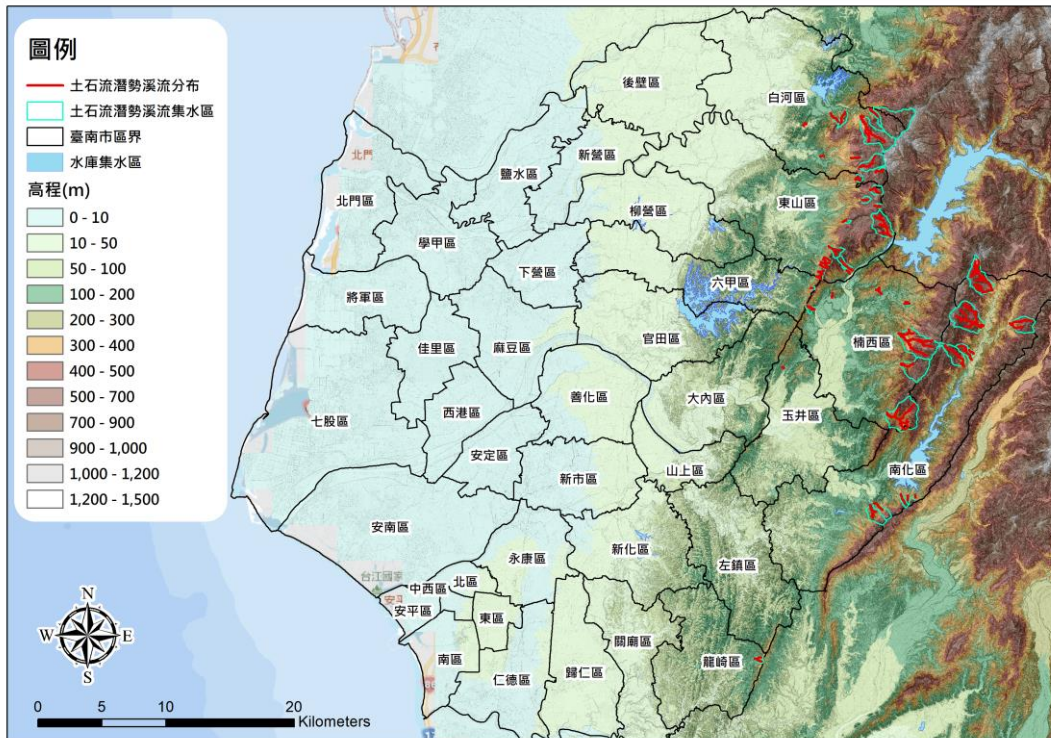


圖 4.1-63 臺南市土石流潛勢溪流分布

在資料處理面分別計算最小統計區所涉及土石流潛勢溪流圖資，分別計算最小統計區集水區面積與影響範圍面積，作為坡地災害潛勢因子。

表4.1-4 臺南市土石流災害歷史彙整

行政區	地名	土石流潛勢 溪流編號	潛勢 等級	災害事件
楠西區	照興 (坑仔內橋)	南市 DF032	低	105 年 0906 豪雨
	龜丹	南市 DF033	高	97 年卡玫基、98 年莫拉克颱風
	竹仔埕	南市 DF035	高	97 年卡玫基颱風
	頂湖	南市 DF029	低	94 年泰利颱風
	新寮	南市 DF034	中	98 年莫拉克颱風
	坑仔內	南市 DF032	低	90 年桃芝颱風、97 年卡玫基颱風
南化區	羌磺坑	南市 DF048	高	97 年卡玫基、98 年莫拉克颱風
	平坑仔	南市 DF043	高	97 年卡玫基、98 年莫拉克颱風
	亞美坑 (關山 11 號 橋)	南市 DF042	高	97 年卡玫基颱風
	檳仔崙	南市 DF041	中	97 年卡玫基颱風
	竹子山 (關山 12 號 橋)	南市 DF040	中	97 年卡玫基颱風
	龜頭坑	南市 DF039	高	97 年卡玫基颱風
	芋仔寮坑	南市 DF038	高	97 年卡玫基颱風
	柚子腳 (寶光聖堂)	南市 DF044	中	98 年莫拉克颱風
	德溪橋	南市 DF045	中	98 年莫拉克颱風
六甲區	培灶(大丘里)	南市 DF028	低	90 年納莉颱風、94 年 612 水災、 98 年莫拉克颱風、108 年 0815 豪 雨

資料來源：本計畫整理

針對臺南市山區行政區域，綜合上述歷史坡地災害、土石流潛勢溪流集水區、土石流潛勢溪流影響範圍、山崩與地滑地質敏感區、潛在大規模崩塌區、93 至 112 年歷史崩塌、地形比對平均變異量、變異總量等相關坡地災害潛勢因子，建立坡地災害潛勢分析成果，瞭解臺南市行政區內各項土砂災害熱點區位分布，如圖 4.1-64 所示。

由於各因子資料尺度不同需進行正規化處理，使各項因子評量標準相同[0, 1]，以利進行分析需要，正規化公式如下所示：

$$X_{nom} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \in [0, 1]$$

表4.1-5 臺南市坡地災害潛勢因子正規化處理列表

資料處理方式	對應因子
密度	歷史坡地災害
面積比例	土石流潛勢溪流集水區、土石流潛勢溪流影響範圍、山崩與地滑地質敏感區、潛在大規模崩塌區、93 至 112 年歷史崩塌
變異總量	地形比對平均變異量、變異總量

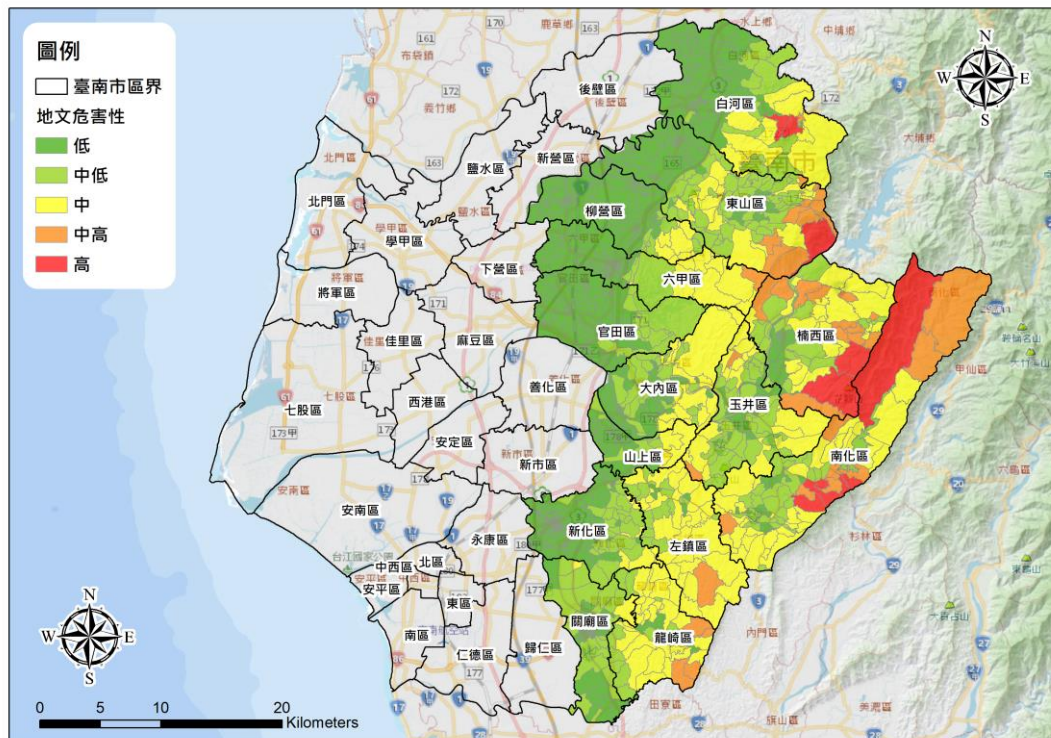


圖4.1-64 臺南市坡地災害潛勢分析成果

2. 降雨增幅因子

土石流警戒基準值，係利用中央氣象署之雨量資料，以有效累積雨量(Rt)及降雨強度(I)兩降雨參數之乘積為降雨驅動指標(RTI)，根據歷史雨場事件，計算出土石流發生可能性為 70%之土石流警戒基準值。

基於前述極端降雨分析，在各區域網格降雨增幅比例上，以基期設計雨量為基準，依各情境各網格的夏季雨量增加比例，加乘至基期設計雨量中，瞭解在氣候變遷不確定性下，分別探討基期、增溫 1.5 度、增溫 2.0 度下各種重現期雨量(2、5、10、25、50、100、200 年等重現期)，達標土石流警戒雨量的頻繁度(以 113 年警戒雨量為標準)。瞭解其氣候變遷情境下更容易發生土石流土砂災害的比例，作為降雨增幅因子。根據分析成果以南化區、楠西、白河、東山等區為變異區。

表4.1-6 臺南市土石流警戒雨量發布區列表

區域	警戒雨量(mm)	區域	警戒雨量(mm)
白河區	500	東山區	500
南化區	450	楠西區	450
龍崎區	550	玉井區	550
六甲區	600	非土石流區發布區	600(最高值帶入)

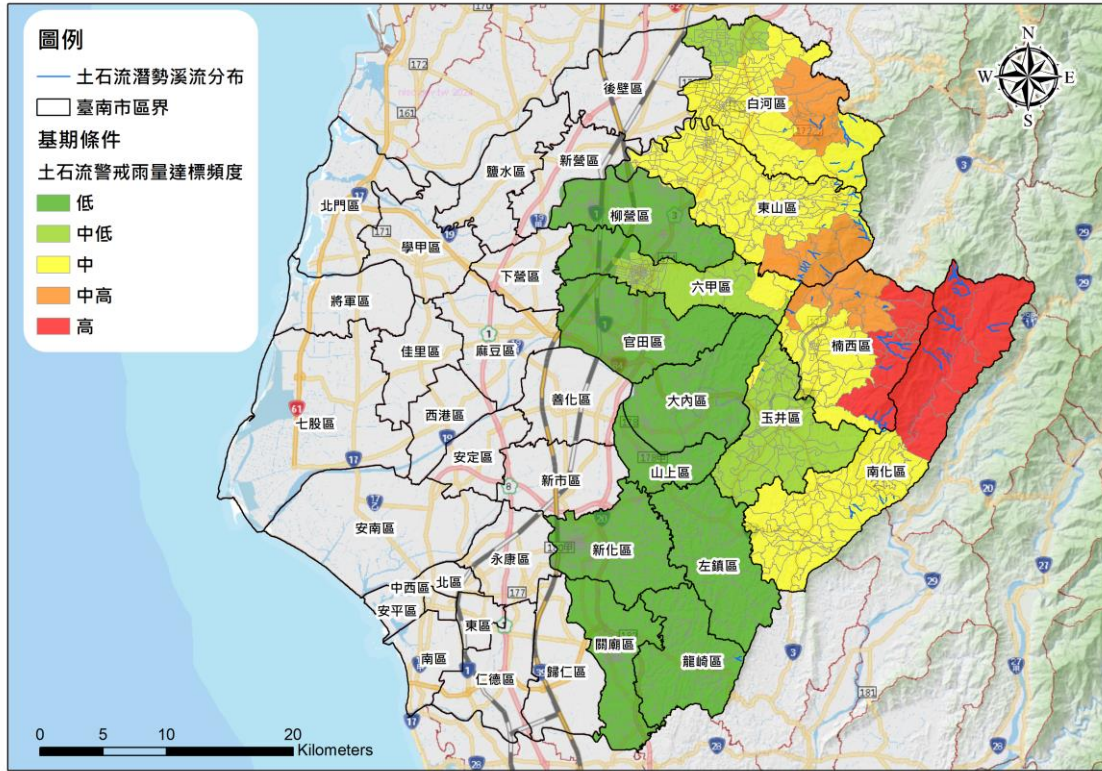


圖4.1-65 臺南市土石流發生頻率比例(基期條件)

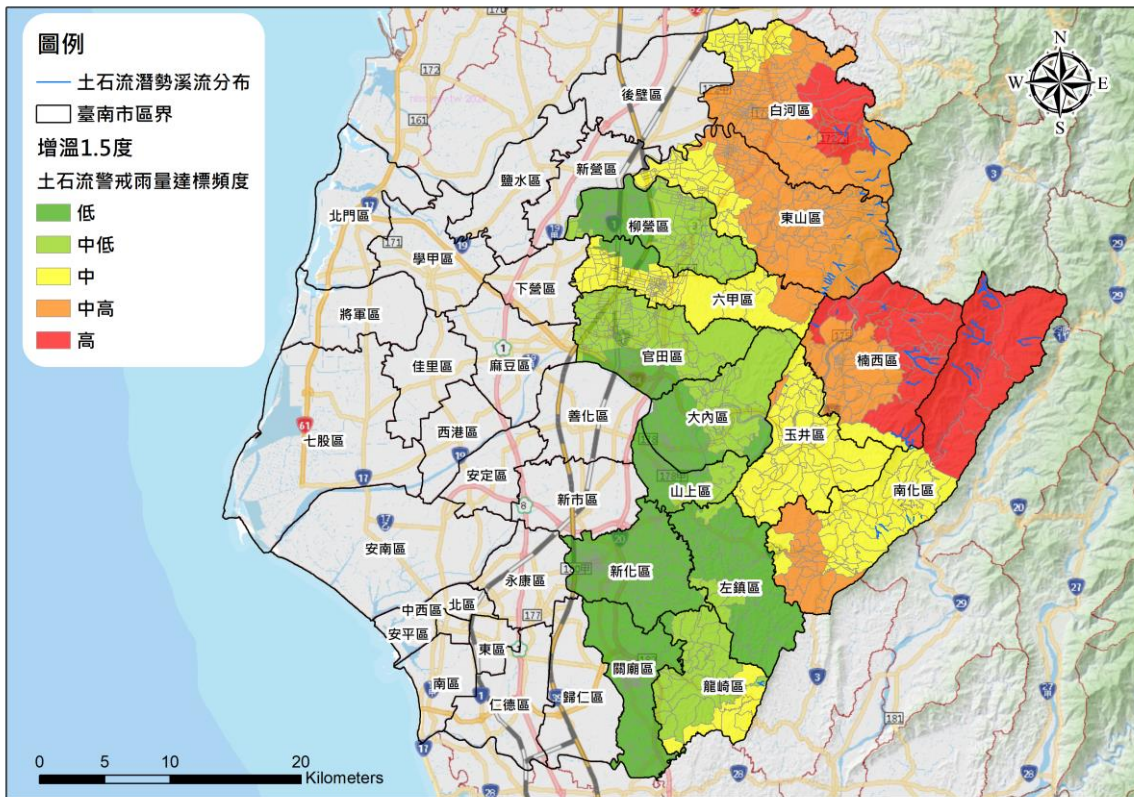


圖4.1-66 臺南市土石流發生頻率比例(增溫 1.5 度條件)

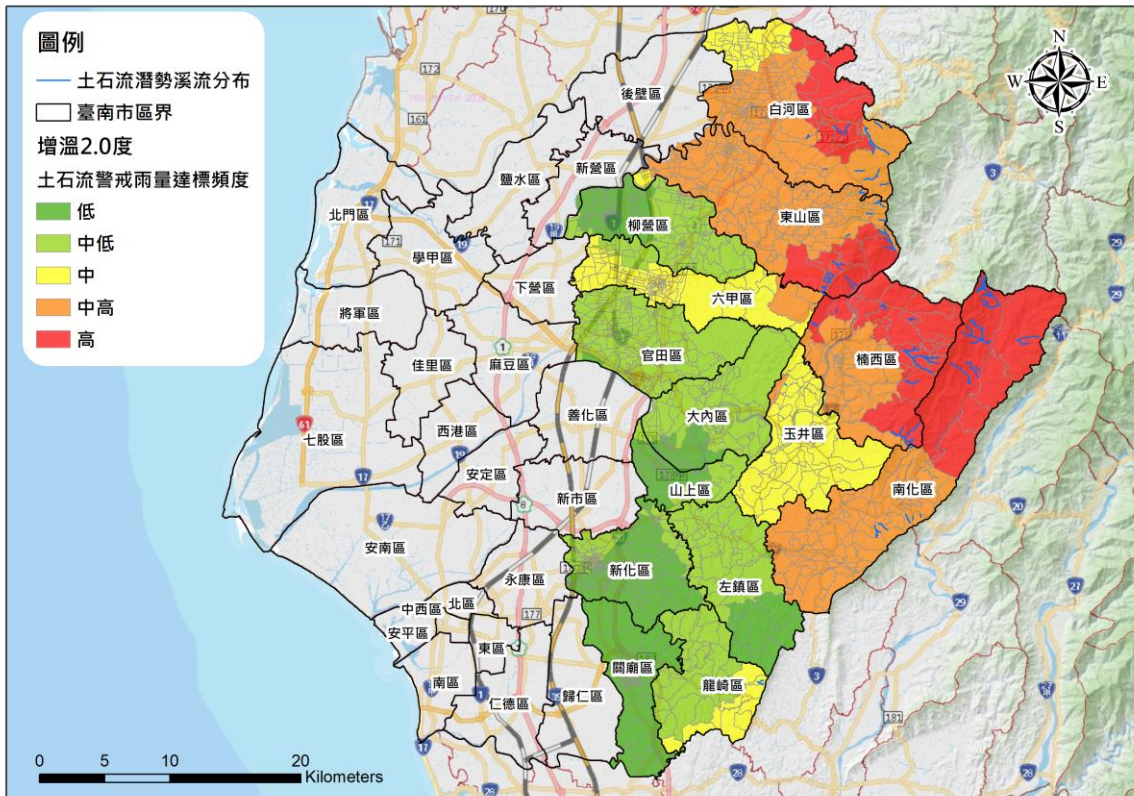


圖4.1-67 臺南市土石流發生頻率比例(增溫 2.0 度條件)

3. 危害度分析成果

以增溫 2.0 度 C 降雨條件 (土石流警戒雨量達標頻度)，配合坡地災害潛勢各因子，進行坡地土砂危害度計算。

根據分析成果，臺南市地區主要土砂災害危害度地區以南化、楠西為主，在南化區部分以南化水庫右岸區為高危害地區，因本身屬砂頁岩互層，又為順向坡，過去為崩塌災害熱區。

而楠西區部分則集中於東側山區一帶土石流潛勢溪流區域，因土石流潛勢溪流集水區上游為長枝坑層與北寮頁岩交界，又有竹頭崎斷層通過，地質較脆弱，易有崩塌災害發生。

另外針對六甲、東山與白河區部分主要高危害度地區以東側山區一帶土石流潛勢溪流區域，因土石流潛勢溪流集水區上游以崙後斷層為界，東側以砂岩區為主，西側以頁岩區為主，因地質分布與斷層通過，使土石流集水區上游區多有不穩定土砂問題。

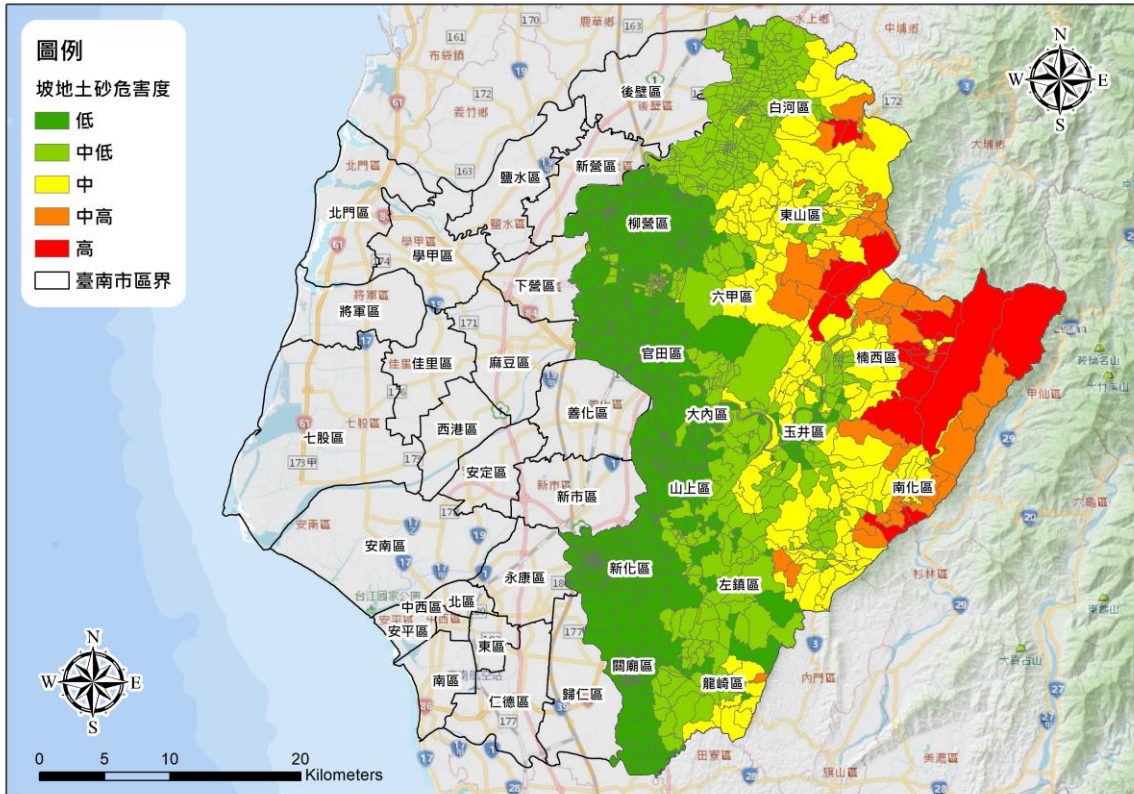


圖4.1-68 臺南市土砂災害危害度成果

(二) 暴露度

1. 暴露因子評估處理

維生通道強度面：當道路受到災害阻斷時，因主要道路車流量與不可替代性較高(如省道)因此暴露得分則越高；反之，得分愈低者，其暴露度愈低；聚落分布面：受土砂災害影響之聚落作為評斷；土地利用程度面：以土地利用影響人為系統程度作為評斷依據，當土地利用為森林利用者，因影響較低，故其暴露度設定為低者。

(1) 維生通道強度

當道路受到災害阻斷時，將會影響居民之逃生路線，亦會影響物資之運送。針對不同道路通行等級給予計算，如主要通行道路(如台 20 線)、次要與其他服務道路(如農路)等，因主要道路車流量與不可替代性較高因此暴露得分則越高；反之，得分愈低者，其暴露度愈低。根據交通部公路功能分類、臺南市地區分高速公路(國道)、快速道路、省道、市道、鄉道、一般道路與無路名道路，道

路等級越高車流量越大、依面積比例評估暴露分數。

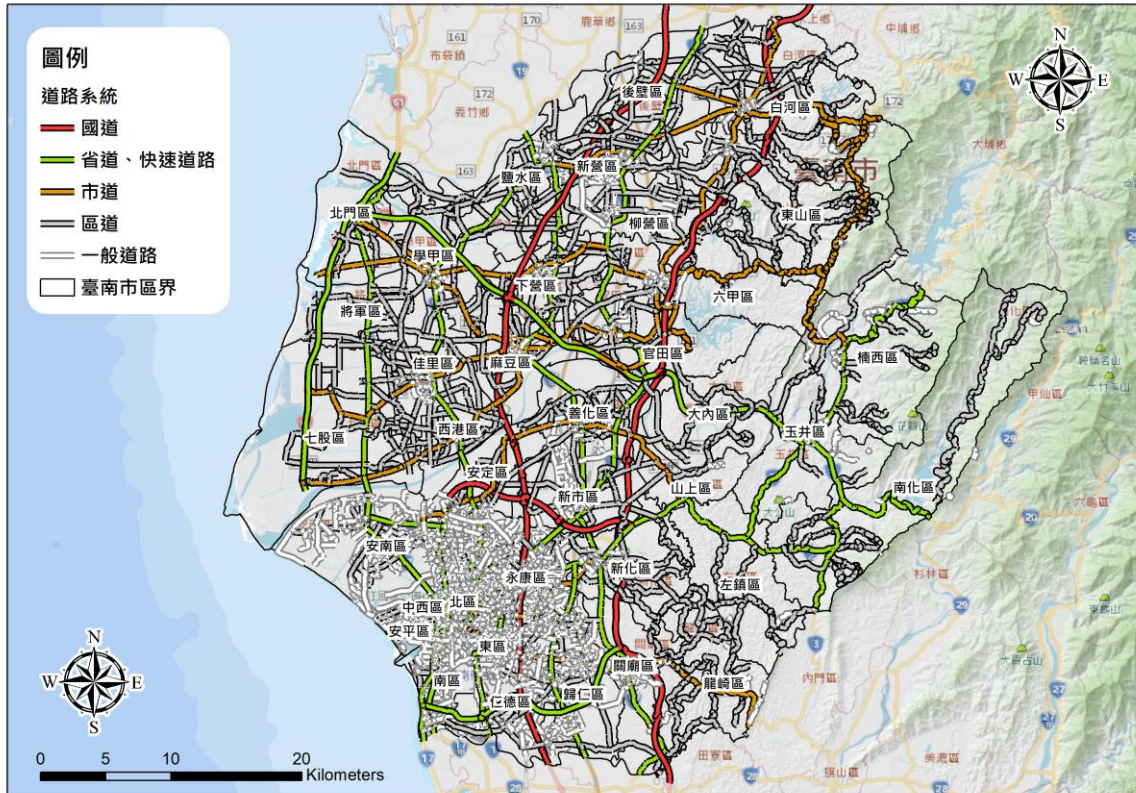


圖4.1-69 臺南市公路功能分類分布

(2) 聚落分布

本計畫以內政部 108 年門牌戶點位進行分析，與聚落、都市發展有關，因此作為聚落分布分析之基礎，透過門牌戶位置分布進行空間密度推估，作為暴露度分數。

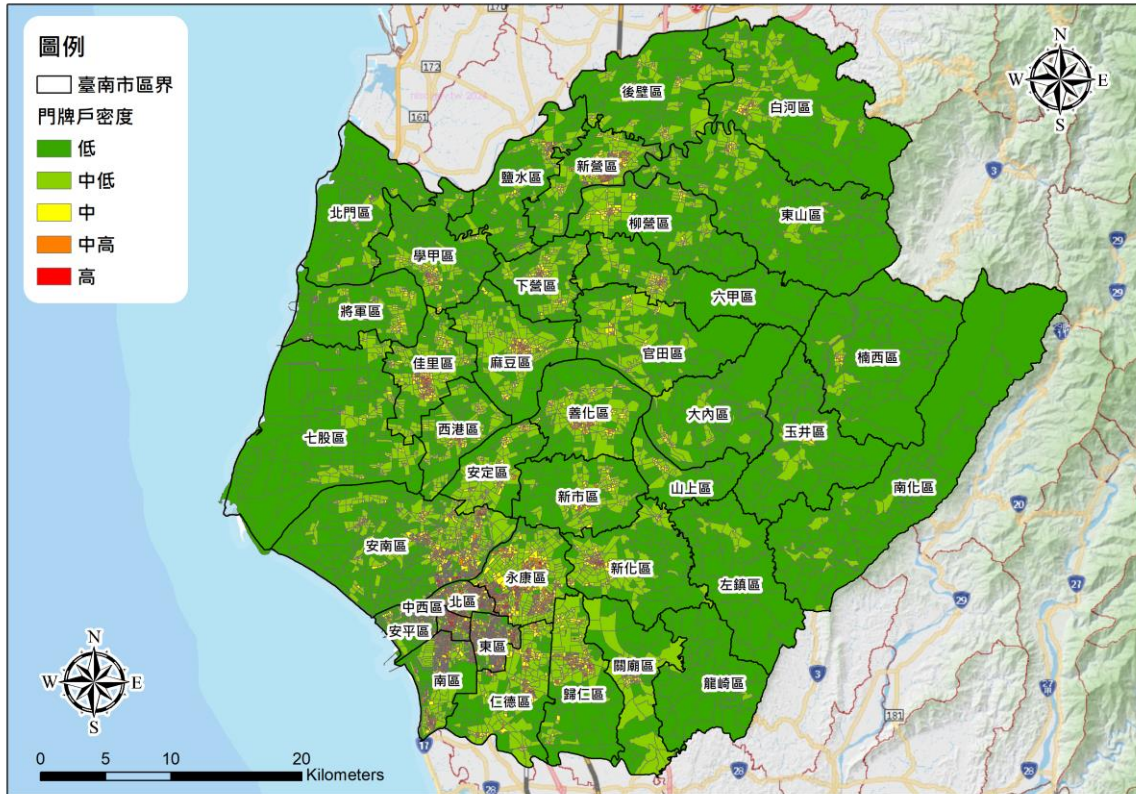


圖4.1-70 臺南市聚落分布

(3) 土地利用程度

本計畫根據 95 年國土利用調查成果，以易受土砂影響與沖蝕為考量，若為森林利用對土砂影響較低；若為其他利用(含崩塌地)對土砂影響較高，以此規則給予集水區中各土地利用得分值，得分愈小者，暴露度愈低；反之，得分愈大者，其暴露度愈高。各土地利用得分值如下表 4.1-7，土地利用程度空間分布如圖 4.1-72 所示

表4.1-7 土地利用暴露度評分表

用地類別	評分	用地類別	評分	用地類別	評分
農業利用	2	水利利用	3	遊憩利用	4
森林利用	1	建築利用	7	礦鹽利用	8
交通利用	5	公共利用	6	其他利用	9

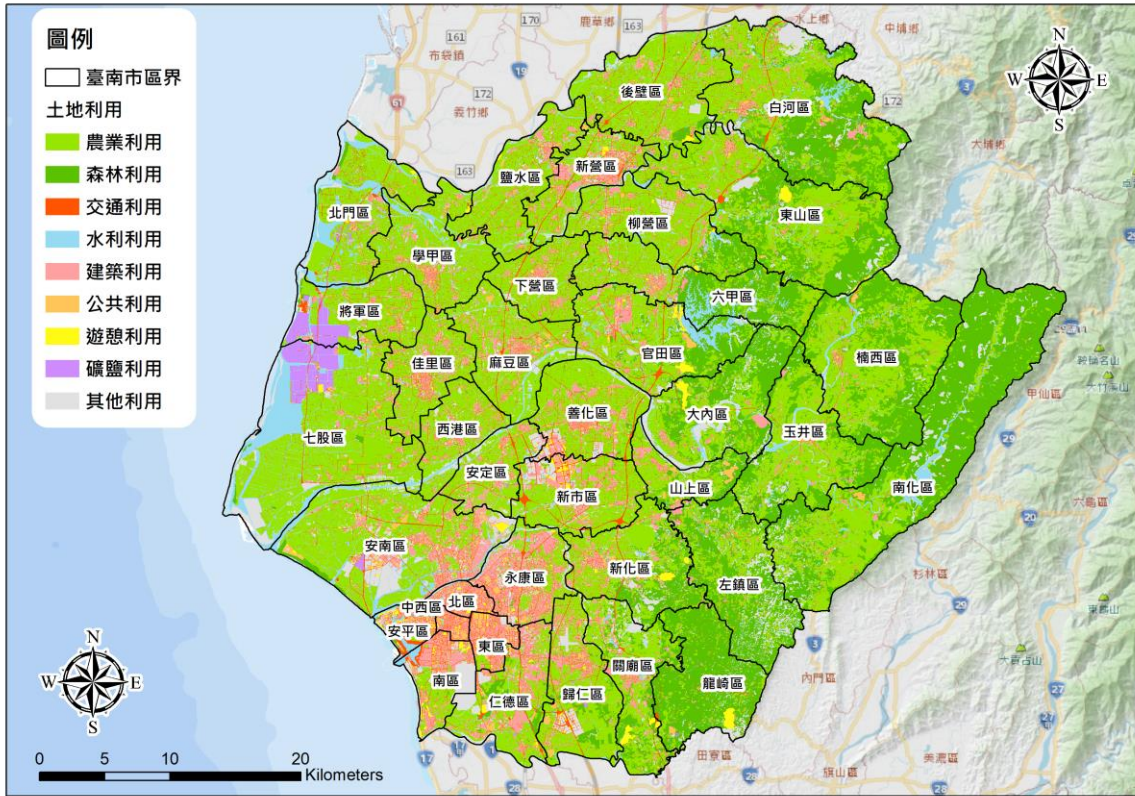


圖4.1-71 臺南市土地利用分布

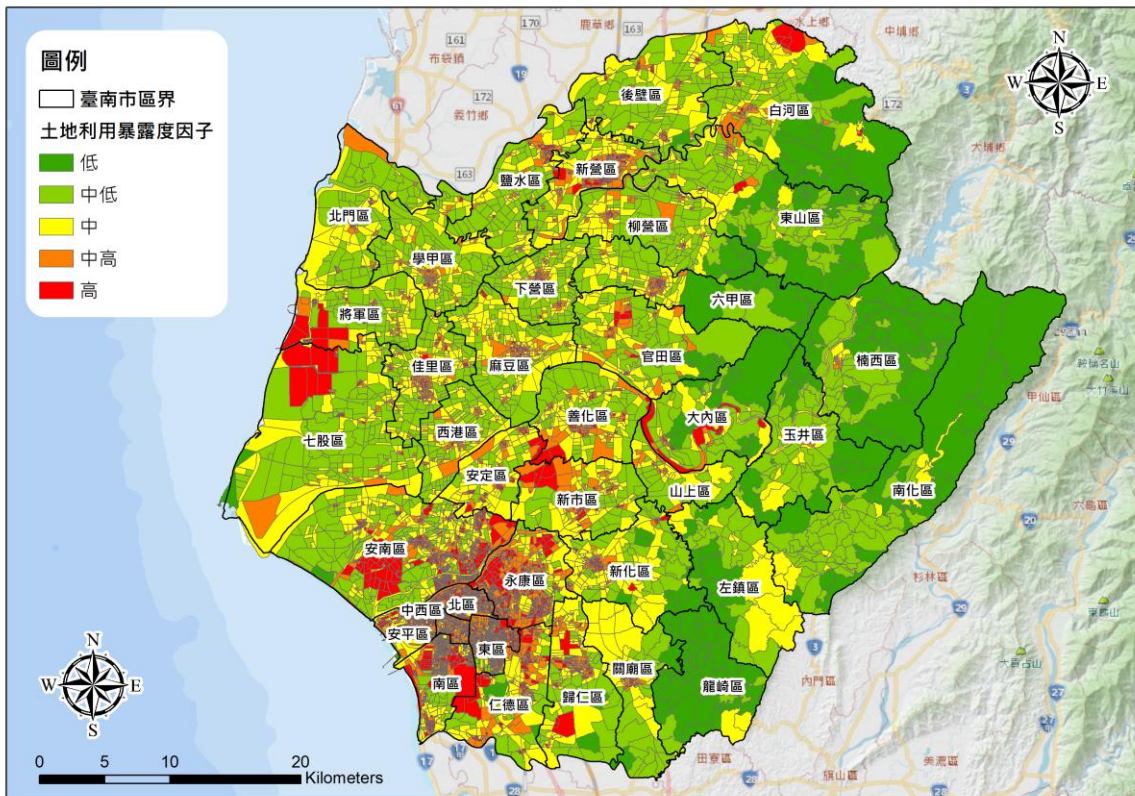


圖4.1-72 臺南市土地利用暴露度評分

2. 暴露度分析成果

因暴露度本身定義係以”人類生命及其生計、環境服務及資源、基礎建設、或經濟、社會、及文化資產處於有可能受到不利影響的地方”可能受外在危害影響的對象及程度，針對土砂災害面暴露度則與人口聚集與城市發展有關，土地利用程度越高，代表其暴露於危險比例越高，建立之暴露度分析成果如下。

表4.1-8 臺南市暴露度因子正規化處理列表

資料處理方式	對應因子
密度	門牌戶分布
面積比例	土地利用、道路等級

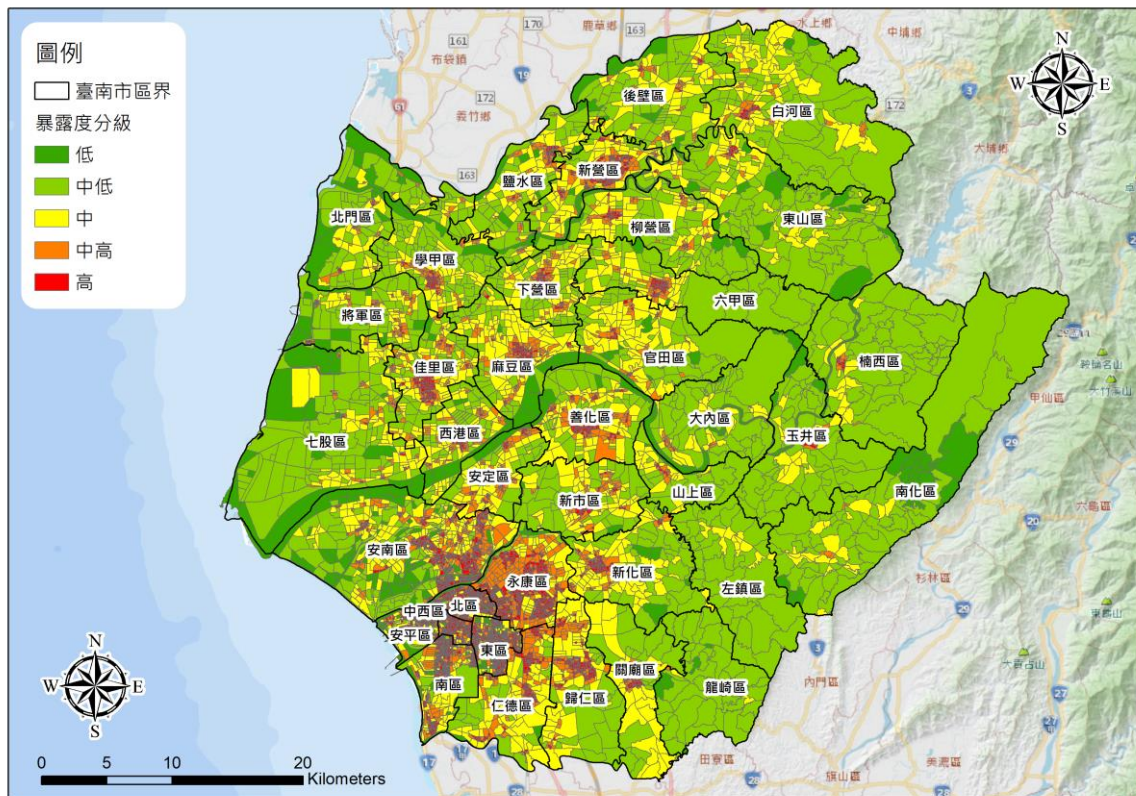


圖4.1-73 臺南市暴露度分析成果



(三) 脆弱度(韌性)

1.路網分析定義(防救災資源投入)

而針對整個區域道路網路運作上，道路系統的功能是否能夠正常運行將直接影響地區避難及救災的效率，但在災後影響道路通行的因素很多，因此確保災時道路能夠正常運行非常重要，影響到災時第一時間的搶救作業。避難及救災動線為災害發生時首先發揮功能的防災系統，且道路系統為其他防災空間的主要聯繫管道。因此在規劃時必須建立在道路系統的特性上，否則可能導致防救災作業效率與運作降低，有效的動線系統更直接反映避難及救災據點是否發揮預期功能(陳亮全等，2004；張立山等，2011；林俊等，2021)。

對於災害風險評估中道路系統通行與否為重要影響因子，如災害應變時，可能遭遇之道路中斷與相關服務時間與其距離是否影響就在量能等量化資訊，可建構出較符合實際情況之情境。因此，針對建構於道路系統之消防單位、警察單位、醫療單位與避難單位等脆弱度分析因子，導入路網風險概念，利用交通部之既有交通路網資料，採用 ArcGIS 之路網分析(Network Analyst)工具，分析之災害服務範圍資料，納入道路特性、考慮旅程時間其相關阻斷等因子，來得到在不同環境條件設定下之道路可服務之區域。本計畫分析之路網通行單位為分鐘之時間尺度，因此參考內政部營建署「市區道路及附屬工程設計標準」將區內各類道路分為主要、次要與相關服務道路等，另考量災害發生與位處山嶺區域道路通行速度可能遭遇影響，因此分別設定時速 40、30 及 20km(如表 4.1-9)。

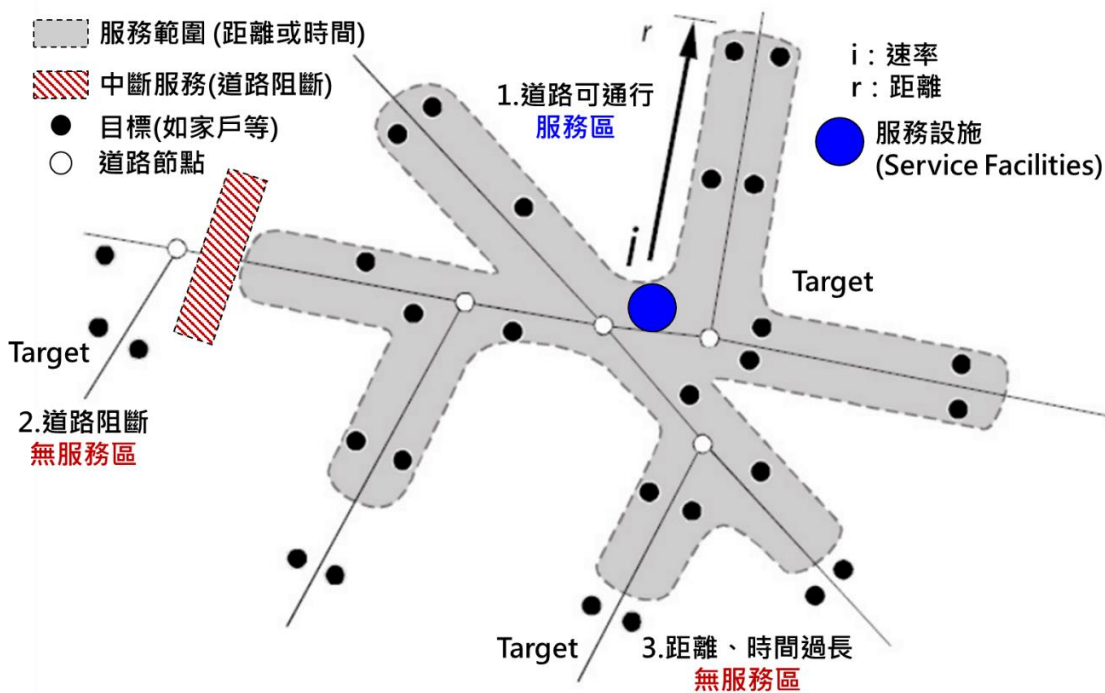
而針對相關救災資源之服務範圍(Service Area)，則參考林俊等(2021)，依據訪談消防相關人員訂定救護車輛抵達之時間區間以 3、5、15、30、60 與 180 分鐘作為服務範圍標準，如院外心跳停止(OHCA)的病人，到院前 15 分鐘如果緊急搶救得宜，才可能被

救活；缺血性腦中風患者若能在 3 小時內使用靜脈血栓溶解劑治療，就有機會遠離腦損傷(林慧淳/康健編輯部；2021)。

表4.1-9 道路設計速率參考表 (km/hr)

道路功能分類設計速率	快速道路	主要道路	次要道路	服務道路
平原區	60-100	60-80	40-70	20-50
丘陵區	60-80	50-70	40-60	20-40
山嶺區	50-60	40-50	30-40	20-30

資料來源：內政部營建署「市區道路及附屬工程設計標準」第九條；註：粗體字為採用速率設定值



資料來源：改繪自 Andres Sevtsuk, 2012 (Urban Network Analysis: A New Toolbox for ArcGIS)

圖4.1-74 道路網路分析服務區概念圖

本計畫蒐集之避難、醫療、消防與警察等相關防災單位空間資料，利用路網分析針對不同車道通行速度設定瞭解地區防救災資源結合性與可及性，本次建構常時與中斷等兩種情境。

針對常時情境，主要分析平常時，既有各類防救災資源之救災時間服務成本，透過路網分析瞭解各單位之服務範圍與道路抵達處，就上述說明將服務區分為 3、5、15、30、60 分鐘等 5 級，作為防救災資源服務脆弱度之條件，瞭解各區域面對災害時，救災資

源之影響狀況。

另針對中斷情境部分，由於臺南地區山區道路有多處土石流與崩塌致災點位曾造成道路中斷狀況、因此本計畫主要以土石流影響範圍與蒐集之坡地災害點位作為道路中斷區位，分析維生道路中斷對防救災資源服務的影響，是否會造成孤島效應狀況，作為後續分析所需。

本次路網分析僅以防救災資源公路移動之時間成本做為考量，未考量道路路寬所涉及之車流量估算。臺南市地區由地形介於平原與丘陵區，在速限設定上，取保守值，並進行後續路網分析工作，速限設定分別設定國道：120 km/h、快速道路：90 km/h、省道：60km/h、市道：50 km/h、區道：40 km/h、一般道路 30km/h、無路名道路 20km/h。

(1) 避難單位服務範圍

透過避難收容處所開設情形，在不考慮收容人數之情況下，選定鄰近計畫區之避難單位。若災害發生時醫療場所愈近則安置能力愈佳，因此，距醫療單位較近者脆弱度愈低；反之，較遠者為脆弱度愈高。

目前臺南市避難收容處所約計有 411 處，分布較充分，以地區性緊急避難需求佈設，15 分鐘內皆可抵達避難收容處所。

(2) 醫療單位服務範圍

透過臺南市衛生局以及衛生福利部醫療單位資料，進行空間點位設定，透過路網分析空間可及性。若災害發生時醫療場所愈近則安置能力愈佳，因此，距醫療單位較近者脆弱度愈低；反之，較遠者為脆弱度愈高。

目前臺南市約計有 112 處，以六甲、東山、南化、左鎮等區較脆弱，部分山區地區移動時間較長，移動時間約需 60 分鐘左右。

(3) 消防單位服務範圍



消防署主要辦理火災預防、人為與天然災害搶救、緊急救護 3 項消防業務，透過消防署給定之消防單位空間點位資料，進行空間點位設定，透過路網分析空間可及性。若災害發生時消防單位愈近則安置能力愈佳，因此，距消防單位較近者脆弱度愈低；反之，較遠者為脆弱度愈高。

目前臺南市約計有 53 處，以南化區較脆弱，因山區地區移動時間較長，且無替代道路，移動時間約需 60 分鐘左右。

(4) 警察單位服務範圍

當災害來臨時警察單位首要任務便是治安維護任務與協助救災相關事宜，包含災區警戒巡邏以防止竊盜、搶劫等不法事件、設置災區警戒標示以維護安全、動員警力維護交通順暢，並協助救難人員執行搶救工作等。災難發生時，無論是進行救災救護工作、協助安置災民或是發放救災物資等，需要穩定的秩序及安全的環境來進行，否則可能變成另一場災難甚至暴動，進而導致更多的傷亡(102 年關鍵基礎設施災害脆弱度評估與風險管理：災害衝擊評估方法 II，國家災害防救科技中心)。

蒐集臺南市警察單位，進行空間點位設定，透過路網分析空間可及性。若災害發生時警察單位愈近則安置能力愈佳，因此，距警察單位較近者脆弱度愈低；反之，較遠者為脆弱度愈高。目前臺南市約有計 145 處，以楠西、南化區較脆弱。

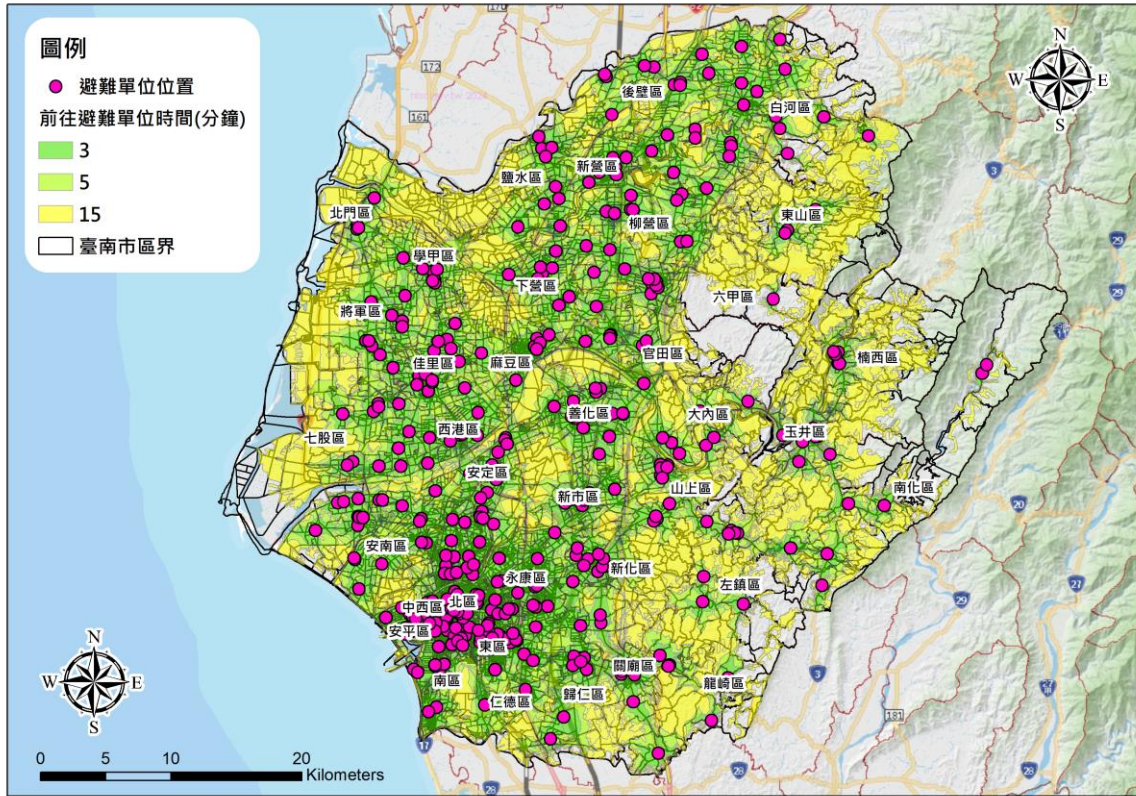


圖4.1-75 避難單位服務時間成本分析圖

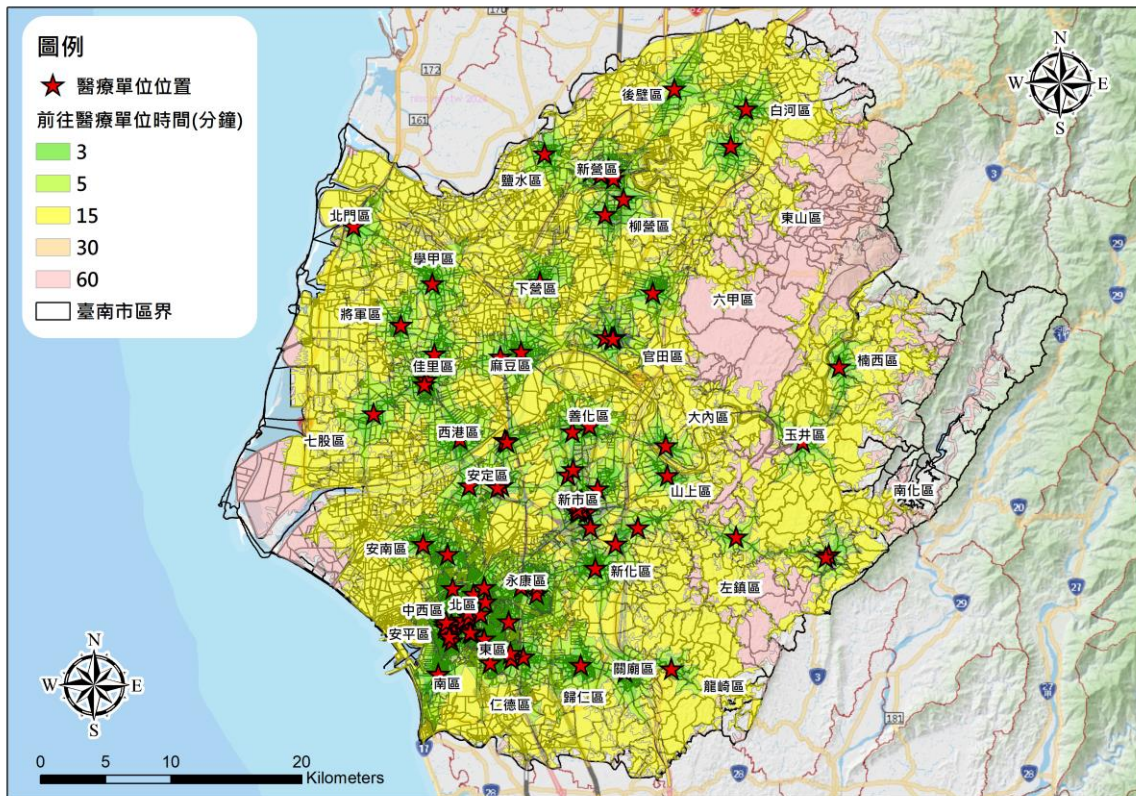


圖4.1-76 醫療單位服務時間成本分析圖

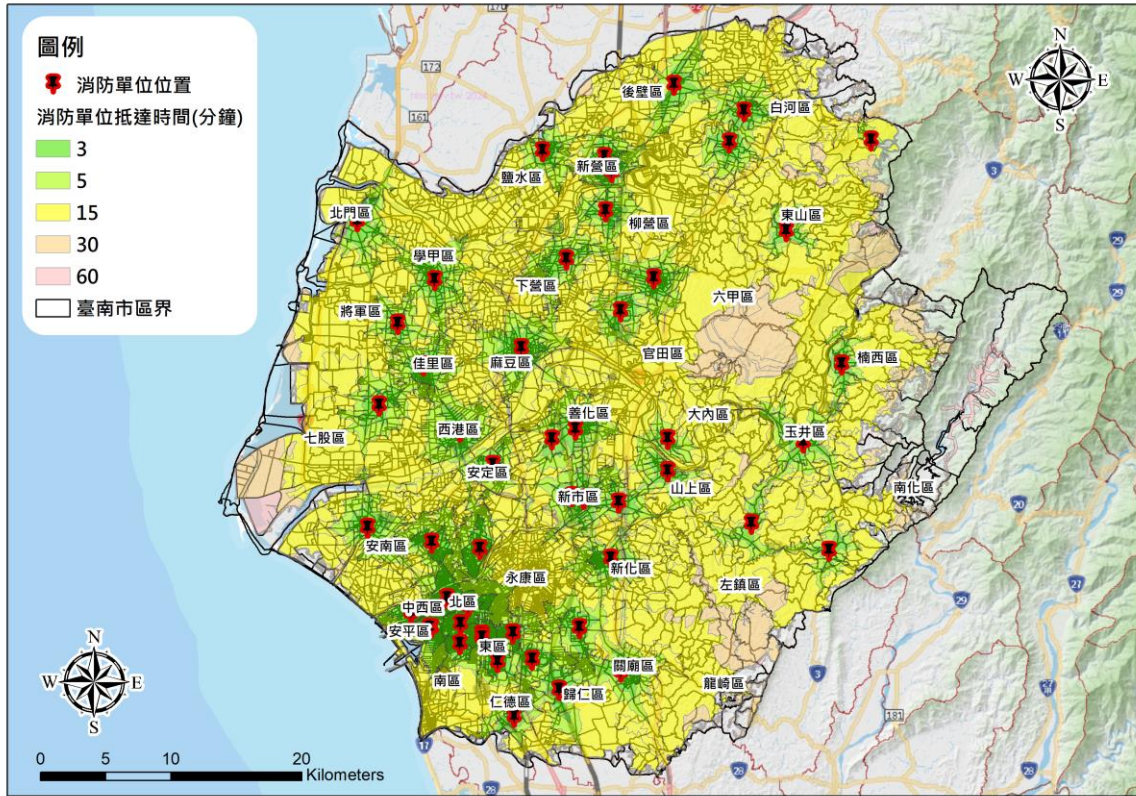


圖4.1-77 消防單位服務時間成本分析圖

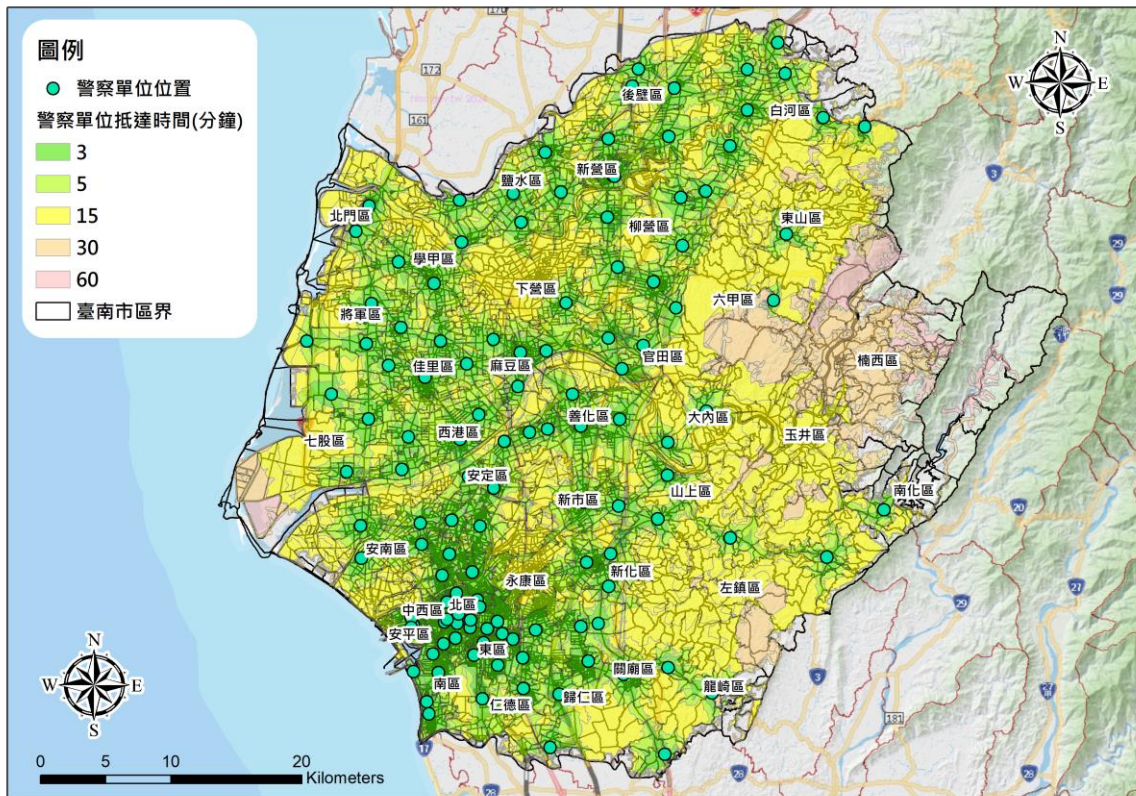


圖4.1-78 警察單位服務時間成本分析圖



2.人口指標組成

因人口分布並非常態化分布，需利用幾何間隔(Geometrical interval)分類較能呈現變異狀況。

(1)人口密度

透過 112 年 6 月所公布最小統計區圖資，求得統計區內總人口數，以及最小統計區面積，並以最小統計區之面積除以人口數，進而獲得統計區內人口密度。當人口密度愈高者，面臨災害時，可能造成較嚴重之損害，因此，人口密度較高者脆弱度愈高；反之，人口密度較低者脆弱度愈低。目前臺南市人口密度脆弱度，主要較集中都會區。

(2)幼童與年長人口密度

透過 112 年 6 月所公布的最小統計區圖資，求得統計區內三段人口架構資料，14 歲以下、14-64 歲與 65 歲以上之三段年齡組成統計資料，視 14 歲以下人口為幼童，以及 65 歲以上為老人，進行弱勢人口統計，當弱勢人口數較高者，脆弱度較高；反之，弱勢人口數較低者，其脆弱度亦較低。目前臺南市幼童人口密度脆弱度，主要較集中都會區，而年長人口密度脆弱度，除都會區外，偏鄉地區相對較明顯。

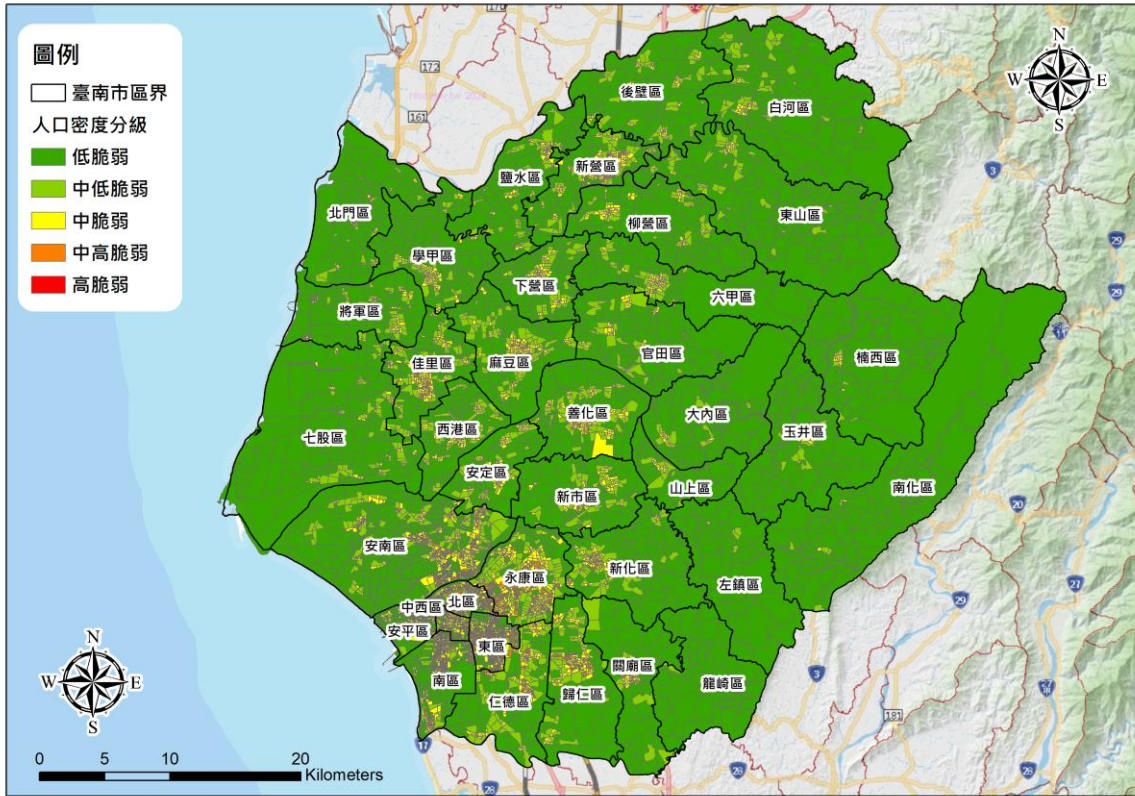


圖4.1-79 人口密度脆弱度

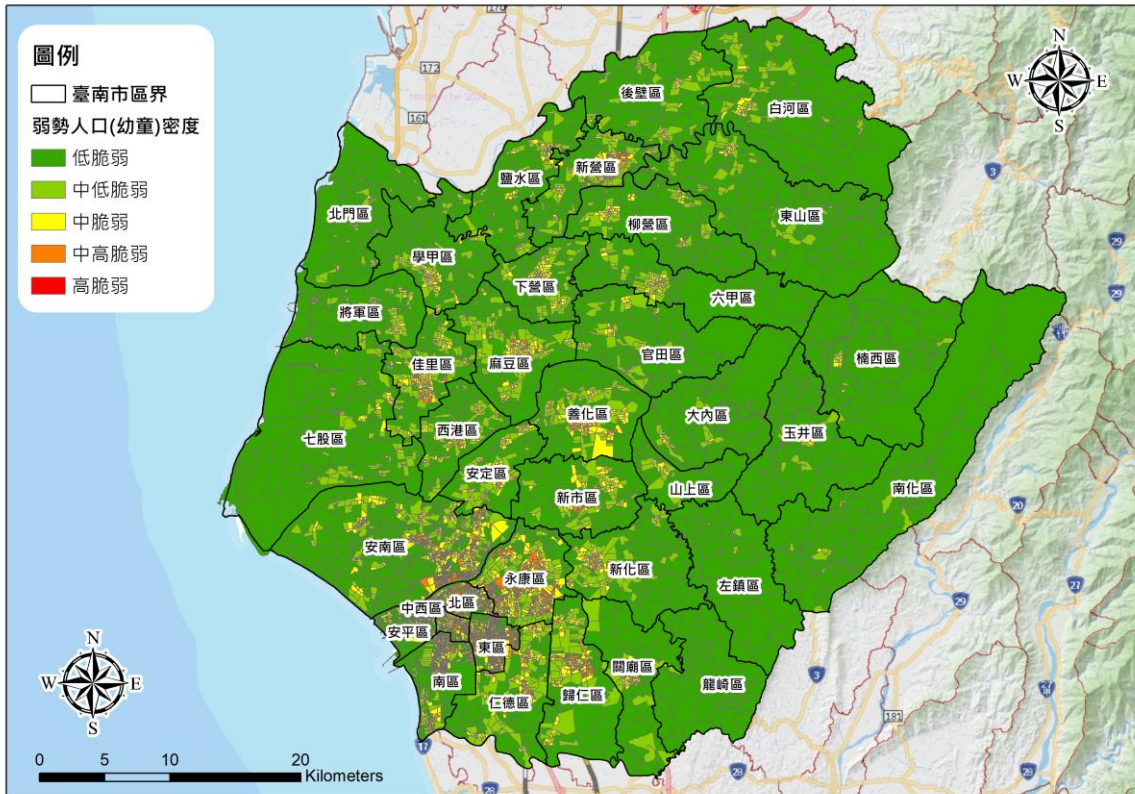


圖4.1-80 幼童人口密度脆弱度

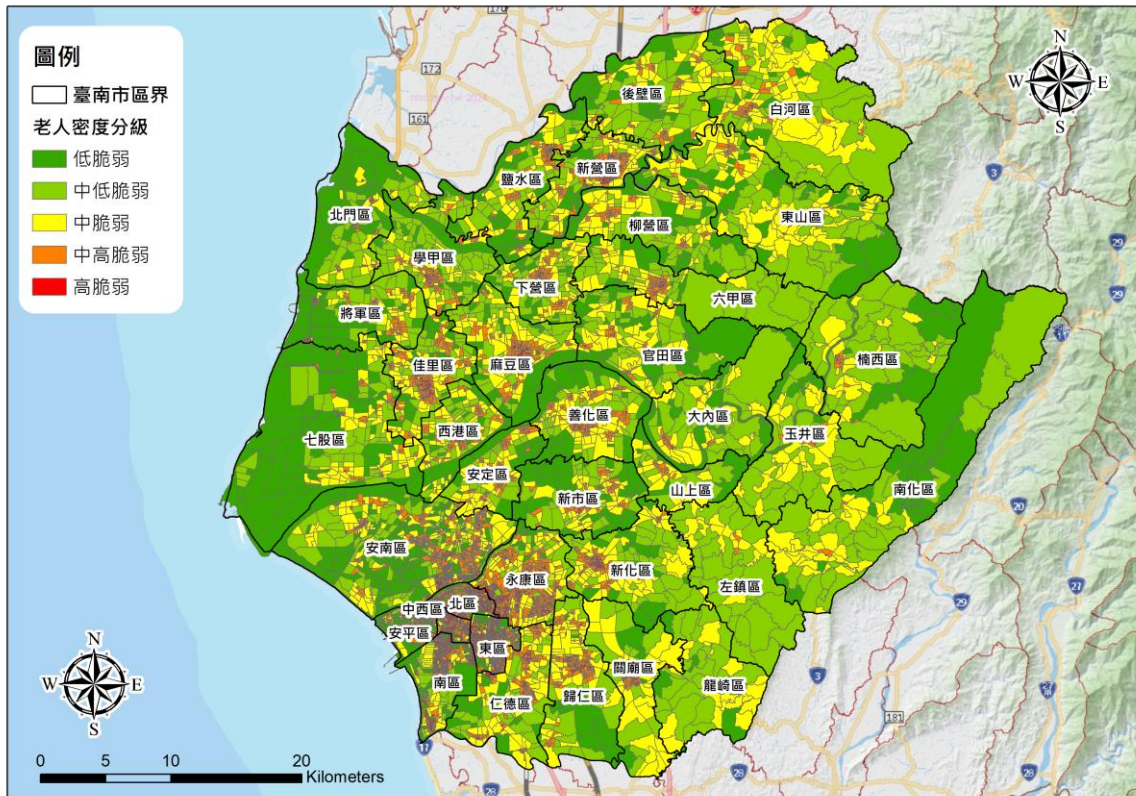


圖4.1-81 年長人口密度脆弱度

3. 社會經濟與防災演練

(1) 土石流自主防災社區演練

以 110 年市府水利局資料，透過土石流自主防災之推動，當村里參與較多實作演練與兵棋推演活動，將參加次數加總獲得自主防災能力得分，當面臨災害時，則有較佳之社區防災能量，因此脆弱度與演練次數成反比，自主防災能力得分較低者脆弱度愈高；反之，得分較高者則脆弱度愈低。針對自主防災演練層級進行分級，若曾辦理兵棋推演(0.5 分)與實作演練(1.0 分)則較低脆弱，以演練次數統計後進行分級。

表4.1-10 臺南市土石流自主防災社區 2.0 推動歷程

臺南市土石流自主防災社區 2.0 推動歷程									
編號	區	里	104 年	105 年	106 年	107 年	108 年	109 年	110 年
1	白河區	關嶺里				●			○
2		大林里			○			○	●
3		六溪里					○		○
4		仙草里					○		○
5	東山區	南勢里	○			○		○	●
6		高原里			○	○		○	
7		青山里				○		○	
8	楠西區	密枝里	○			○		○	
9		照興里		○			○		○
10		龜丹里					○		○
11		灣丘里					●		
12	六甲區	大丘里				○		○	
13	玉井區	豐里里					○		○
14	南化區	關山里	○			○		○	○
15		玉山里		○		○	●	○	
16	龍崎區	龍船里			○	○		○	

註：○：兵棋推演；●：兵棋推演+精進實作演練

(2) 平均所得

透過財政部公布村里尺度之 109 年綜合所得稅平均所得資料，所得相對較高者，視為對災害抵抗回復能力相對較高，因此脆弱度與收入成反比，所得較低者脆弱度愈高；反之，所得較高者則脆弱度愈低。目前以整體臺南市地區而言，以都會區為低脆弱度區。

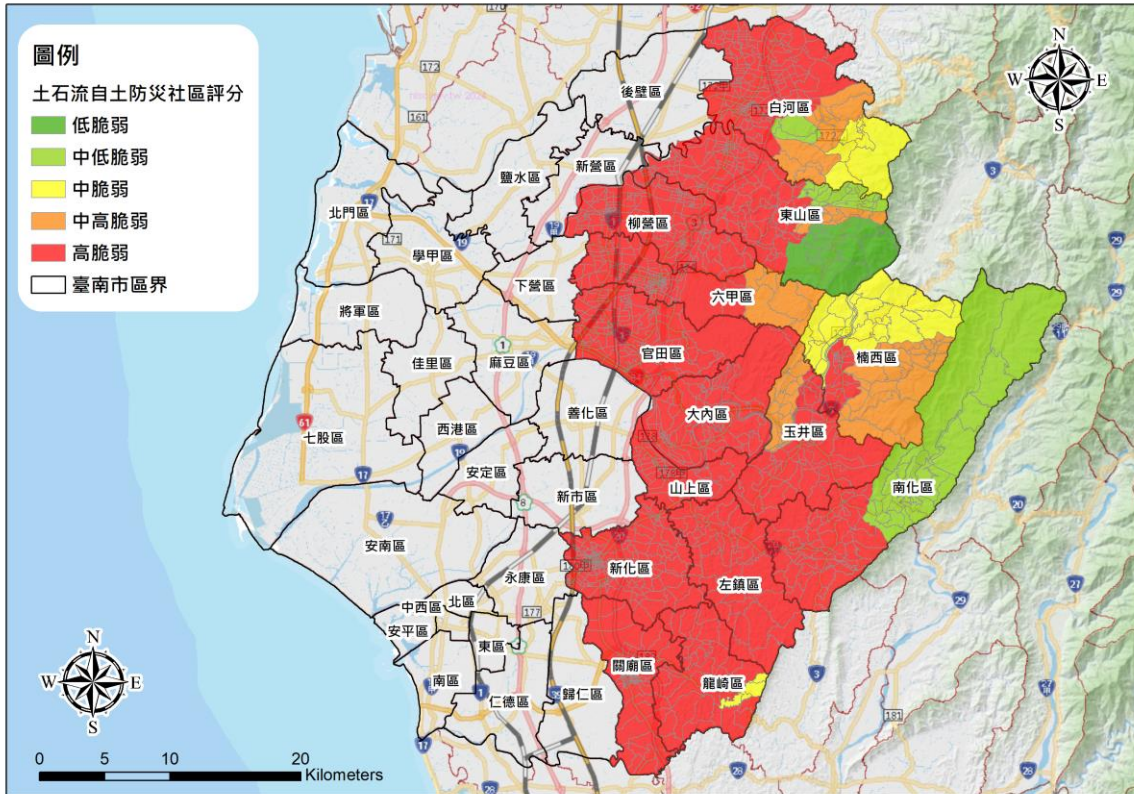


圖4.1-82 土石流自主防災社區演練脆弱度評分

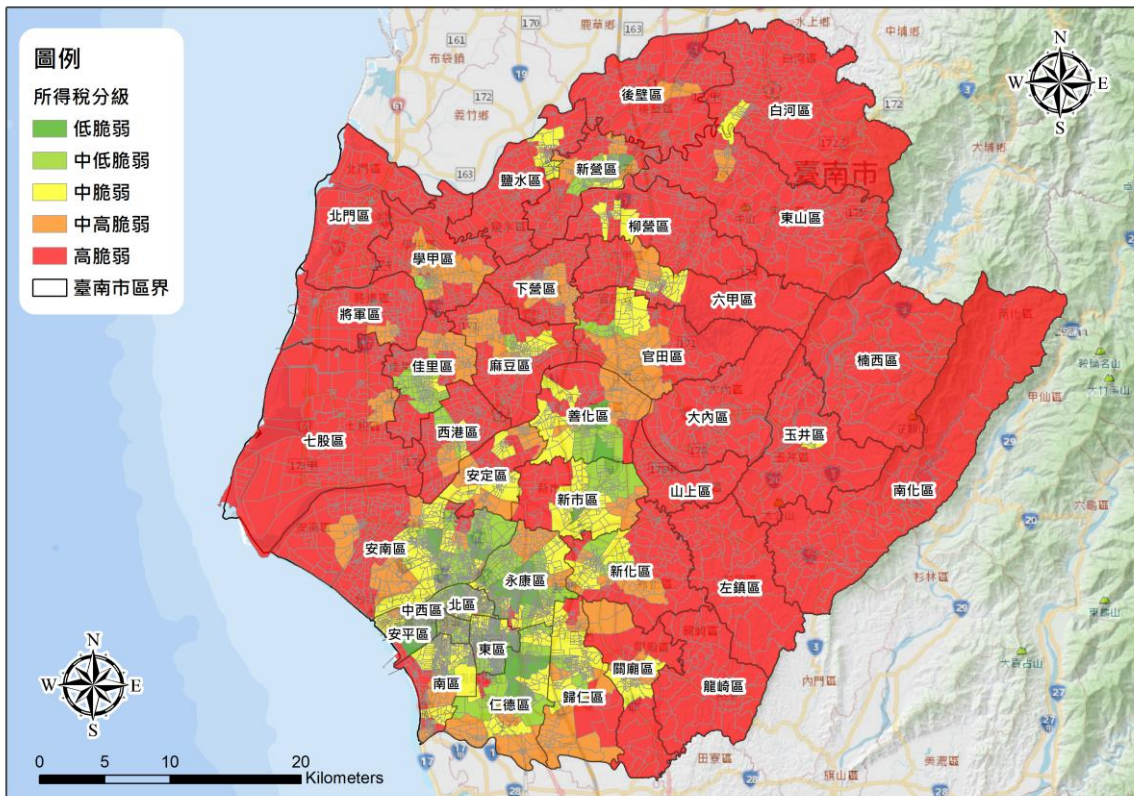


圖4.1-83 所得稅級脆弱度評分

4.脆弱度分析成果

脆弱度包含人口結構、社會經濟、救災資源服務與土石流自主防災社區(著重山區)。脆弱度分級越靠近都會區，脆弱度越低，受到救災資源服務時間性影響。同時也顯示偏鄉地區依賴維生道路，若遭遇土砂災害使道路中斷時，各避難處所位置主要鄰近聚落區域，因此能提供避難服務(救難物資充足前提下)。否則便有孤島危機風險。

表4.1-11 臺南市暴露度因子正規化處理列表

資料處理方式	指標方向	對應因子
密度	正比 (密度越高，脆弱度越高)	人口密度、幼童、年長人口密度
路網分析 面積比例	正比 (時間越長，脆弱度越高)	避難、醫療、消防與警察單位 服務可及性
數值正規化	反比 (演練越多，脆弱度越低)	土石流自主防災社區演練
	反比 (收入越高，脆弱度越低)	所得稅級

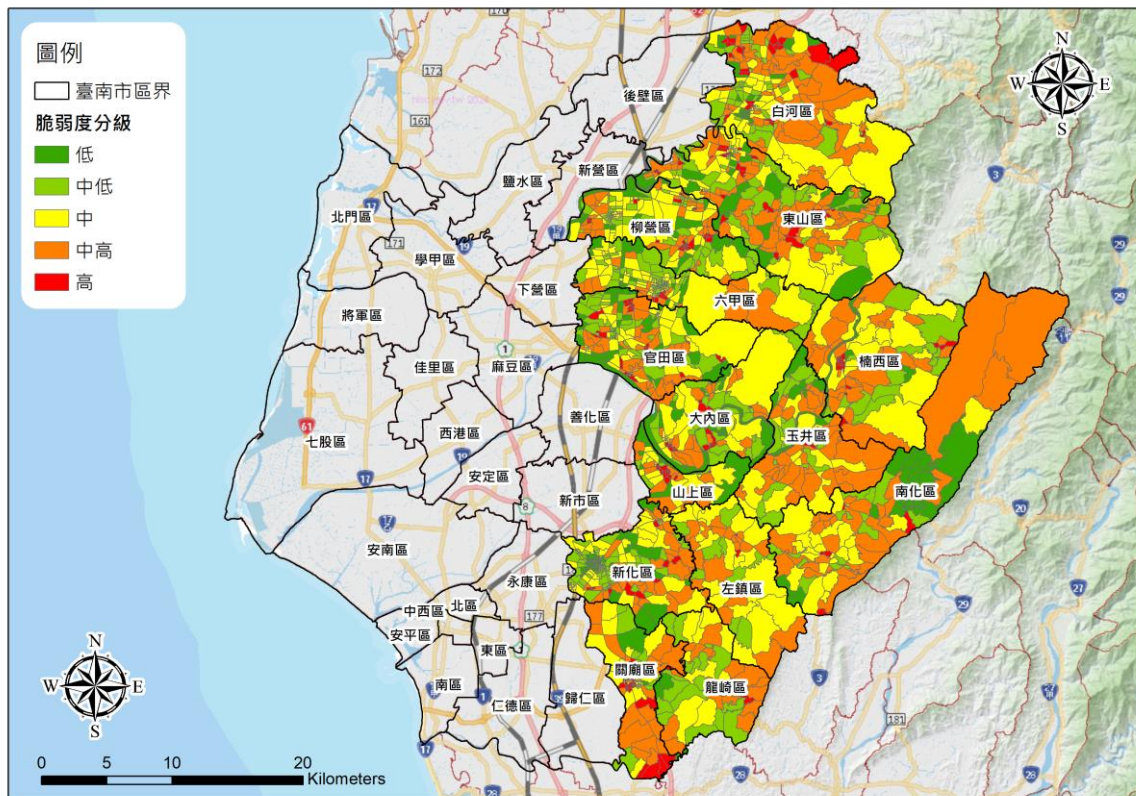


圖4.1-84 臺南市脆弱度分析成果

(四) 風險評估

災害風險評估方法考量危害度(Hazard)、暴露度(Exposure)及脆弱度(Vulnerability)等三個面向進行評估，由於考慮三個面向之重要性為一樣重要，因此以等權重(歸一正規化方式評估)方式進行計算，而在特異值影響較大的情況時，則會先針對數據取 Log10 後再計算，最後將三個面向乘以權重值再相乘而獲得各網格之風險值，並將風險值利用幾何間隔分類分為低、中低、中、中高以及高共五個等級。

以空間單元為最小統計區的臺南市坡地災害風險圖，評估相對高風險區位，以歷史重大災害位置(農業部農村發展及水土保持署)驗證評估合理性，皆位於中風險以上，能較吻合臺南土砂災害趨勢，並配合 NCDR(89~109 年)坡地災害資料庫，套疊顯示統計區有反映致災熱區空間性，初步顯示本次風險分析仍具合理性。**主要風險區位以南化、楠西與白河山區為主。**

本次初步分析之成果，後續根據相關資料更新成果，再進行風險分析之調整，如最新之防救災單位數量、道路圖資、土地利用等。

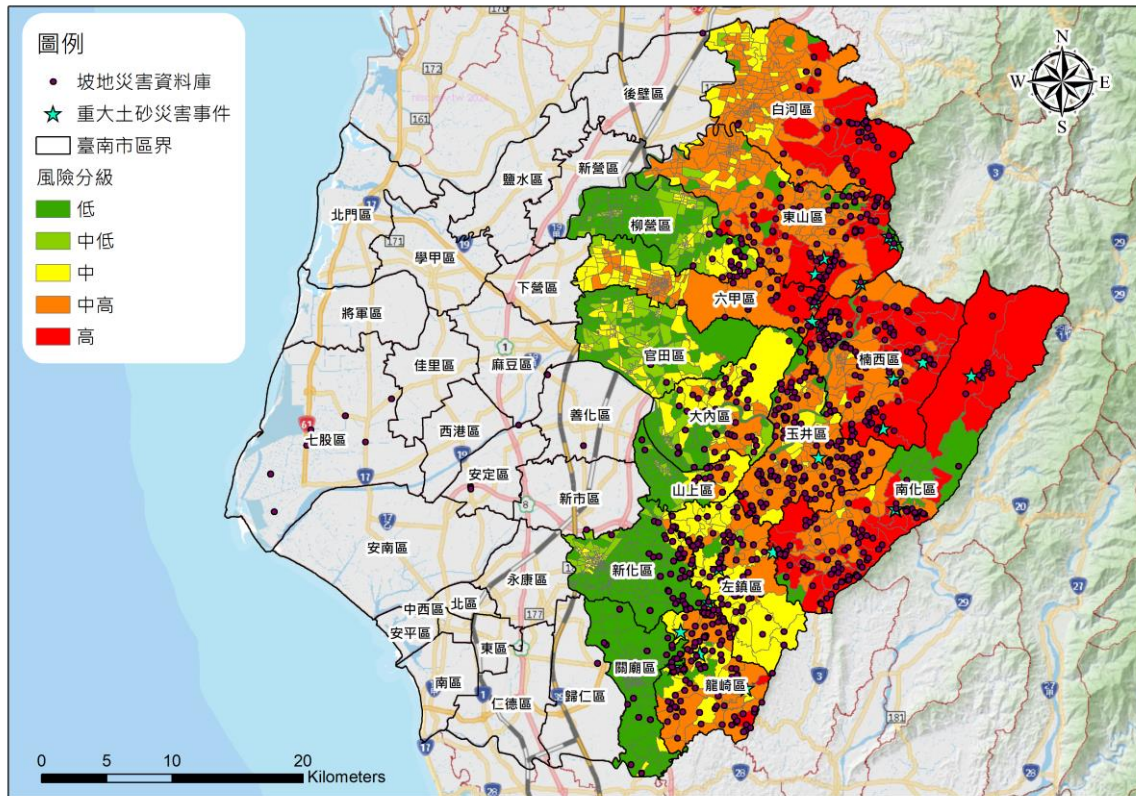


圖4.1-85 臺南市土砂災害風險分析成果

4.1.3 熱浪

一、 危害度、脆弱度指標篩選

該熱浪分析的主要目的是識別未來高溫天數的分布情況。通過非結構性的建構方法，分析如何減少高溫導致的各種間接經濟和健康損失，包括生物棲地破壞、設施故障、糧食作物產量減少、疾病增加以及勞動力工作效率降低等。

由於高溫熱浪圖資僅呈現高溫連續天數，未考慮不同地方地形地貌帶來的升溫或降溫效果（如都市熱島效應、濕地降溫效果等）以及人為熱源的影響。因此，當前工作的重點是建構風險評估操作框架，進行多層面的疊加分析，全面檢視與此議題相關的風險因子及其影響，從而提高調適策略的可行性和合理性。

這種分析方法旨在提供更準確的數據，以支持決策者制定應對高溫

熱浪的策略，最終達到減少其負面影響的目標。

二、 氣候變遷情境選定

在熱浪的模式中，採用空間解析度為 0.05° ，網格為 GCS_WGS_1984 座標系統，在臺南市範圍共有 105 個網格，其模式採用 TaiESM1 模式數值進行後續分析作業。在 TCCIP 指標說明中，極端高溫持續指數 HWDI(Heat wave duration index)為一年之中，連續 3 天以上日最高溫高於基期第 95 百分位數之事件總天數，單位為天，故以此為基礎，以下分析將參考連續 3 天以上日最高溫高於基期第 95 百分位數作為極端高溫持續指數並進行分析。

其採用 1995 年至 2014 年作為基期標準年限，級距分級則以樣本數就持續天數的比例進行 5 級區分，級距分級採用等間距分類法 (Equal interval)進行分級，等間距分類法為將所有樣本數依序排列，分為 5 個等級，其各等級組距為相同數值並進行分類，以得出明顯的空間差異化，其臺南熱浪 HWDI 危害度基準指標如圖 4.1-86 所示。

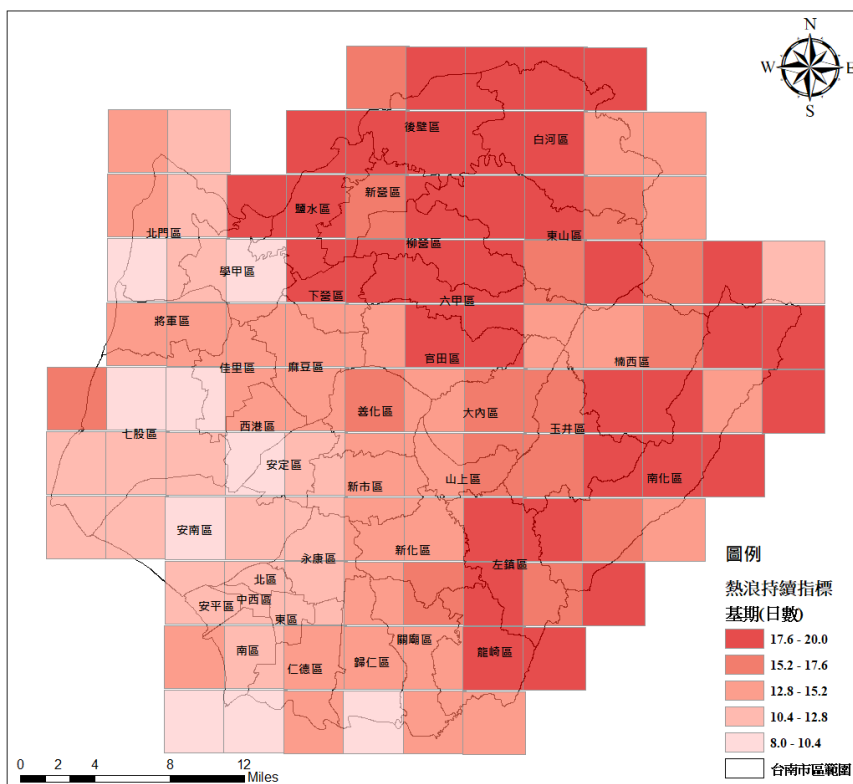


圖4.1-86 氣候變遷 AR6 熱浪 HWDI 危害度基準指標

三、 氣候變遷風險分布圖產製

而針對台南市區域未來推估變化，採用 AR6 上升 1.5°C 以及 2.0°C 情境下的 HWDI，與基期 HWDI 之差異量作為展示，在升溫 GWLs 1.5°C 以及 2.0°C 情境中，台南市西南方鄉鎮溫度變化較多，包括仁德、東、南、北、中西、安平、安南、安定、西港、七股、佳里、將軍等區 HWDI 指數差距較為明顯，成果如圖 4.1-87 及圖 4.1-88 所示。

該定義風險(Risk)=危害(Hazard)×脆弱度(Vulnerability)是一個機率值，為各種危害，與自然、社會、經濟和環境脆弱度因子相互作用下所形成災害風險，以及造成的預期損失或損害。其中，脆弱性則表示為氣候變遷下所造成的衝擊影響程度，利用破壞力與暴露量評估。破壞力為暴露單元受氣候變化影響的容易損失程度，暴露量為不同系統或部門，暴露於氣候變遷影響中的數量或程度，而可能性為氣候變化的不同情境。而風險評估是分析潛在危害與易致災的現況，即將對人民、財產、生計及環境造成威脅或傷害，其易致災風險地圖的研究流程如圖 4.1-89 所示。

災害風險(Risk)=危害(Hazard) × 脆弱度(Vulnerability)

危害係指會誘發對人類潛在威脅之災害的因子，可分析其規模或頻率等，也可稱為災害誘發因子；脆弱度則係指面對災害發生時，會增加易損度的狀態，此狀態取決於實體(Physicality)、社會(Society)、經濟(Economy)與環境(Environment)等面向。熱浪災害風險地圖分析產製方式如圖 4.1-90 所示。

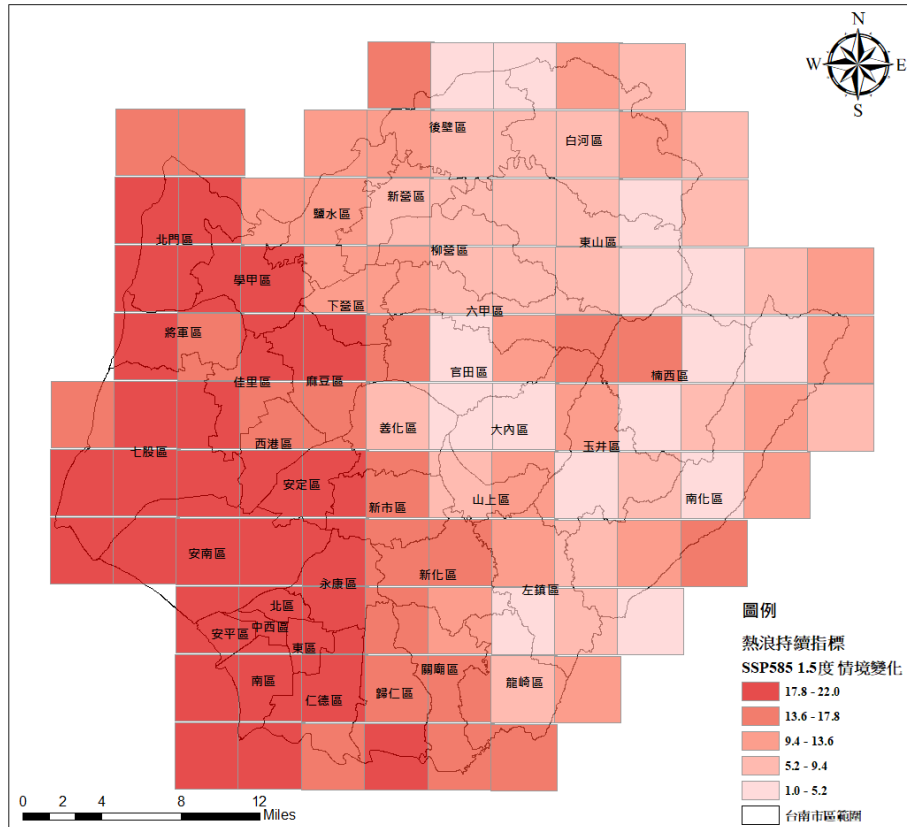


圖4.1-87 氣候變遷 AR6 熱浪 1.5°C 情境變化量

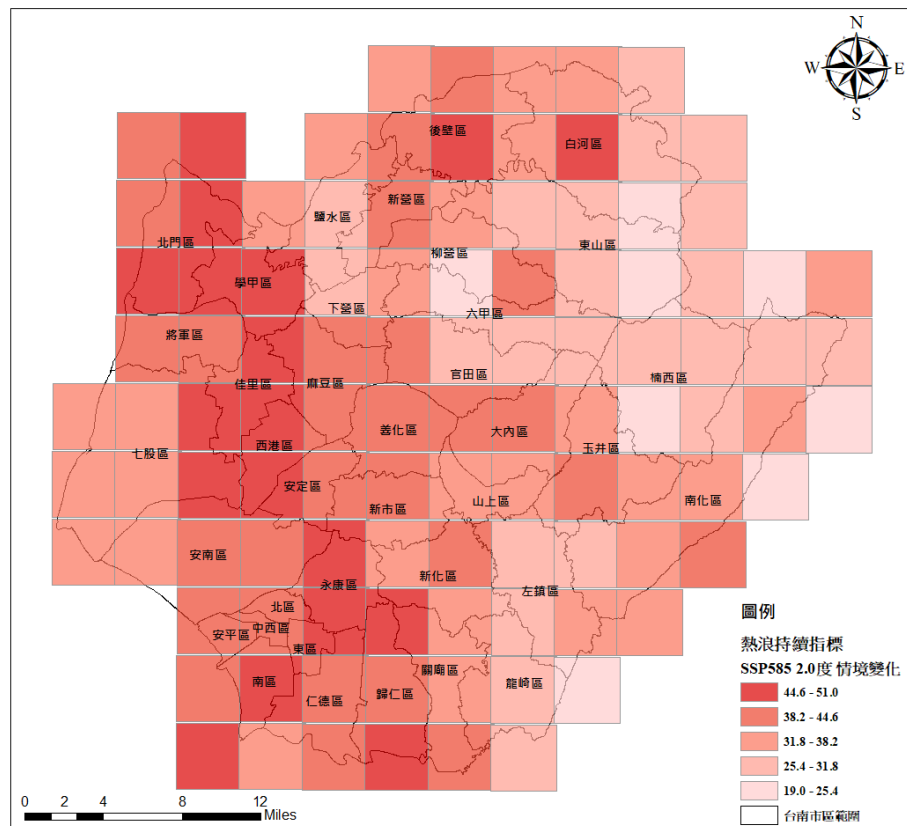


圖4.1-88 氣候變遷 AR6 熱浪 2.0°C 情境變化量

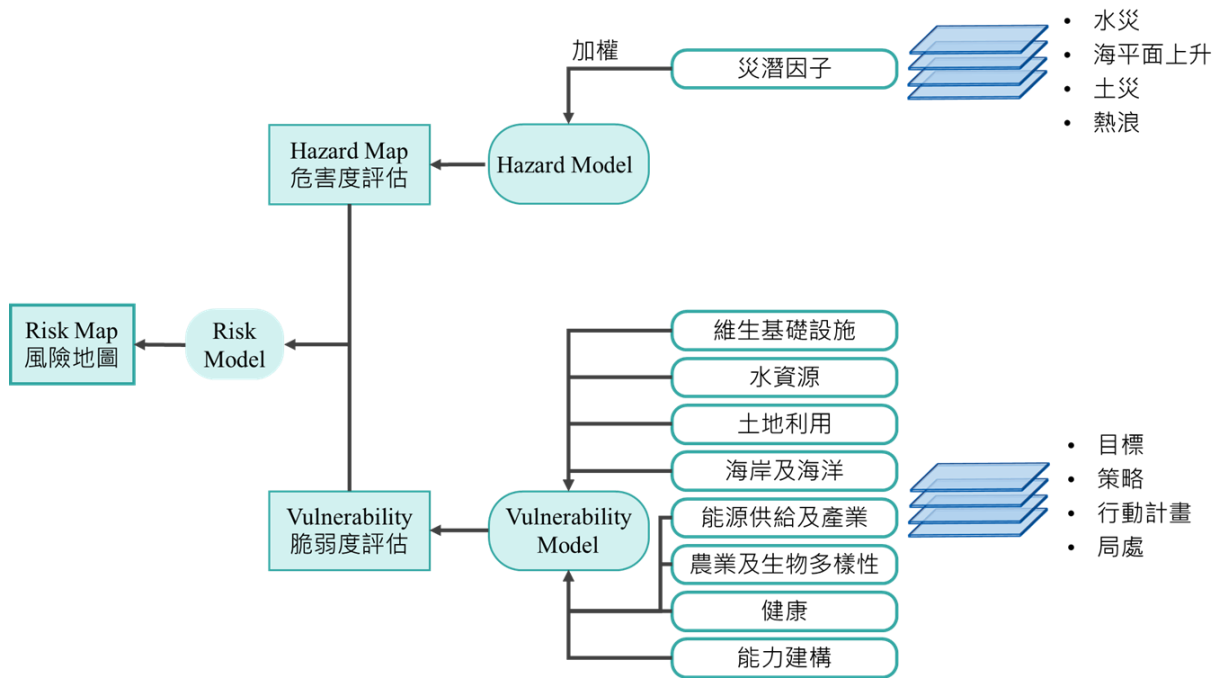


圖 4.1-89 易致災風險地圖研究架構圖

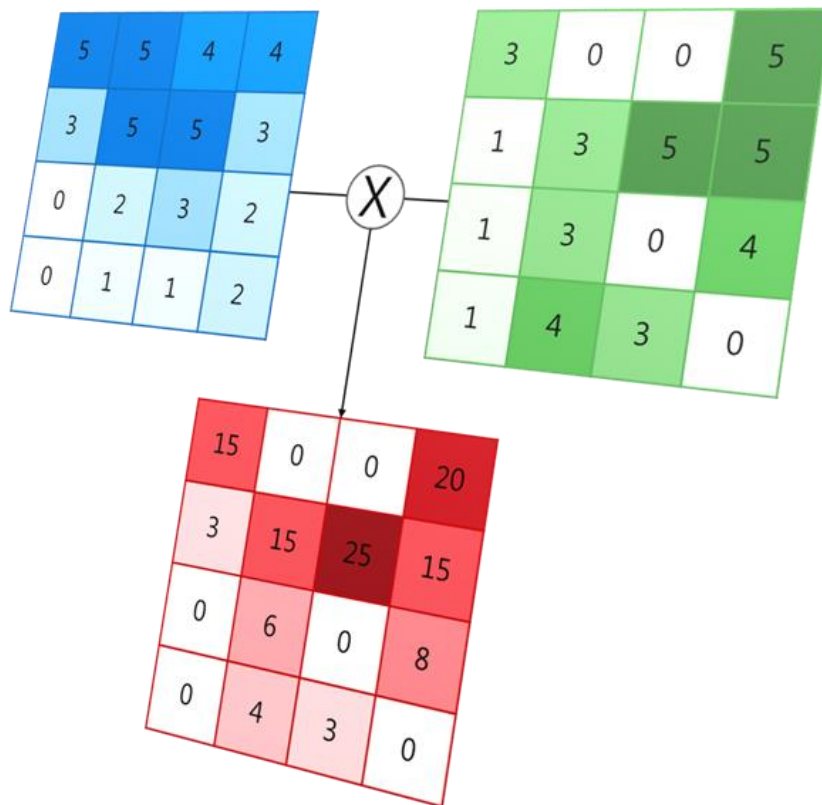


圖 4.1-90 災害風險等級與災害風險地圖產製示意圖

四、 高風險區位特性圖產製

過去依據可蒐集的資料，單純指標相互疊加，適用性尚須修正，且部分風險圖指標過多之問題。針對關鍵領域議題重新確認各項指標，並進行風險圖繪製，將危害度、脆弱度，面向指標以等權重相乘後，進行風險分級。將各指標之原始數值，以等分位法 1 分級分成 1-5 級，等級越高，脆弱度與危害度越高。分析單元依據各風險圖影響區數量進行等級劃分。並以最大變動範圍劃分等級：危害度指標以三個時期數值的最大至最小範圍之樣本數，進行分析等級劃分，以利顯現變遷的差異。風險圖展示方式，以基期（1995-2014 年）、上升 1.5°C（2021-2040 年）、上升 2.0°C（2041-2060 年）三推估時期之風險圖呈現，並針對各個災害只展示影響區範圍。

（一） 都市熱島效應風險

依據都市熱島指標進行風險圖製作，發現都市化程度較高的鄉鎮在升溫情境下的風險最高，特別是在全球暖化水平（GWLs）達到 1.5°C 和 2.0°C 的情況下。具體而言，安南、永康、北區、中西區、安平、南區和東區等行政區的危害度相對最高，成果如圖 4.1-91 及圖 4.1-92 所示。

在危害-脆弱度圖中，這些都會區內部的脆弱性也顯示出較高的風險。原本較為發達的都會區，面臨更大的熱浪效應威脅，因此需要針對這些地區制定相應的土地重劃規劃或展業區域開發策略，以便更有效地調適和減輕熱浪效應帶來的影響。

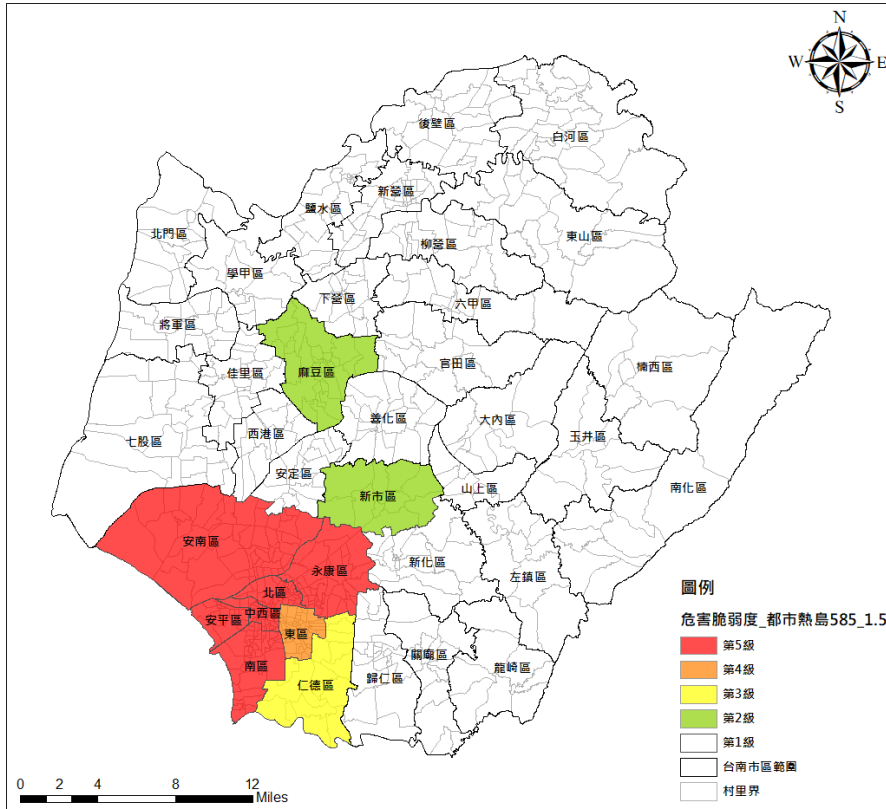


圖4.1-91 1.5°C增溫下臺南都市熱島危害-脆弱度變化圖

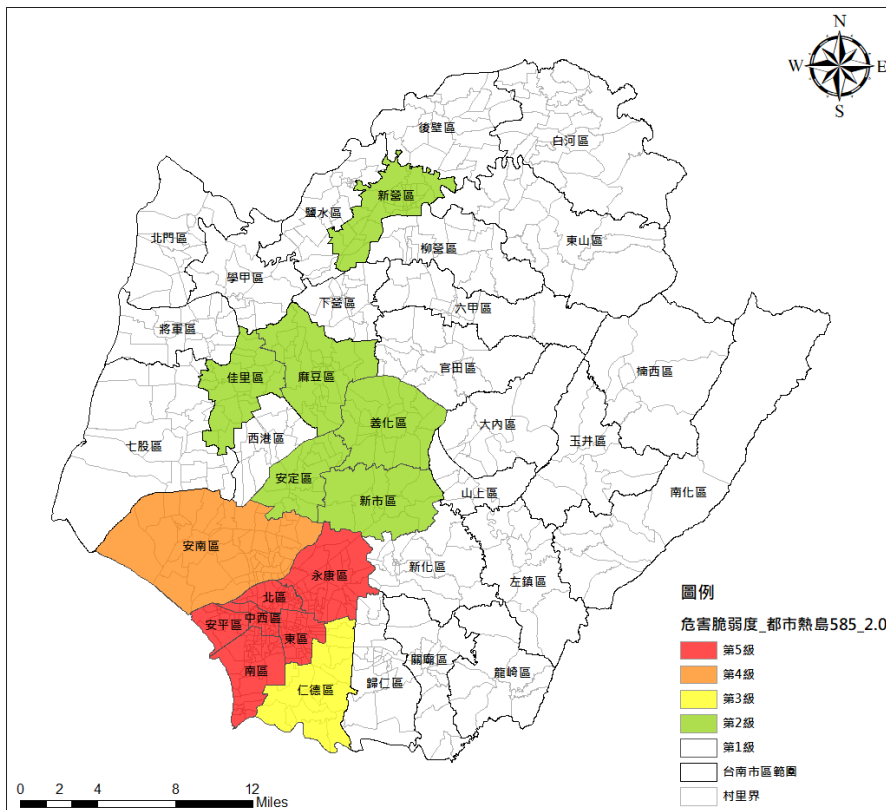


圖4.1-92 2°C增溫下臺南都市熱島危害-脆弱度變化圖

(二) 人口密度風險

依據人口密度指標進行風險圖製作，發現都市化程度較高的鄉鎮在全球暖化水平（GWLs）達到 1.5°C 和 2.0°C 的情境下，危害度最高。具體來說，東區、中西區、北區等行政區的風險特別突出，成果如圖 4.1-93 及圖 4.1-94 所示。

在這些區域，由於人口密度高，高溫熱浪對居民的影響更為嚴重。為了有效管理這些風險，後續可以在經濟發展方面進行整體規劃策略，特別是在產業布局和人口分佈上進行優化。

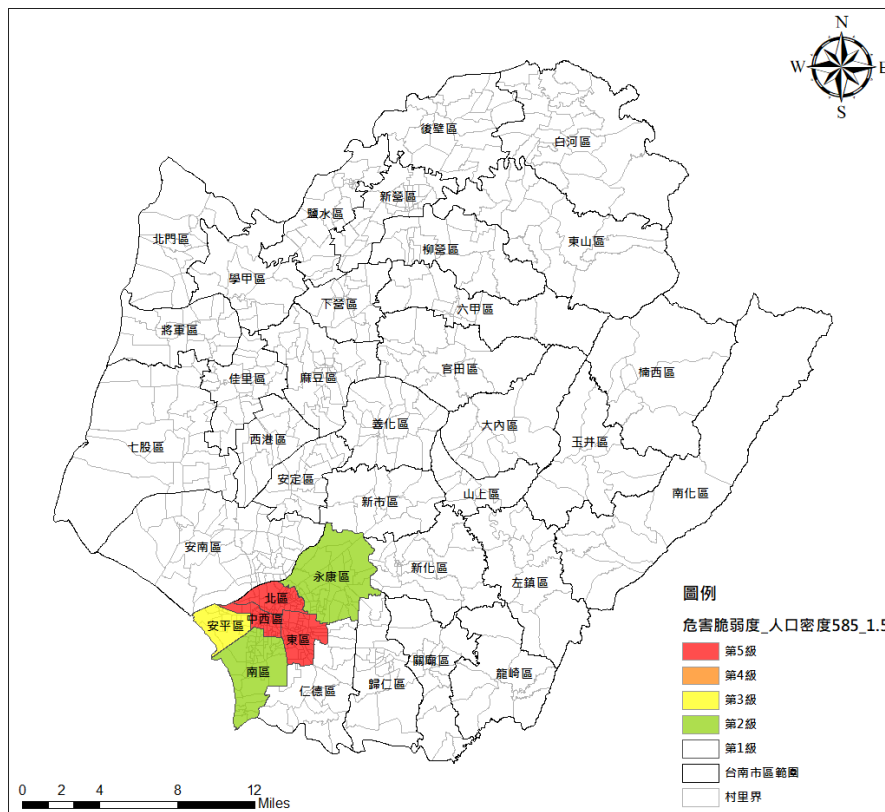


圖4.1-93 1.5°C增溫下臺南人口密度危害-脆弱度變化圖

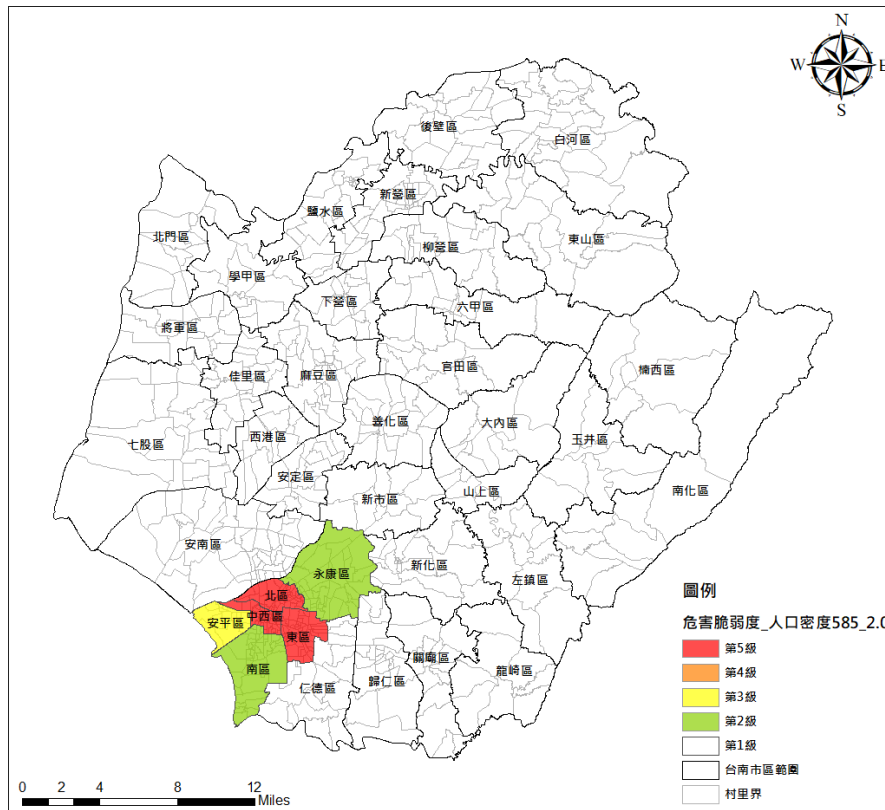


圖4.1-94 2°C增溫下臺南人口密度危害-脆弱度變化圖

4.1.4 乾旱

一、 災害風險評估方法

水資源系統是一個複雜的多目標、多層次結構，包括了給水、儲水、輸水、用水和排水等多個子系統。水資源是否短缺以及短缺量主要取決於供水和需求兩個因素。乾旱缺水風險是指在特定時空條件下，由於供水和需求的不確定性，水資源系統在某一特定機率下可能發生的供水短缺事件。

本計畫將使用地理資訊系統(Geographic information system, GIS)作為計算、分析及展示的工具，計算所需的資料將使用向量式或網格式的資料結構予以儲存，透過轉換至網格式來進行計算，計算結果再依需求予以歸納合併或轉換成向量格式來呈現在進行分區探討。水資源領域之風險可藉由危害度、暴露度、脆弱度等層面來進行探討與評估，其風

險定義如下：

(一) 危害度

水資源領域之危害度本計畫根據蒸發散、降雨和乾旱來進行評估。蒸發散量的變化會影響水資源的可用量，高蒸發散率會增加水的損失，特別是在乾燥和炎熱的環境中。而降雨量的變化是供水的重要來源，降雨量不足會導致水資源短缺，影響水資源的質量和分配。而在乾旱期間，降雨量顯著減少，水資源供應不足將會影響農業、工業和民生用水等。

長期供水來源不足將會導致地下水位下降，水庫水位降低等等影響，因此將綜合各個因素作用，決定水資源系統在不同情境下的危害度。

(二) 暴露度

根據 UNISDR(2009)、IPCC(2013)對於暴露度的定義：可能暴露於風險下的單位，如人口、生活圈、基礎建設、經濟、社會、環境資源及文化資產等之存在，可能受到不利影響的各個元素，可以視為地區遭受到天然災害時，地區之先天條件。

本計畫建議通過分析工業用水、民生用水和生活用水的需求和分布來量化和評估地區的暴露度，從而更好地制定應對水資源風險的策略，並進行分級量化。

表4.1-12 水資源災害風險因子量化評估表

面向	因子	衡量方式	資料來源
危害度	蒸發散因子	高溫日射	TCCIP 氣候變遷情境溫度條件
	降雨增幅因子	乾濕季降雨	TCCIP 氣候變遷情境雨量條件
	乾旱因子	SPI 計算(閾值設為-1)	TCCIP 氣候變遷情境雨量條件
暴露度	工業用水	根據工業園區產業類型用水量進行分級	政府資料公開平台(水利署)
	生活用水	根據人口密度(最小統計面積)/(人口數)用水需求進行分級	內政部統計處

面向	因子	衡量方式	資料來源
	農業用水	根據不同農作物種植面積進行分級	政府資料公開平台(水利署)
	土地利用程度	根據土地利用強度給予得分值	內政部土地利用圖資
脆弱度	給水管線	根據給水管線密度分級	台南市政府資料開放平台
	地下水水位變化	根據地下水水位年變化量分級	水文年報

二、 各風險面向量化評估

因應不同領域研析應用，在水資源分析空間下，考量局部資料尺度為村里尺度，如所得稅等，而在人口面則以最小人口統計區為主，而降雨、乾旱、蒸發散量則以行政區為分界，風險分析主軸仍以人類社會系統為分析對象，故以人口面之最小人口統計區為水資源風險分析，針對各面向指標調整說明如下：

(一) 危害度

1. 降雨量變化

分析本計畫關注之兩種增溫情境，了解水資源之供水來源變化，以下是兩種情境：

- 短期 2021-2040 年在所有排放途徑下皆會達到全球暖化 1.5°C，作為短期的氣候變遷評估。
- 中期 2041-2060 年在中度到高度排放情境下達到全球暖化 2°C，作為中期的氣候變遷評估。

(1) 全球暖化 1.5°C

本計畫使用 TCCIP AR6 的降雨量資料來進行分析和評估。結果顯示，在 1.5 度全球變暖情境下，總降雨量比之前有所增加，也同時反映乾濕兩季。

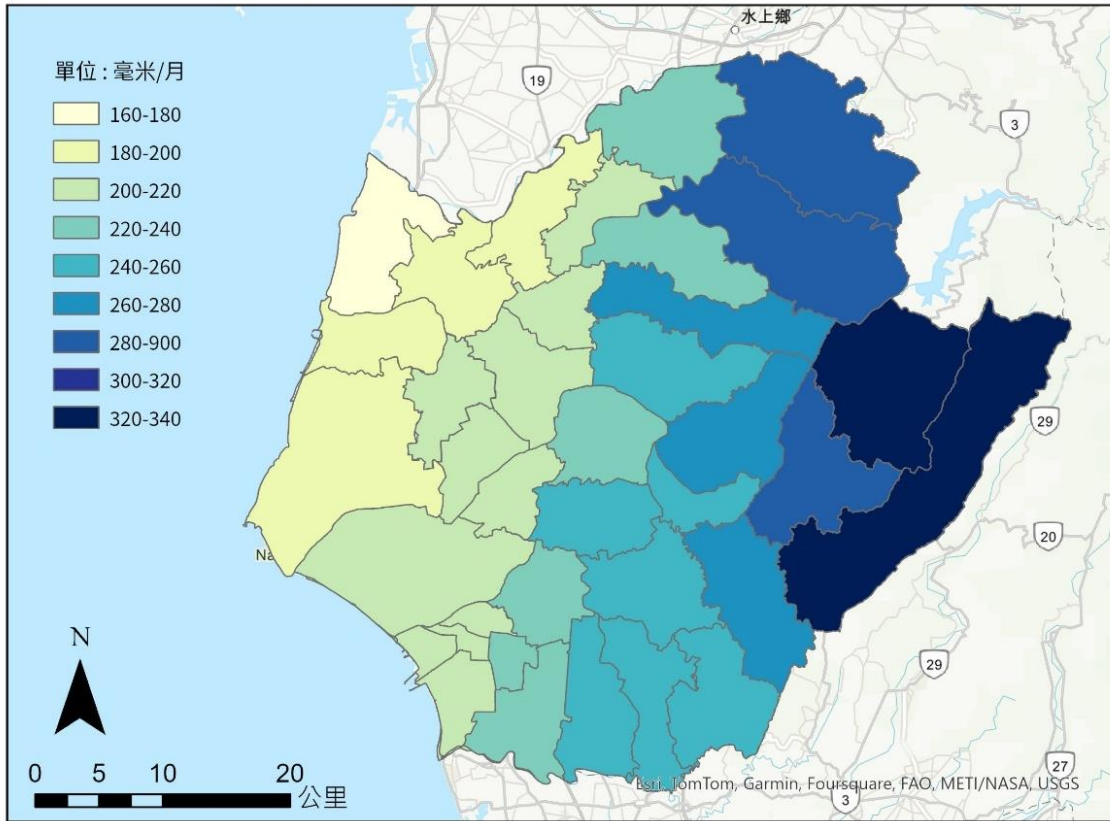


圖4.1-95 臺南市濕季降雨量(基期條件)

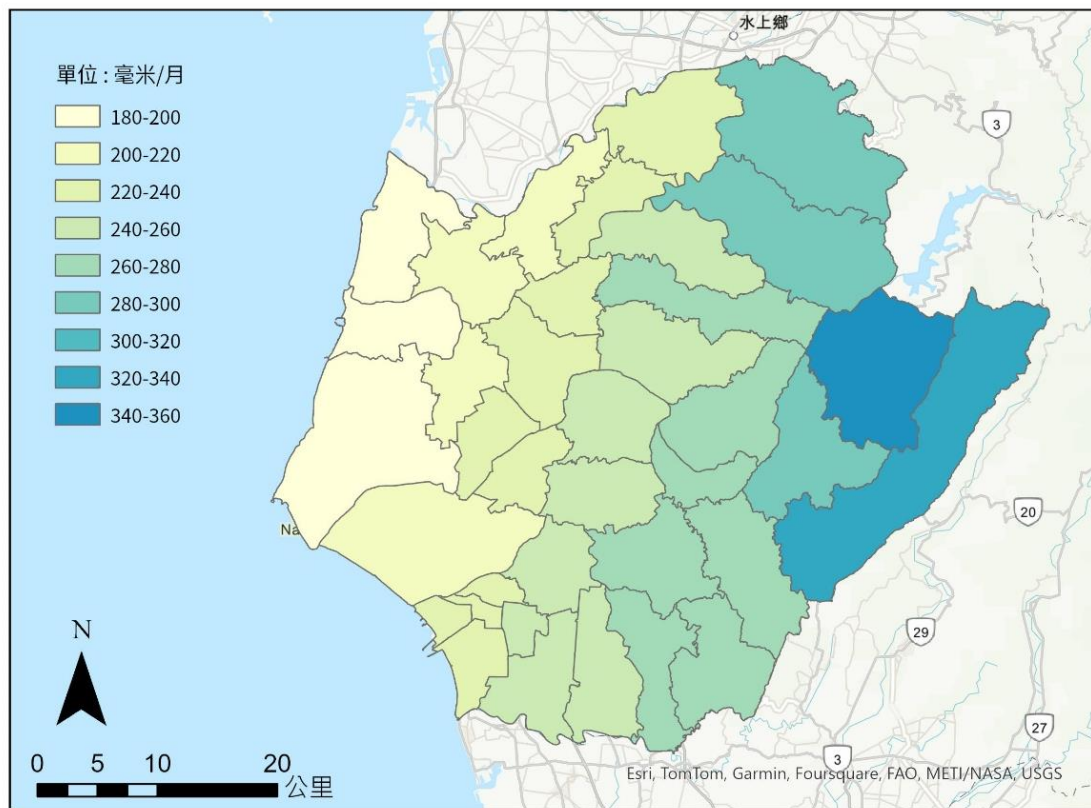


圖4.1-96 臺南市濕季降雨量(增溫 1.5 度條件)

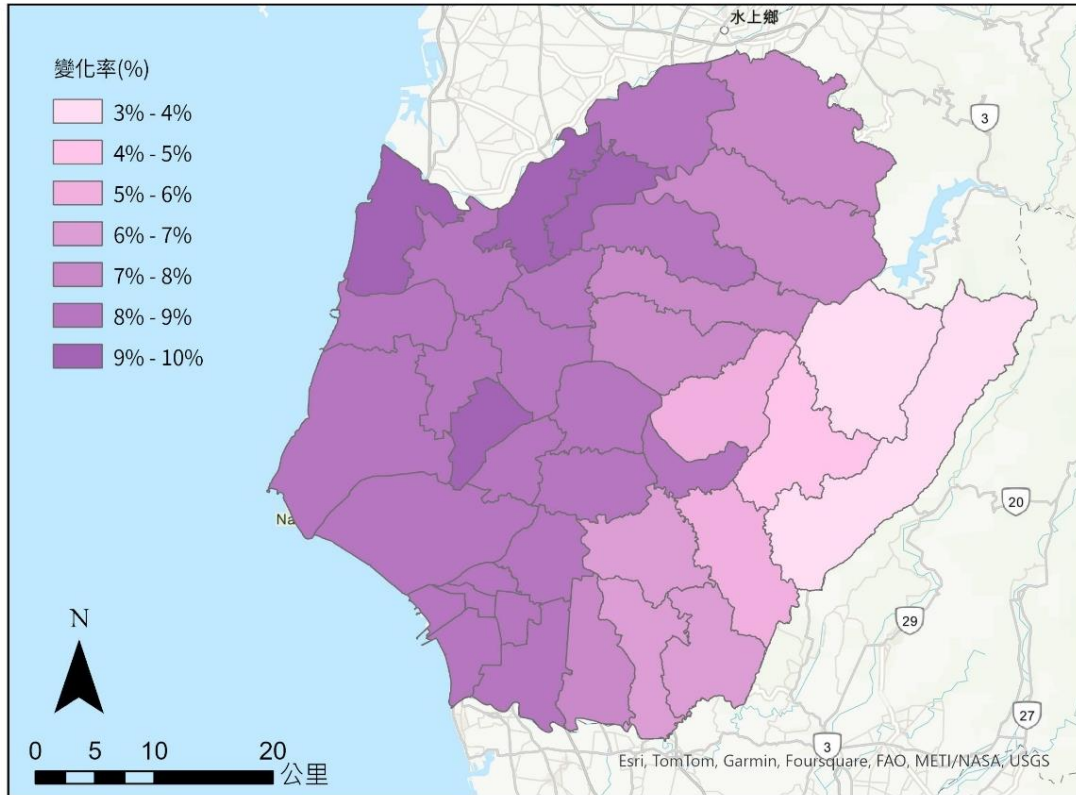


圖4.1-97 臺南市濕季降雨變化率(增溫 1.5 度條件)

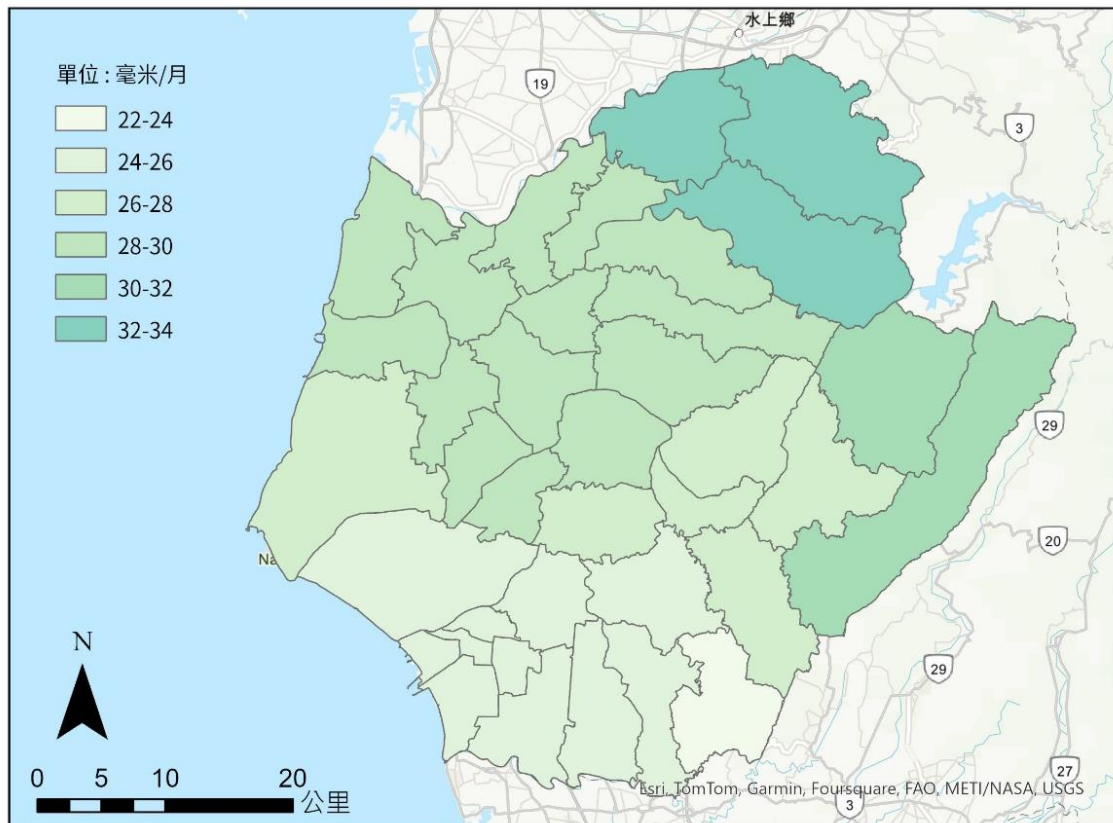


圖4.1-98 臺南市乾季降雨量(基期條件)

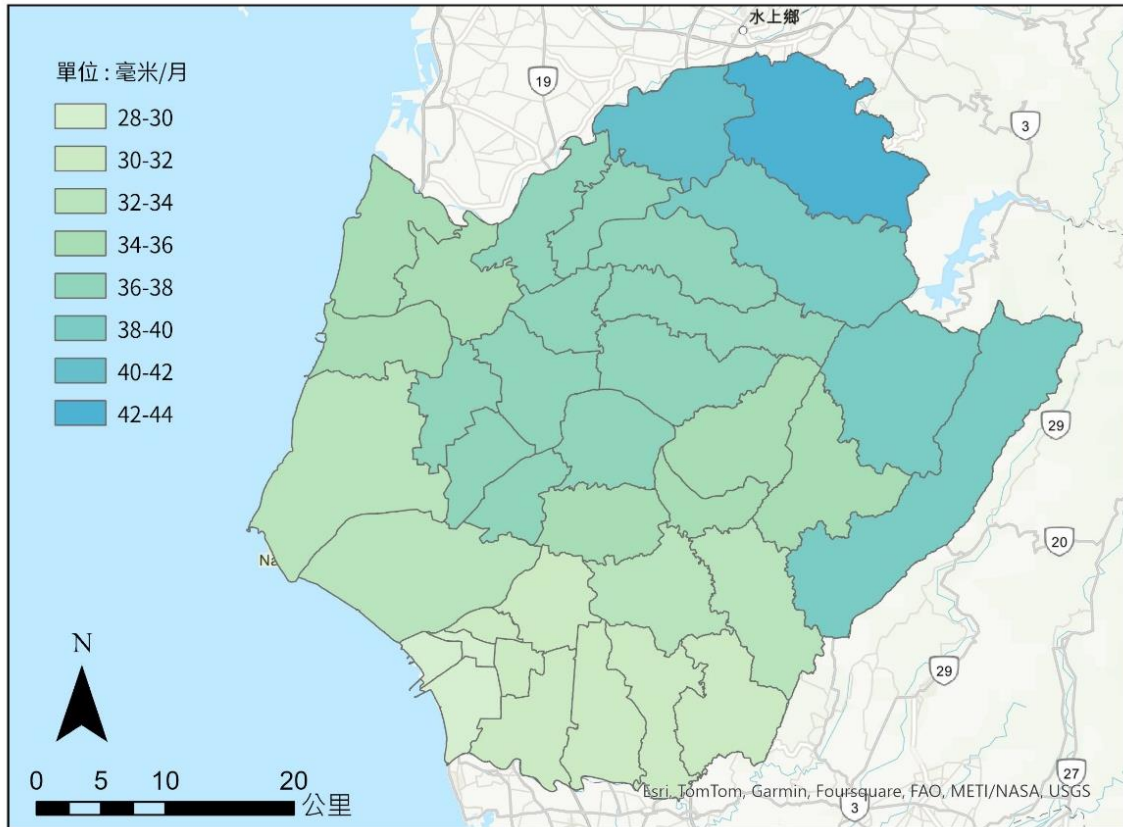


圖4.1-99 臺南市乾季降雨量(增溫 1.5 度條件)

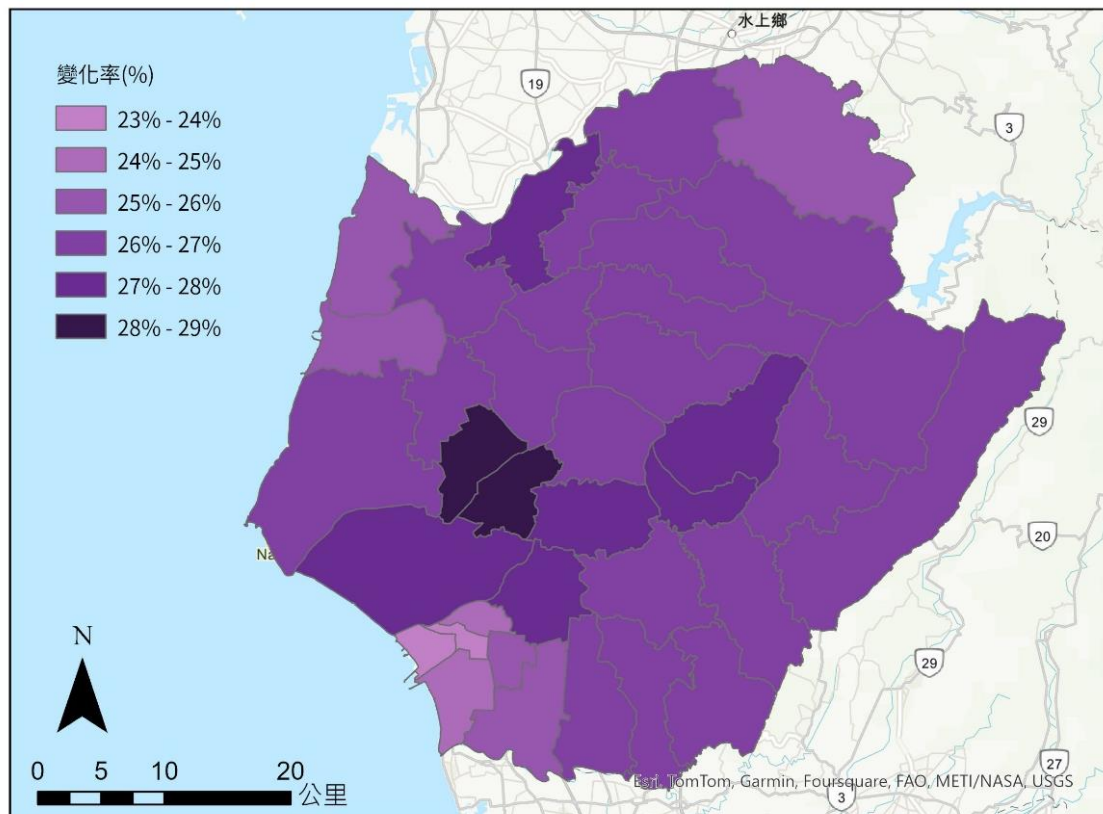


圖4.1-100 臺南市乾季降雨變化率(增溫 1.5 度條件)

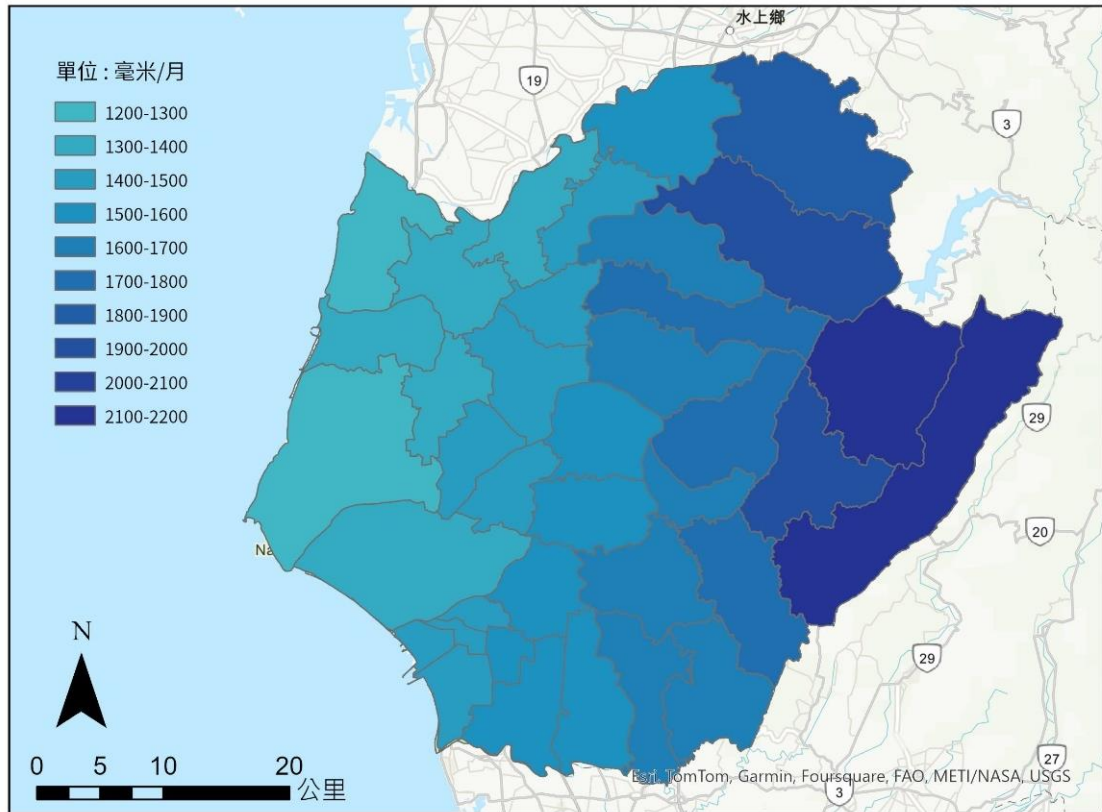


圖4.1-101 臺南市年總降雨量(基期條件)

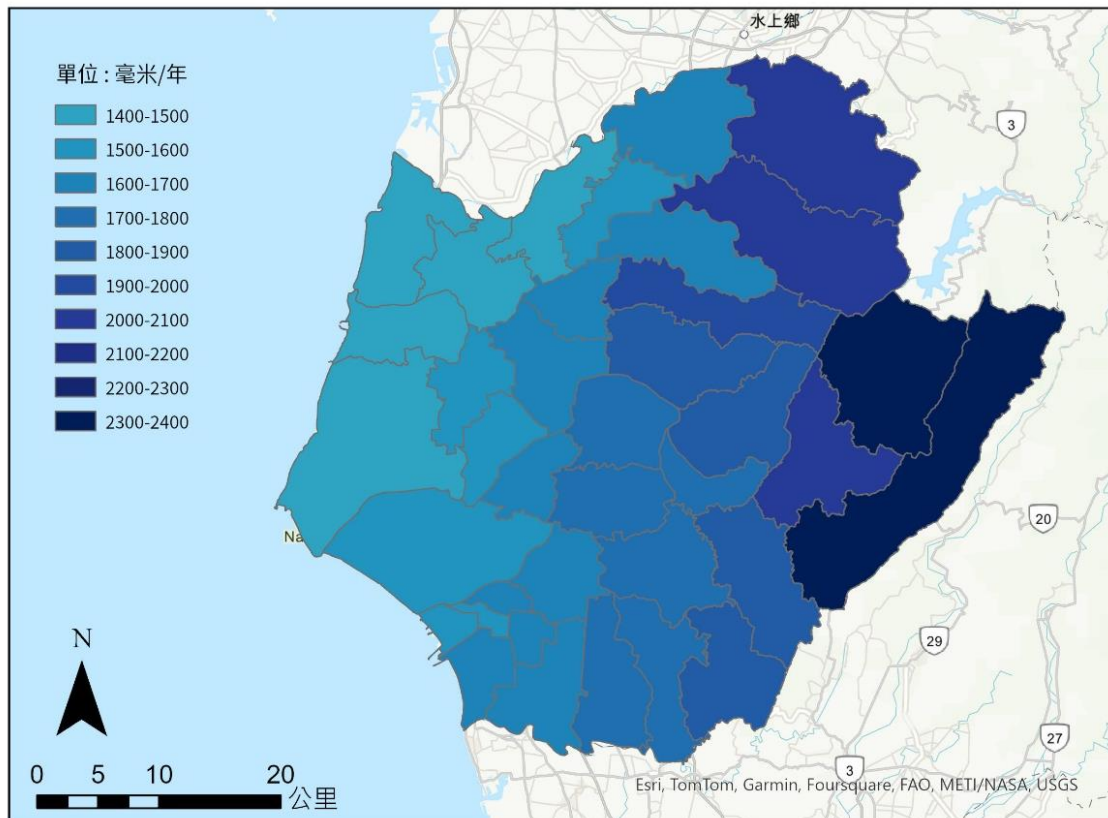


圖4.1-102 臺南市年總降雨量(增溫 1.5 度條件)

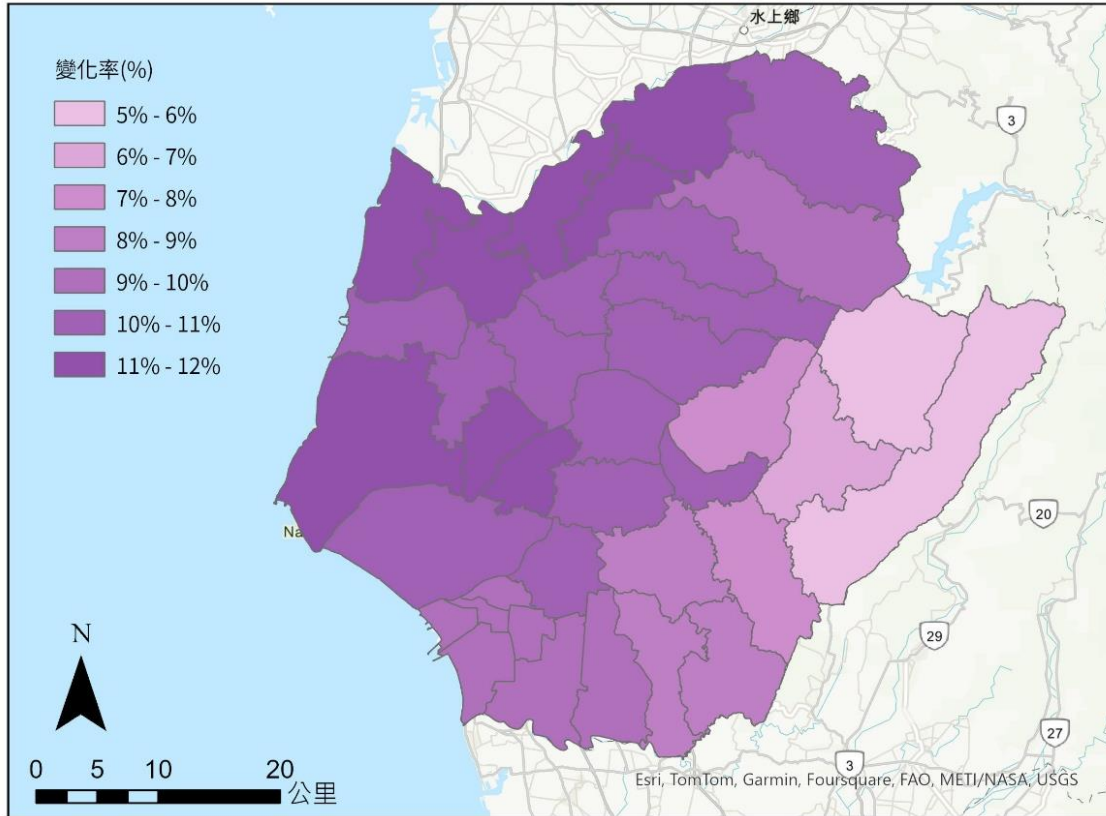


圖4.1-103 臺南市年總降雨變化率(增溫 1.5 度條件)

(2) 全球暖化 2°C

結果顯示，在 2 度變暖情境下，乾季變得更加乾燥，濕季變得更加濕潤，變化率相較於 1.5 度情境下更為明顯。這種加劇的乾濕季節差異進一步強調了水資源管理的挑戰，因此後續本計畫之風險地圖將以 2.0 度增溫情境作為降雨量變化之危害指標進行分析並疊加圖層。

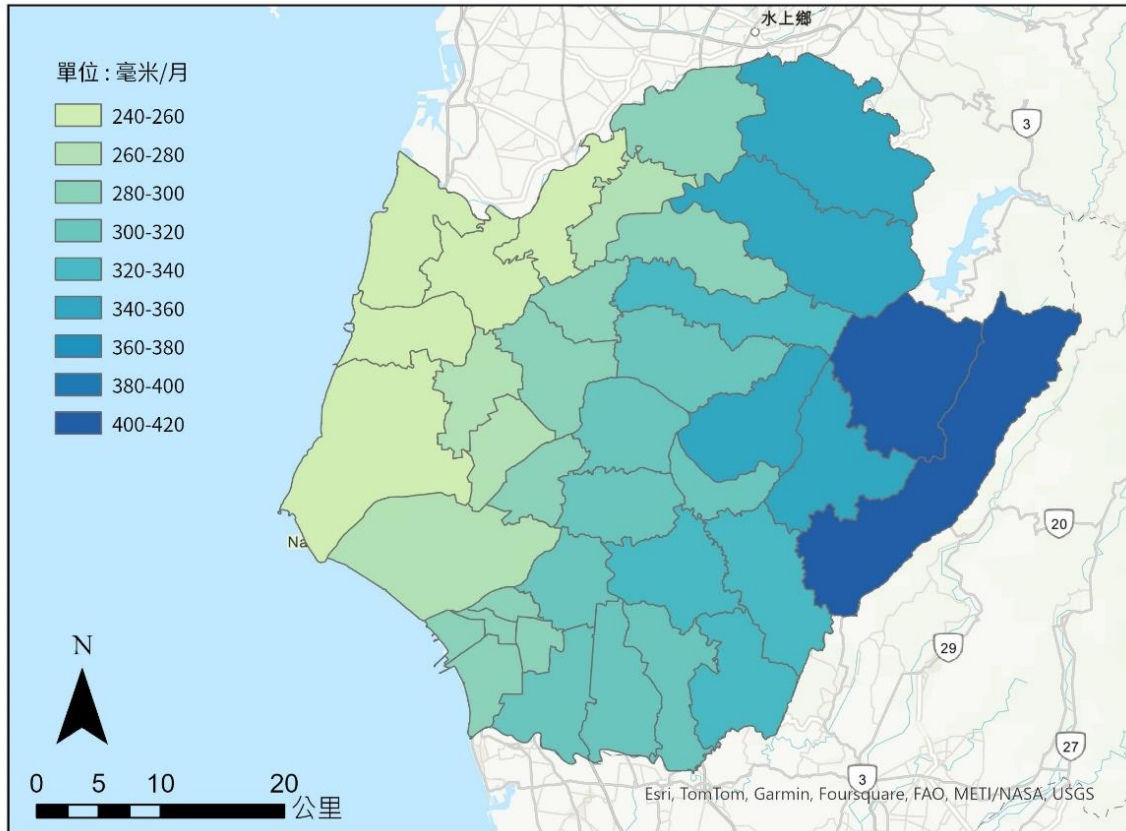


圖4.1-104 臺南市濕季降雨量(增溫 2.0 度條件)

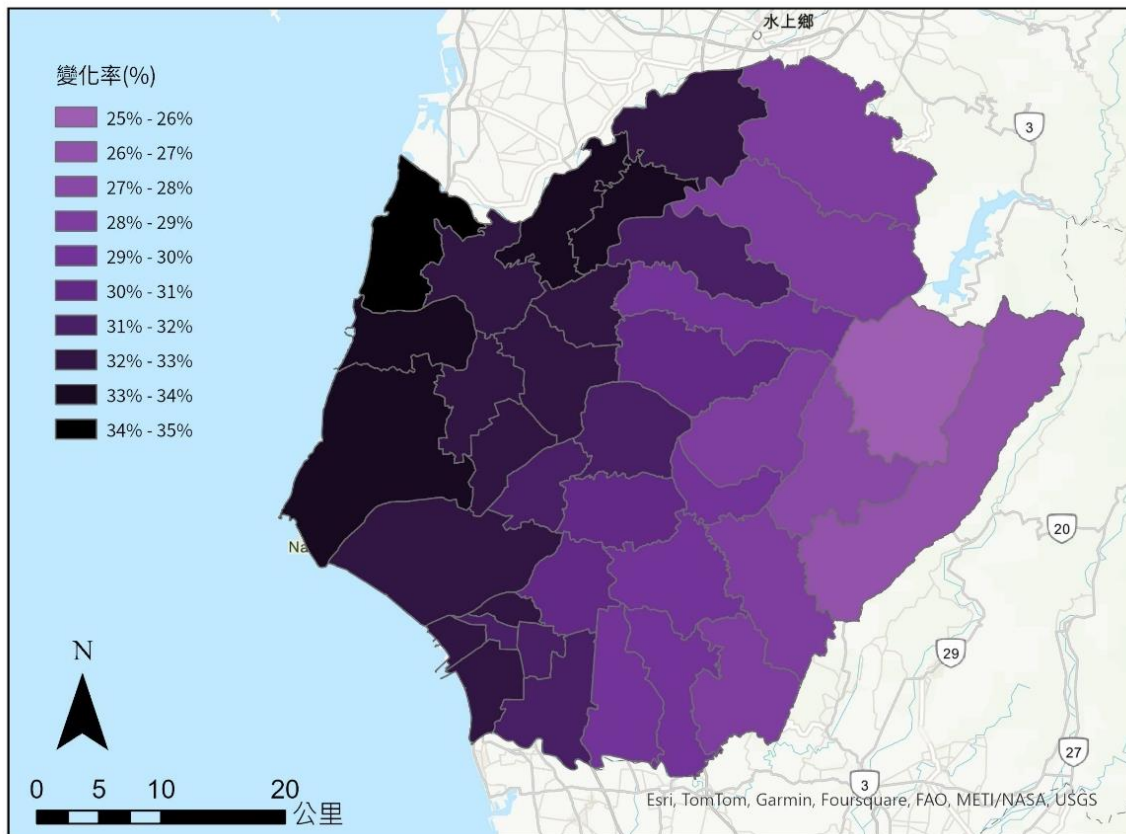


圖4.1-105 臺南市濕季降雨變化率(增溫 2.0 度條件)

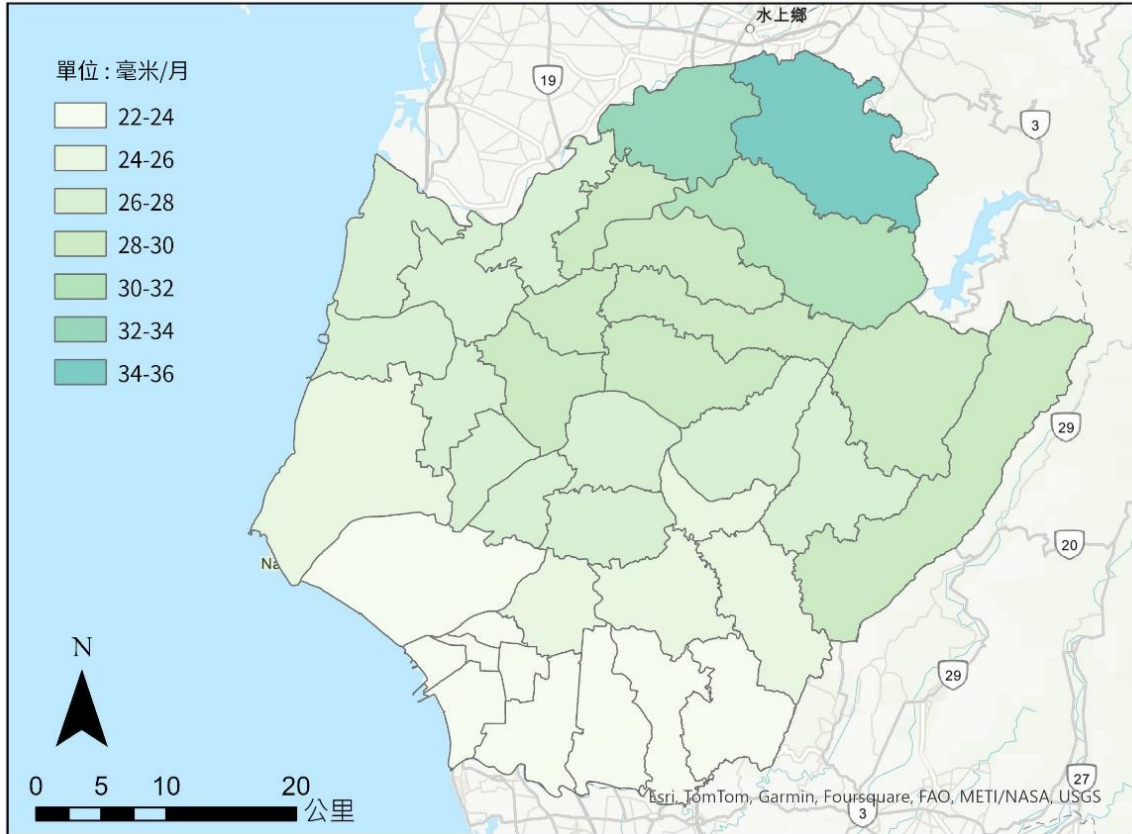


圖4.1-106 臺南市乾季降雨量(增溫 2.0 度條件)

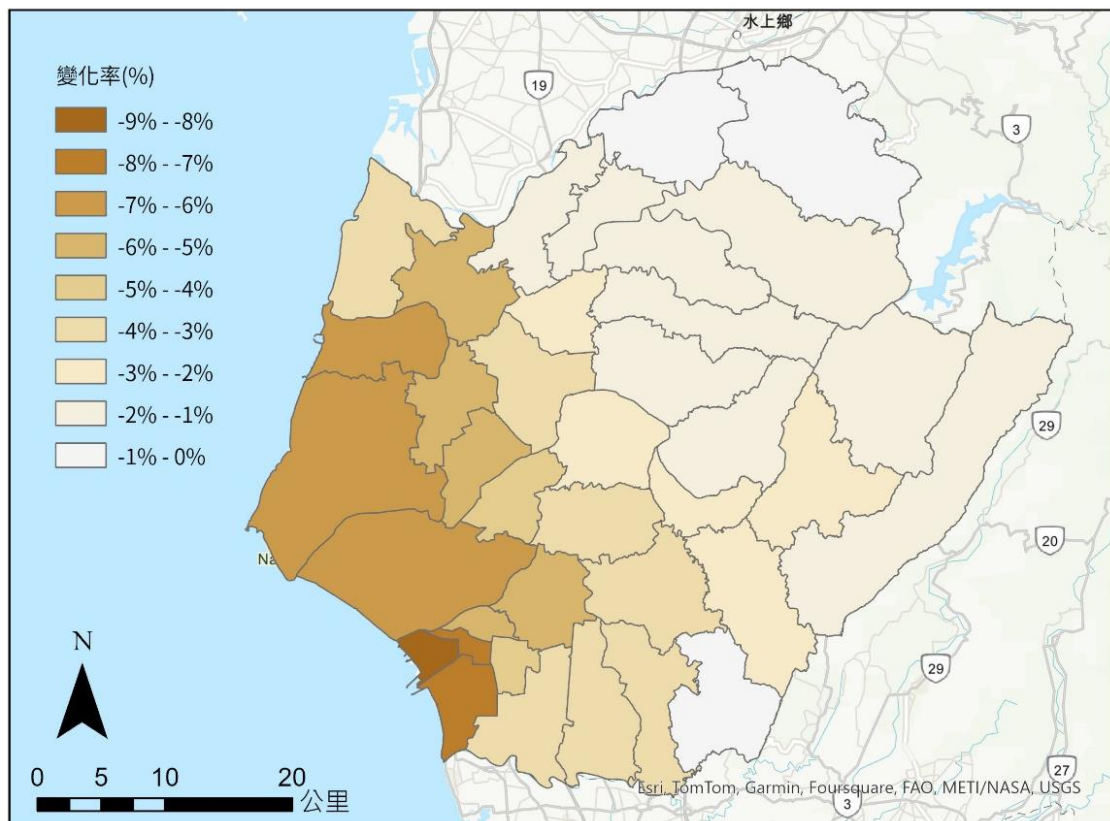


圖4.1-107 臺南市乾季降雨變化率(增溫 2.0 度條件)

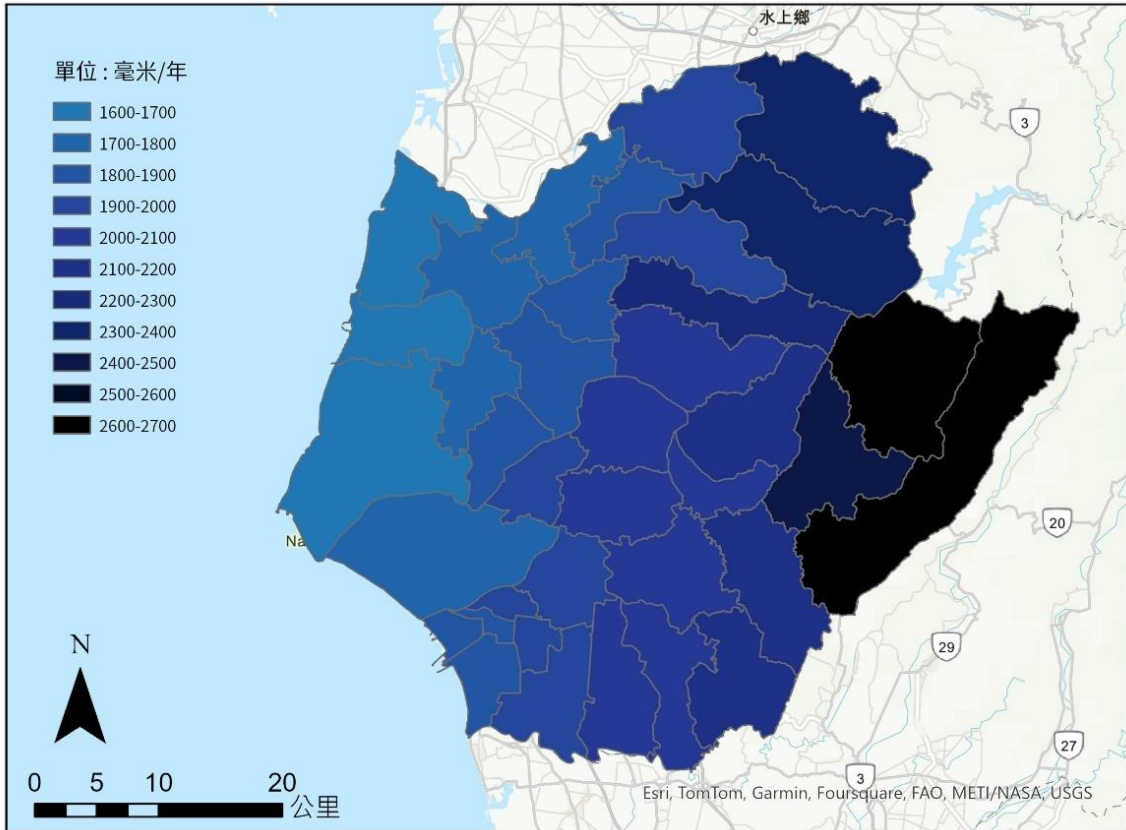


圖4.1-108 臺南市年總降雨量(增溫 2.0 度條件)

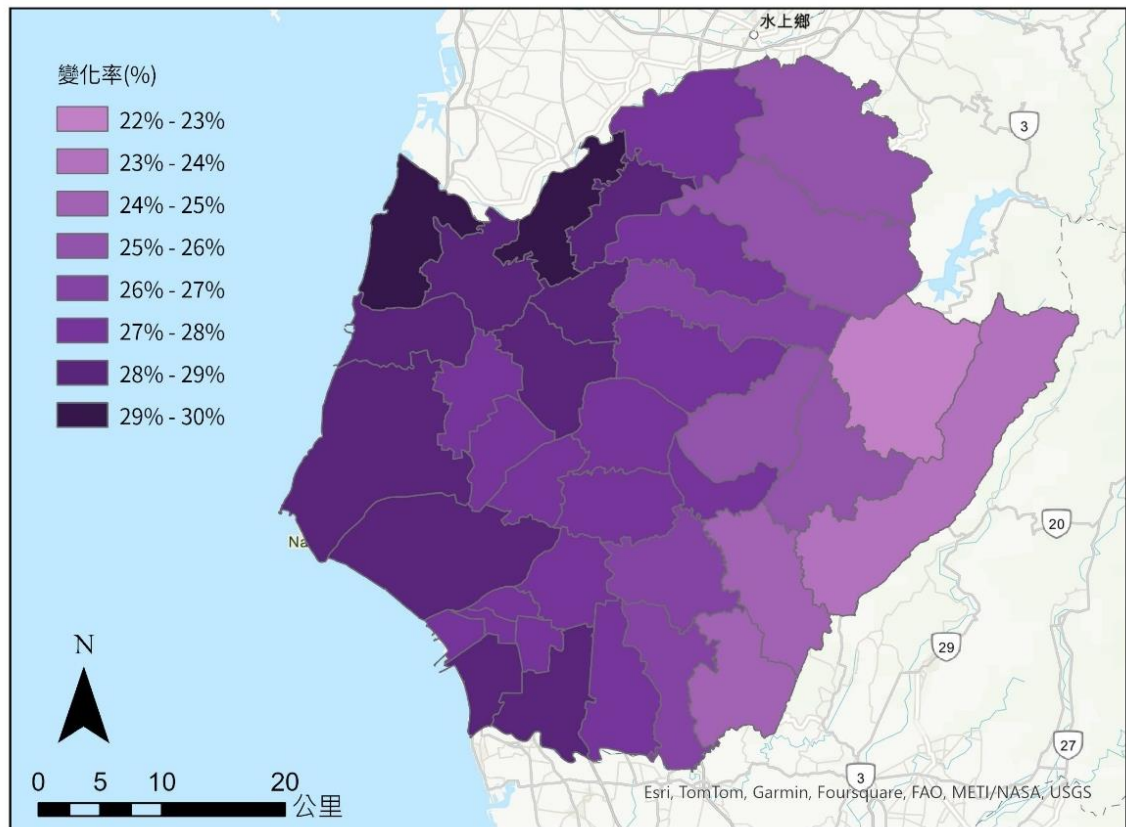
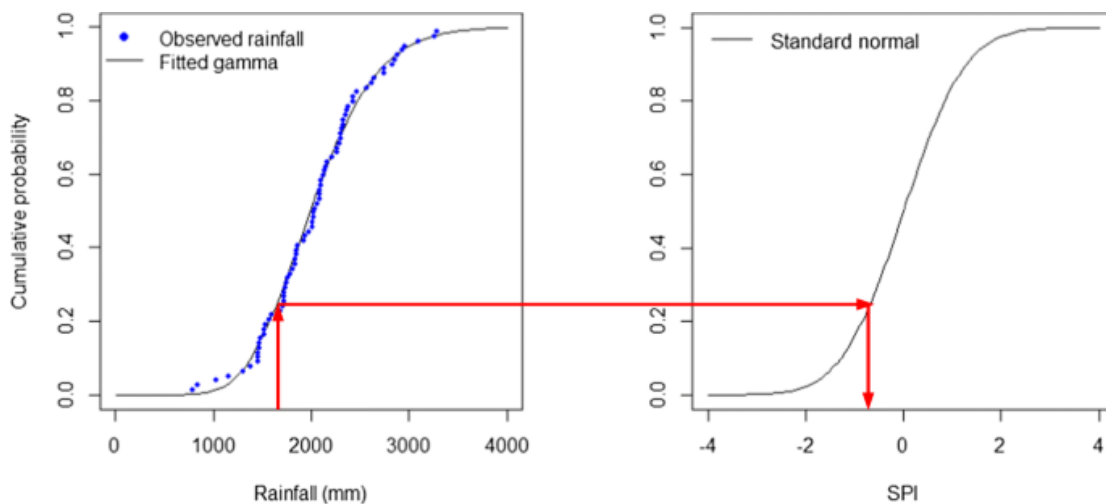


圖4.1-109 臺南市總降雨變化率(增溫 2.0 度條件)

2.SPI 乾旱指標

本計畫將使用標準化降水指數 (SPI, Standardized Precipitation Index) 定義危害度中的乾旱指標。標準化降水指數(SPI)是一種用於量化降水異常的指標，常用於乾旱監測和水資源管理，是基於降水量數據的長期氣候模式進行計算的，能夠提供乾旱事件的定量評估。以下是 SPI 之計算，涵蓋參數 GAMMA 擬合（最大概似估計，MLE）和乾旱特性定義(圖 4.1-110)：



資料來源：Shiau, J. T. (2020). Effects of gamma-distribution variations on SPI-based stationary and nonstationary drought analyses.

圖4.1-110 SPI 計算方法示意圖

(1)SPI 的計算定義：

- 計算降水量的長期平均值和標準差。
- 用當前降水量減去長期平均值，再除以標準差，得到 SPI 值。

數值範圍：SPI 值的範圍通常為 -2 到 +2。SPI 值為負數表示降水量低於平均水平，數值越低乾旱程度越嚴重；SPI 值為正數表示降水量高於平均水平。

(2)使用 GAMMA 分布進行擬合：

GAMMA 分布的參數可以通過最大概似估計 (MLE) 進行擬合，以適應觀察到的降水量數據。

表4.1-13 SPI 濕潤與乾旱分類

SPI	分類	佔比(%)
≥ 2.0	極端濕潤	2.3
1.50 to 1.99	嚴重濕潤	4.4
1.00 to 1.49	中等濕潤	9.2
0.99 to -0.99	一般	68.2
-1.00 to -1.49	中等乾旱	9.2
-1.50 to -1.99	嚴重乾旱	4.4
≤ -2.0	極端乾旱	2.3

(3) 乾旱事件的定義：

乾旱判斷：當 SPI 連續負值達到閾值 -1.0 時，被視為乾旱事件。這表示降水量顯著低於長期平均水平。

(4) 乾旱特性：

● 頻率 (Frequency)：

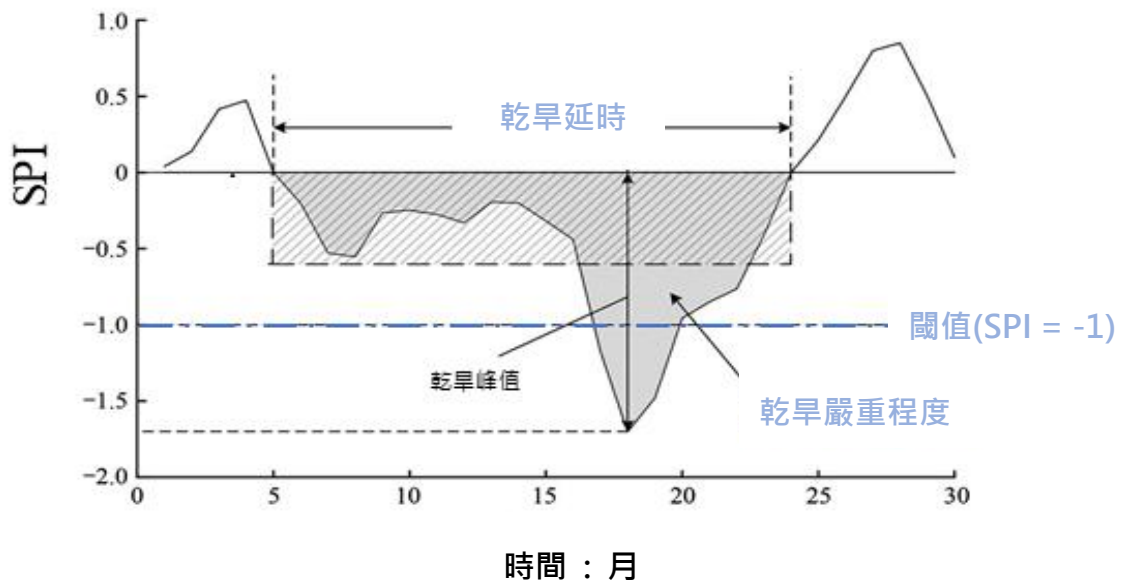
指每年乾旱事件發生的次數。高頻率表示乾旱事件在該地區較為常見，可能需要更多的防範措施。

● 延時 (Duration)：

指乾旱事件持續的時間，即 SPI 小於 0 的連續月數。延時越長，乾旱的影響越持久。

● 嚴重程度 (Severity)：

指乾旱事件的累積 SPI 的絕對值，用於衡量乾旱事件的整體強度。數值越大，乾旱的嚴重程度越高。



資料來源：Liu H, Jiang L L, Liu B, Liu R, Xiao Z L.(2023) Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years.

圖4.1-111 乾旱事件特性示意圖

在研究中，雖然乾旱發生頻率並沒有顯示出強烈的增加，但從延時和嚴重程度的變化來看，台南市的乾旱問題呈現出漸長的趨勢。延時，即乾旱持續的時間，顯著增加，顯示乾旱影響變得更持久。嚴重程度的上升則表明，每次乾旱事件的強度也在增強。

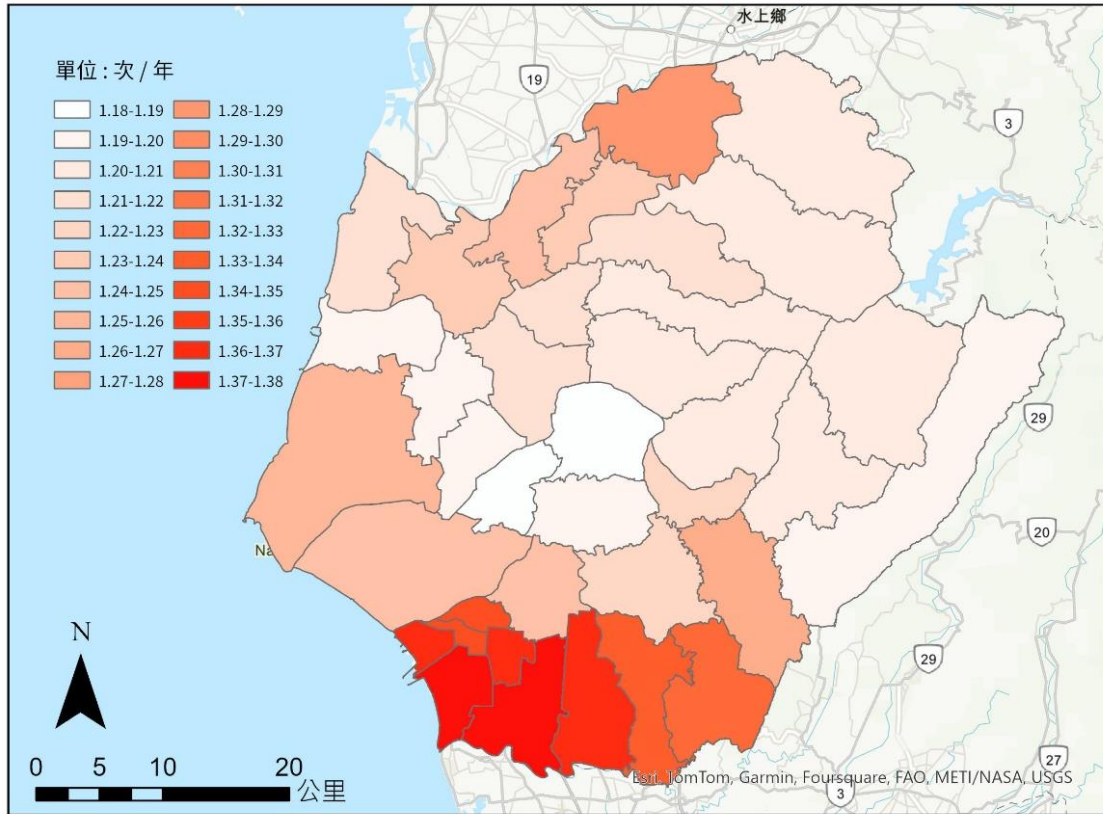


圖4.1-112 臺南市乾旱頻率(增溫 1.5 度條件)

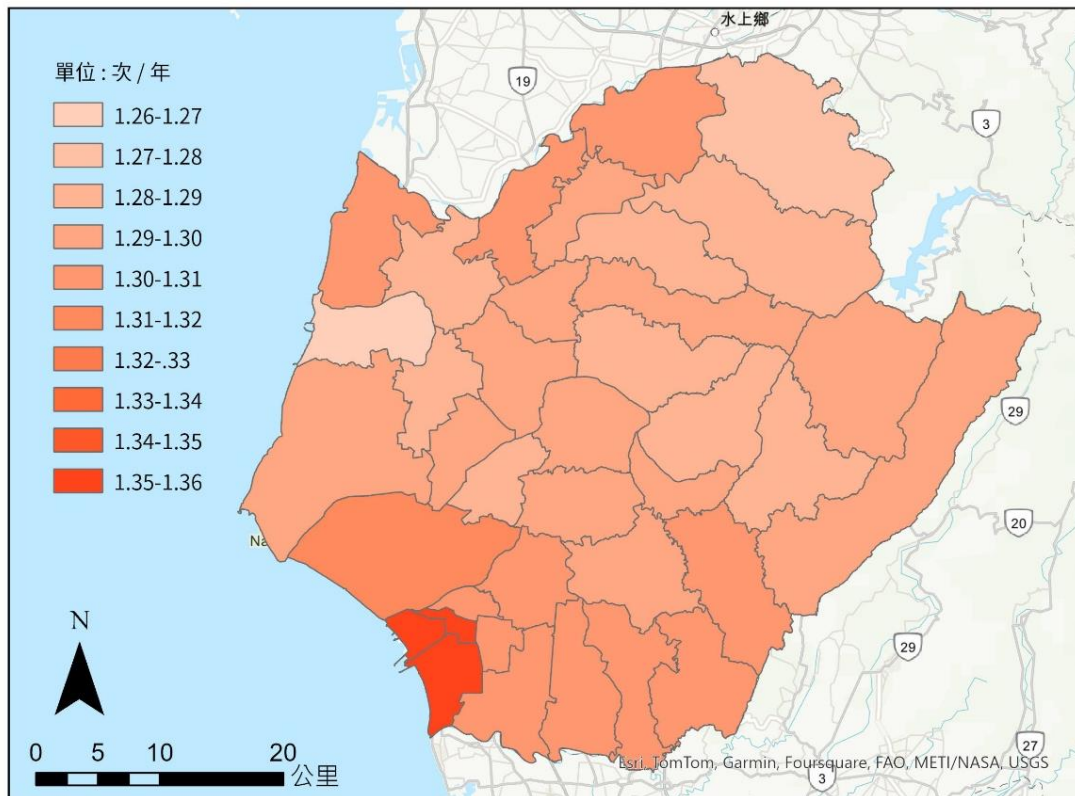


圖4.1-113 臺南市乾旱頻率(增溫 2.0 度條件)

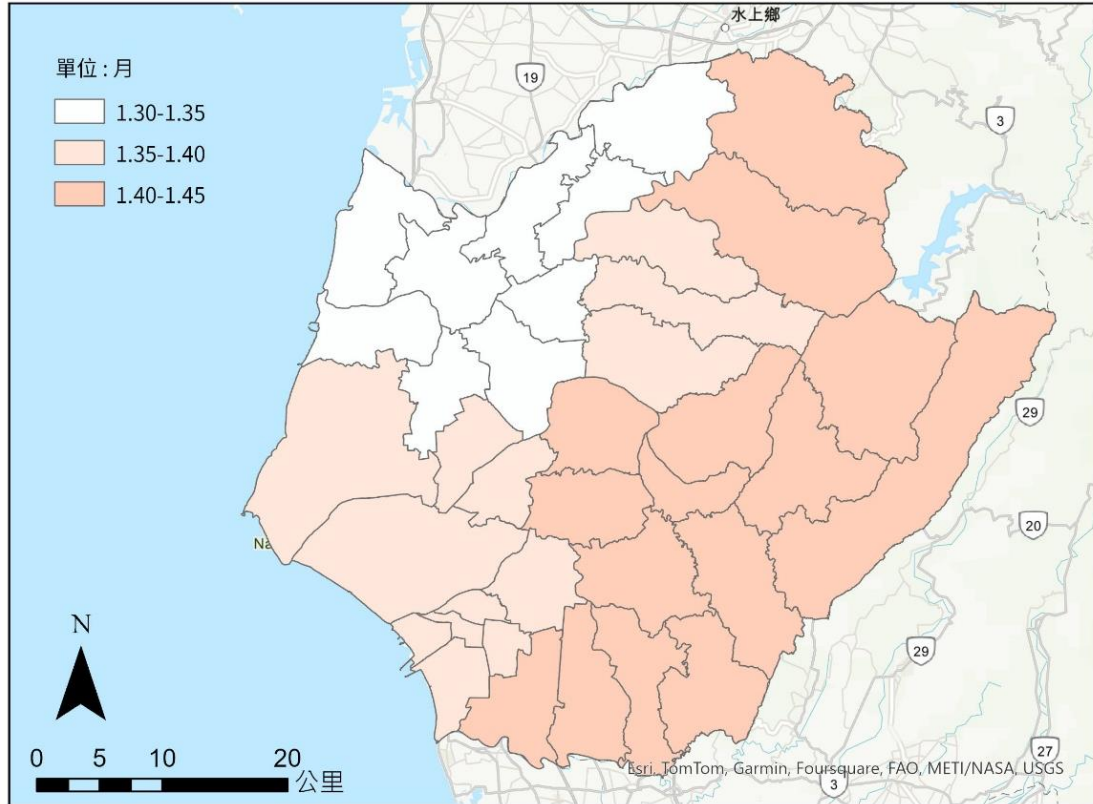


圖4.1-114 臺南市乾旱延時(增溫 1.5 度條件)

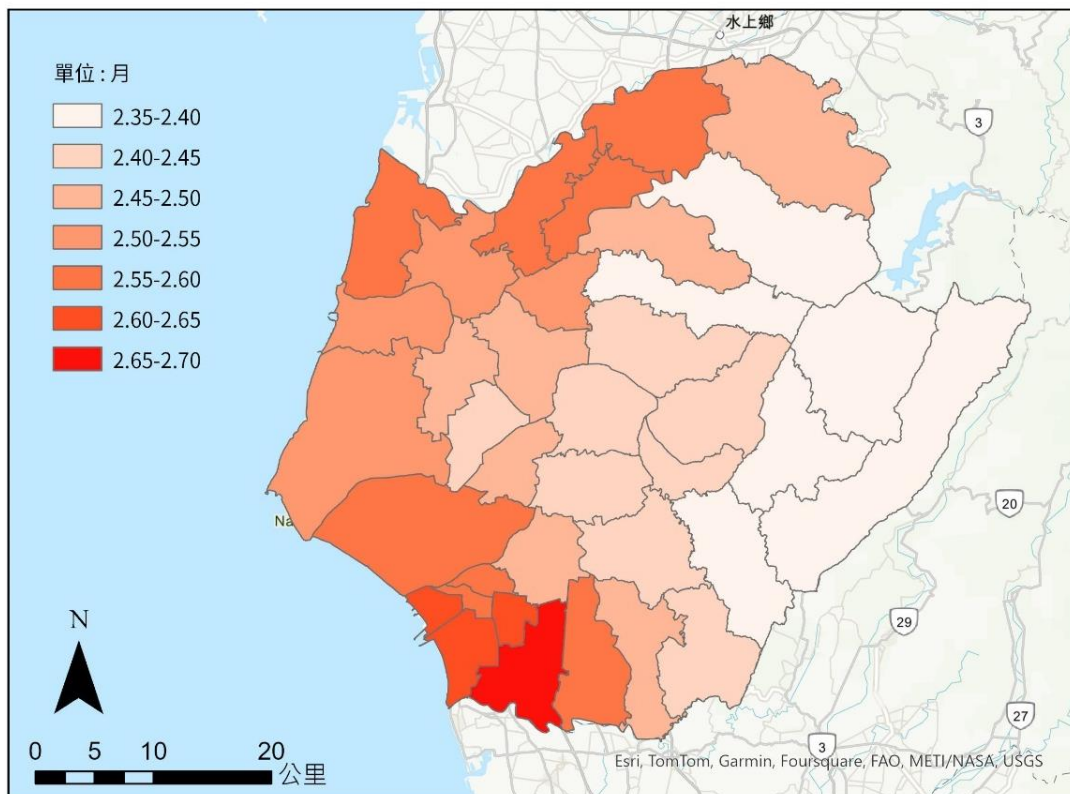


圖4.1-115 臺南市乾旱延時(增溫 2.0 度條件)

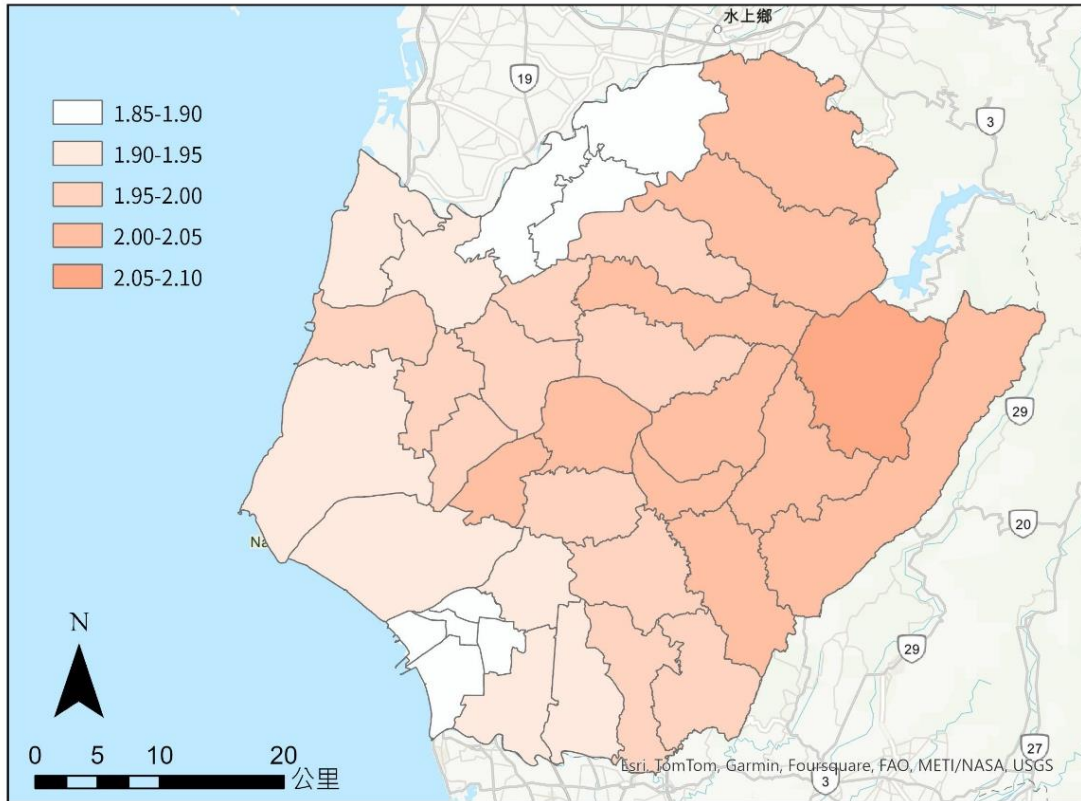


圖4.1-116 臺南市乾旱嚴重程度(增溫 1.5 度條件)

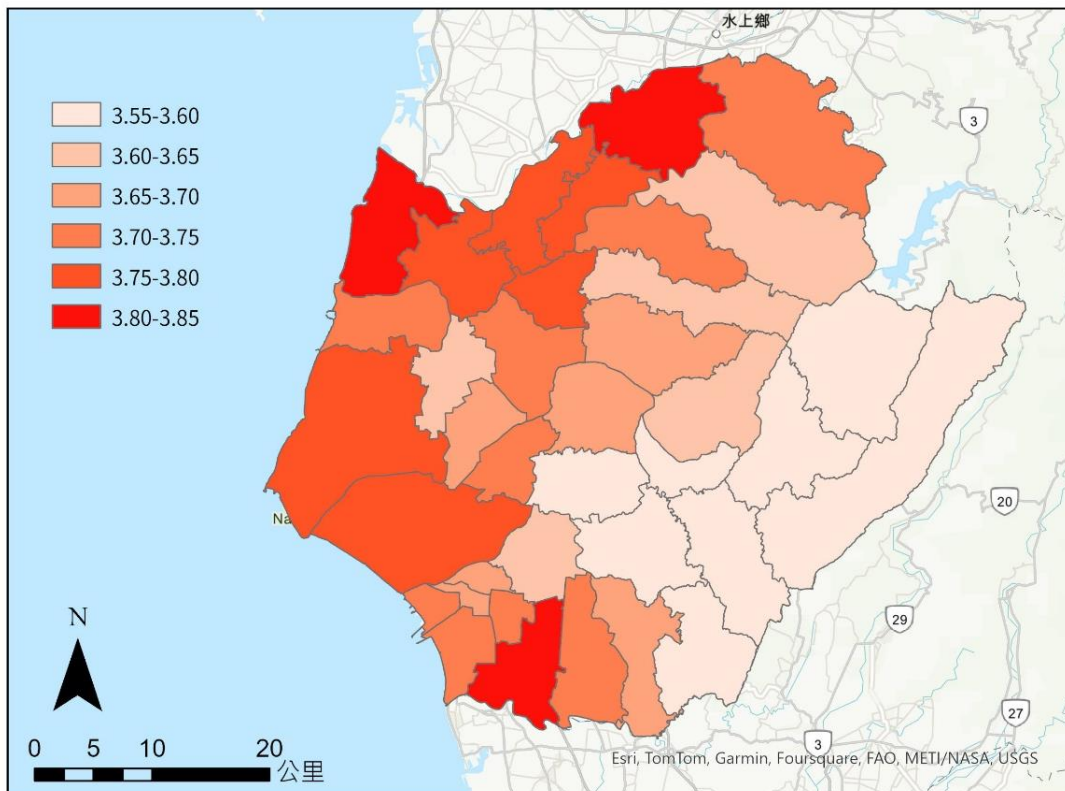


圖4.1-117 臺南市乾旱嚴重程度(增溫 2.0 度條件)

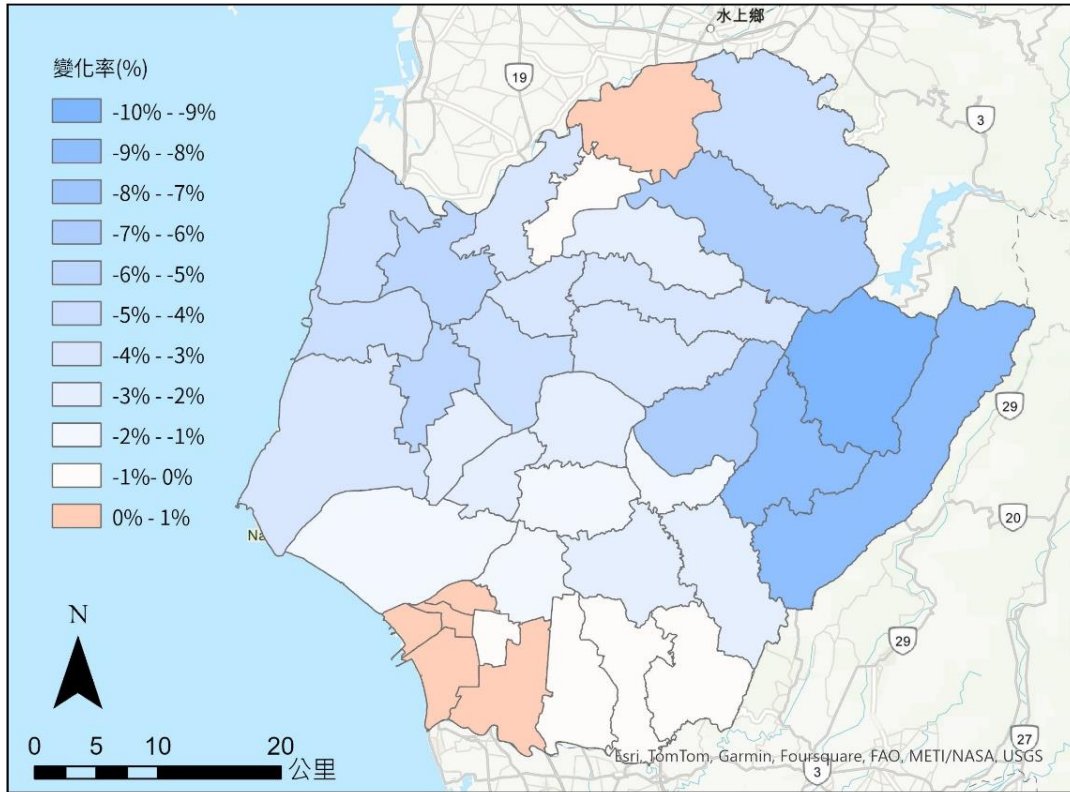


圖4.1-118 臺南市乾旱之於基期頻率變化率(增溫 1.5 度條件)

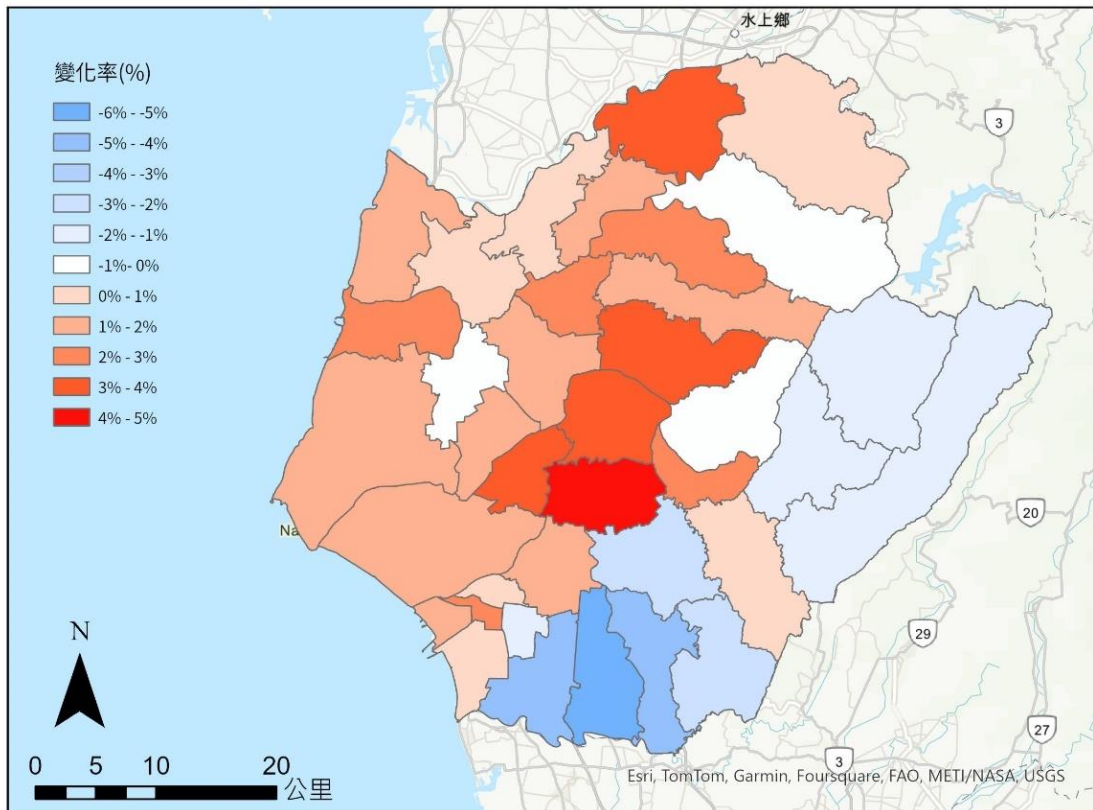


圖4.1-119 臺南市乾旱之於基期頻率變化率(增溫 2.0 度條件)

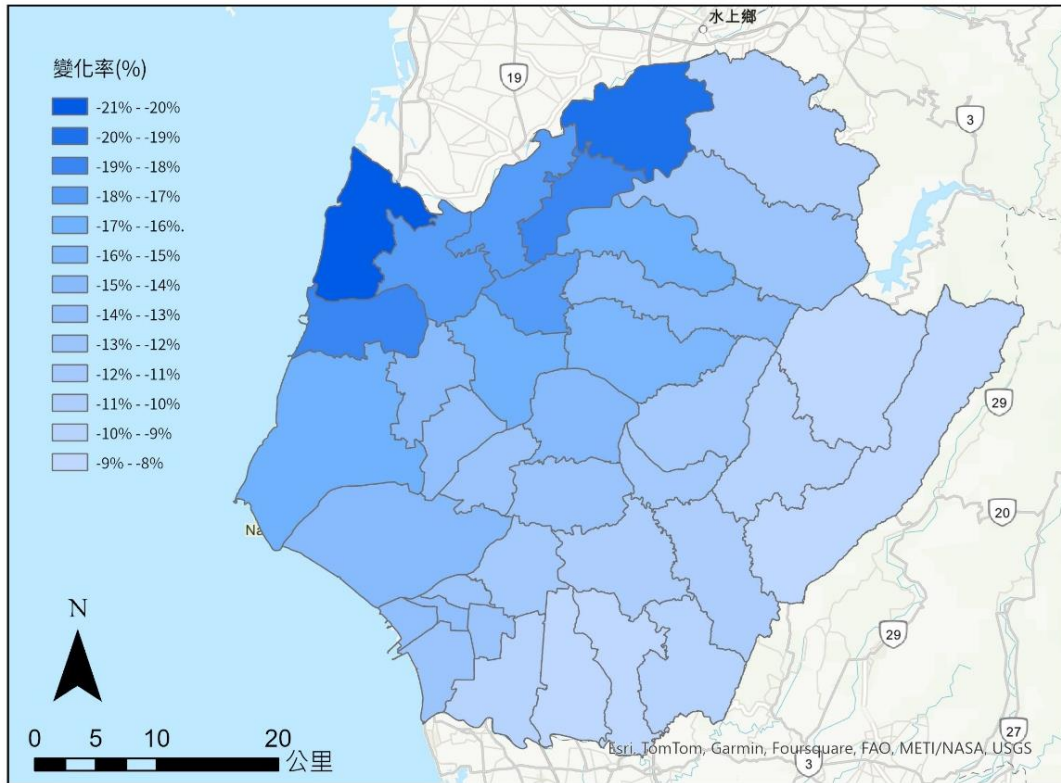


圖4.1-120 臺南市乾旱之於基期延時變化率(增溫 1.5 度條件)

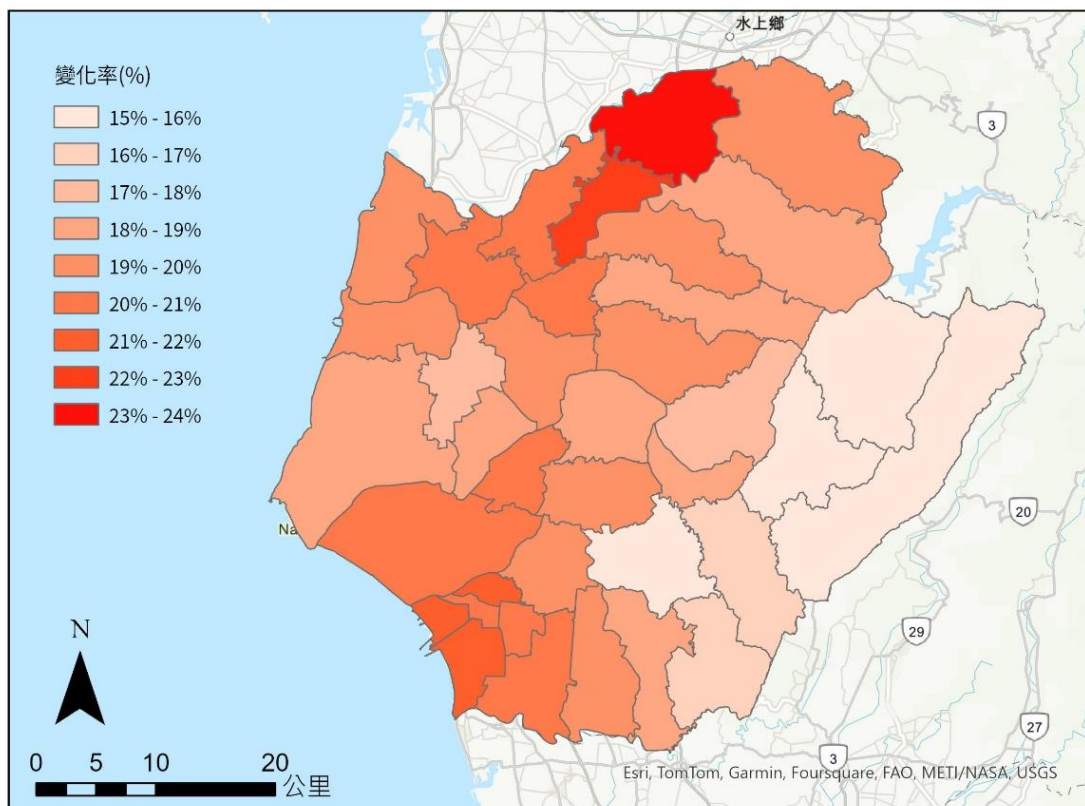


圖4.1-121 臺南市乾旱之於基期延時變化率(增溫 2.0 度條件)

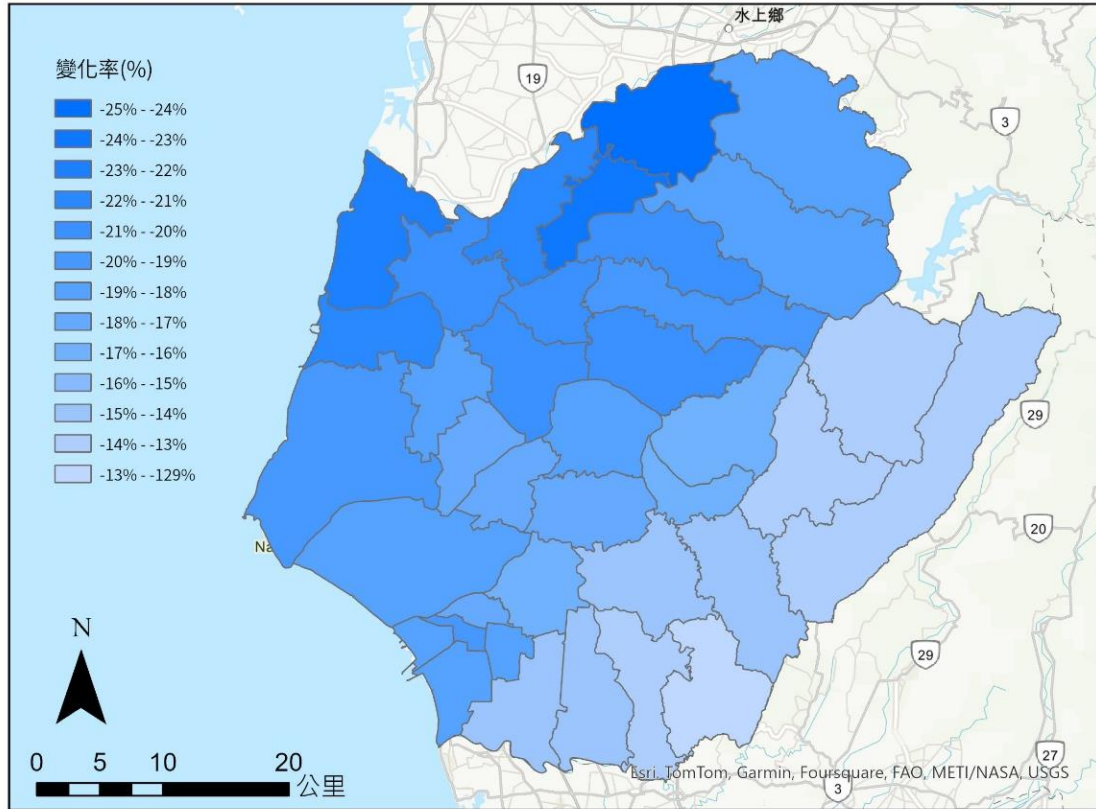


圖4.1-122 臺南市乾旱之於基期嚴重程度變化率(增溫 1.5 度條件)

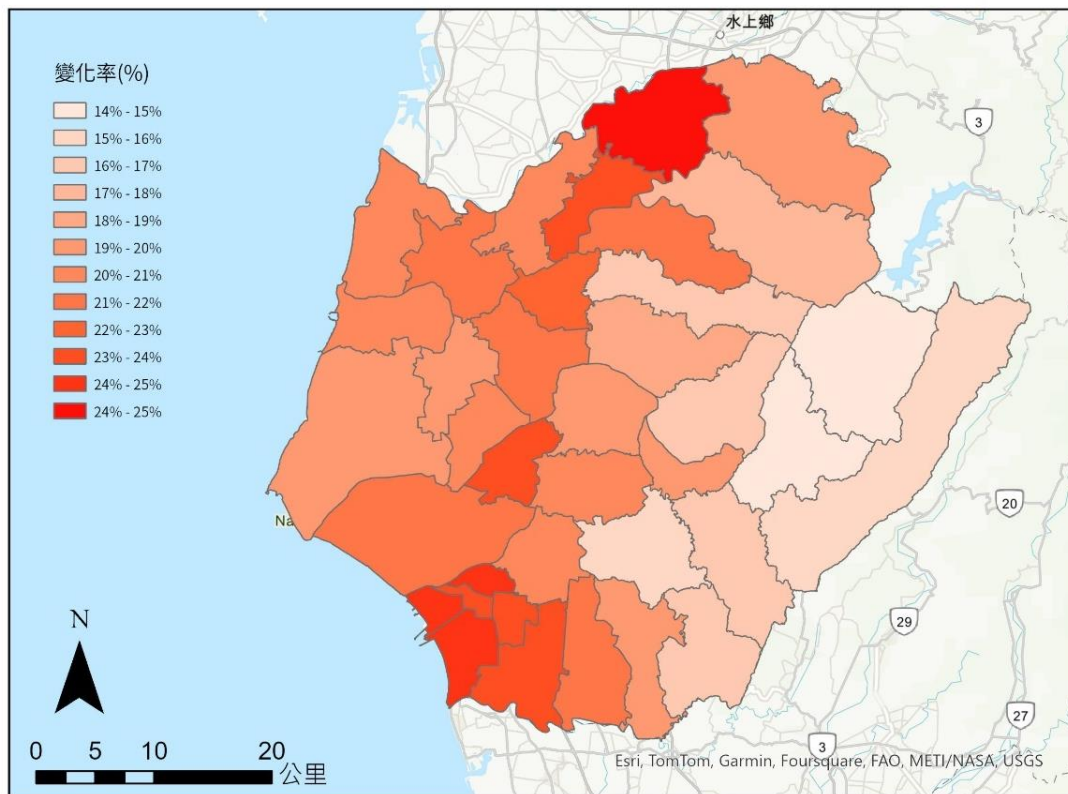


圖4.1-123 臺南市乾旱之於基期嚴重程度變化率(增溫 2.0 度條件)

3. 危害度分析成果

針對臺南市山區行政區域，以增溫 2.0 度 C 之乾濕季降雨條件，建立降雨分析成果，如圖 4.1-124 所示。

由於因子資料面相需求不同需進行資料處理處理，本危害度分析將配合後續雨水貯留系統之議題，為了能將系統最大效益化，同時考慮濕季儲水量及乾季供水需求量，故將濕季降雨量越多的地區定義分數越高，而乾季降雨量越少的地區定義分數越高，使得此降雨危害度分析更加全面。另將使各項因子評量標準相同[0, 1]，以利進行分析需要。

濕季降雨正規化公式如下所示：

$$x_{nom} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \in [0,1]$$

乾季降雨正規化公式如下所示：

$$x_{nom} = \frac{X_{max} - X}{X_{max} - X_{min}} \in [0,1]$$

根據分析，結果如圖所示，等級越高之行政區表示乾濕季越加分明，且越容易造成缺水之風險。

目前分析結果台南市地區主要乾濕季降雨危害度地區以楠西、玉井、南化、左鎮、龍崎、關廟、南區、歸仁為主。

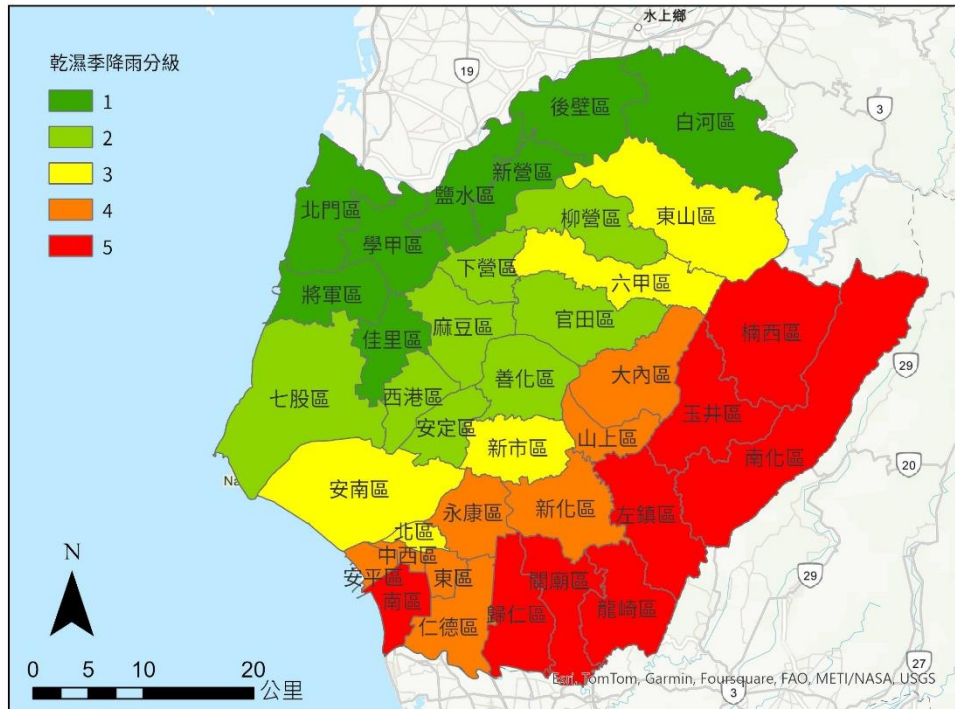


圖4.1-124 臺南市降雨危害度成果

針對臺南市山區行政區域，以增溫 2.0 度 C 之蒸發散量、S P I 延時及 S P I 頻率等條件建立分析成果，瞭解臺南市行政區內各項乾旱熱點區位分布，如圖 4.1-125 所示。

而因子資料尺度不同需進行正規化處理，使各項因子評量標準相同[0, 1]，以利進行分析需要，正規化公式如下所示：

$$X_{nom} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \in [0, 1]$$

根據分析成果，臺南市地區主要乾旱危害度地區以中西、安平、南區、歸仁為主。

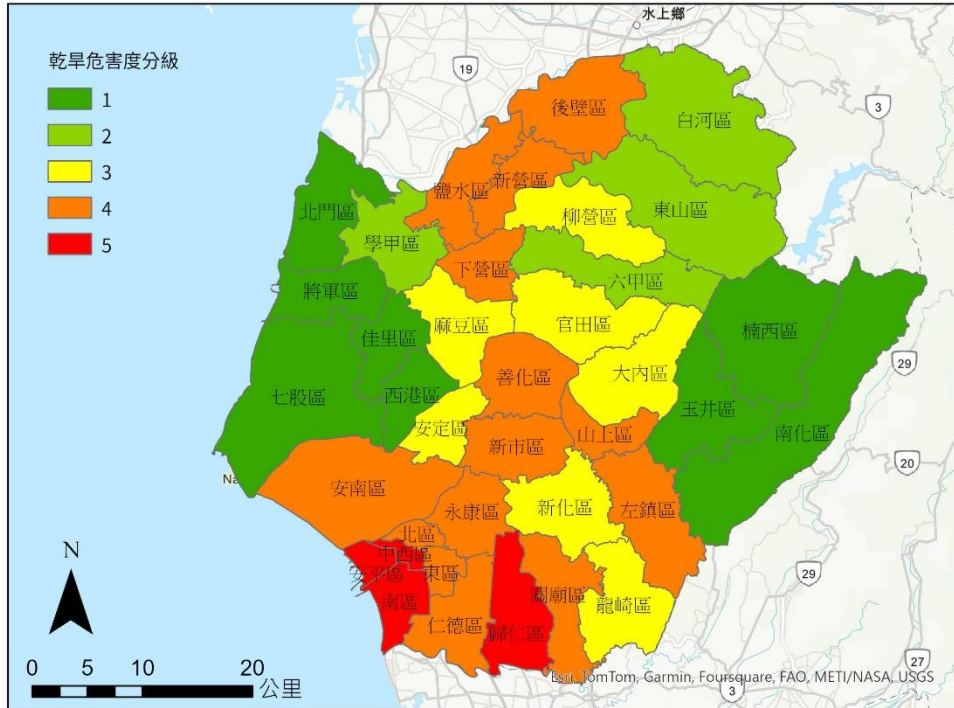


圖4.1-125 臺南市乾旱危害度成果

(二) 暴露度

1. 暴露因子評估處理

(1) 民生用水

民生用水主要包括居民日常生活所需的用水，如飲用水、洗滌用水和衛生用水等。人口分布直接影響民生用水的需求量和供給壓力，因此在水資源分配和管理中，考慮人口分布是至關重要的。人口分布利用幾何間隔 (Geometrical Interval) 分類呈現變異狀況，以經濟部社會經濟資料服務平台最小統計單位，即最小統計區為基準。人口密度以(人口數)/(最小統計區面積)計算，此分類法根據數據的特性，將數據劃分為呈現等比級數的區間，使每個區間內的數據點數量相對均衡，從而避免極值數據對分類結果的過度影響，結果顯示出空間分布較集中於都會區。

(2) 農業用水

在分析農業用水需求時，考慮不同農業種類的用水量具有重要意義。不同作物的用水需求量各不相同，因此需要根據作物種類

和種植期進行分級和權重計算。

在本次分析中，我們主要考慮了第一期水稻、第二期水稻以及其他果農的用水需求。水稻是高需水作物，其生長周期中的用水量較大，因此需要給予較高的權重。第一期水稻和第二期水稻分別對應不同的種植季節，每個季節的氣候條件和水資源供應狀況也有所不同，因此這兩個時期的水稻用水量需要分開計算和分析。

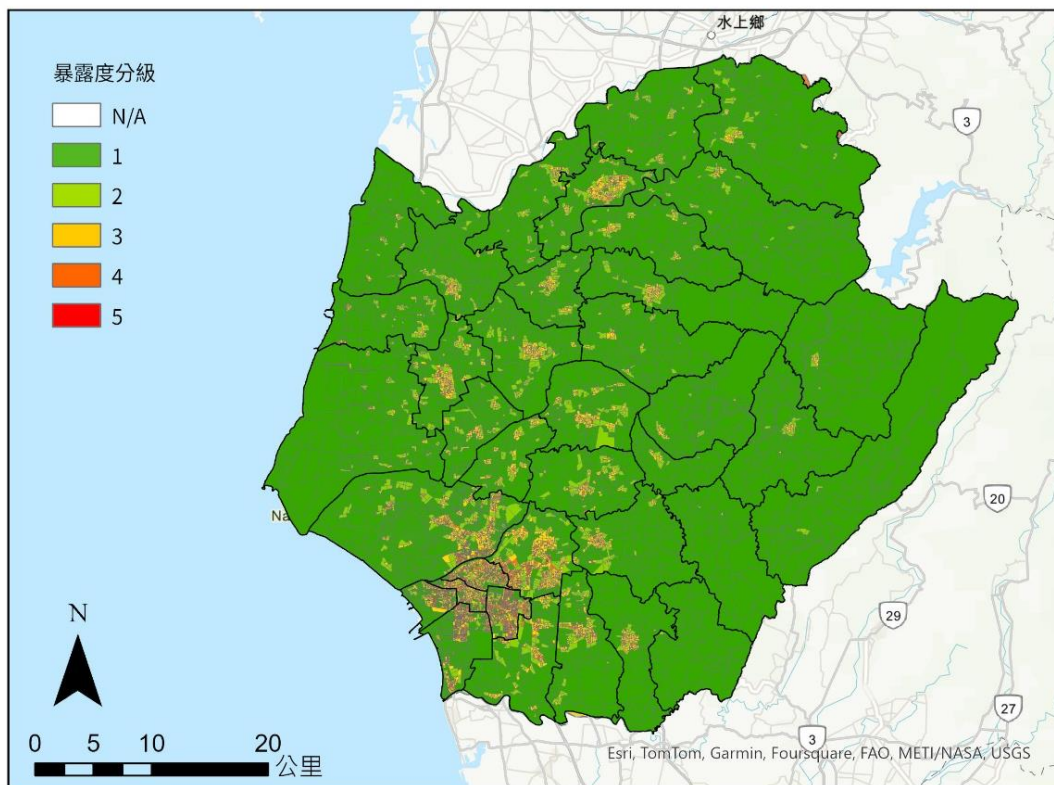


圖4.1-126 臺南市人口分布

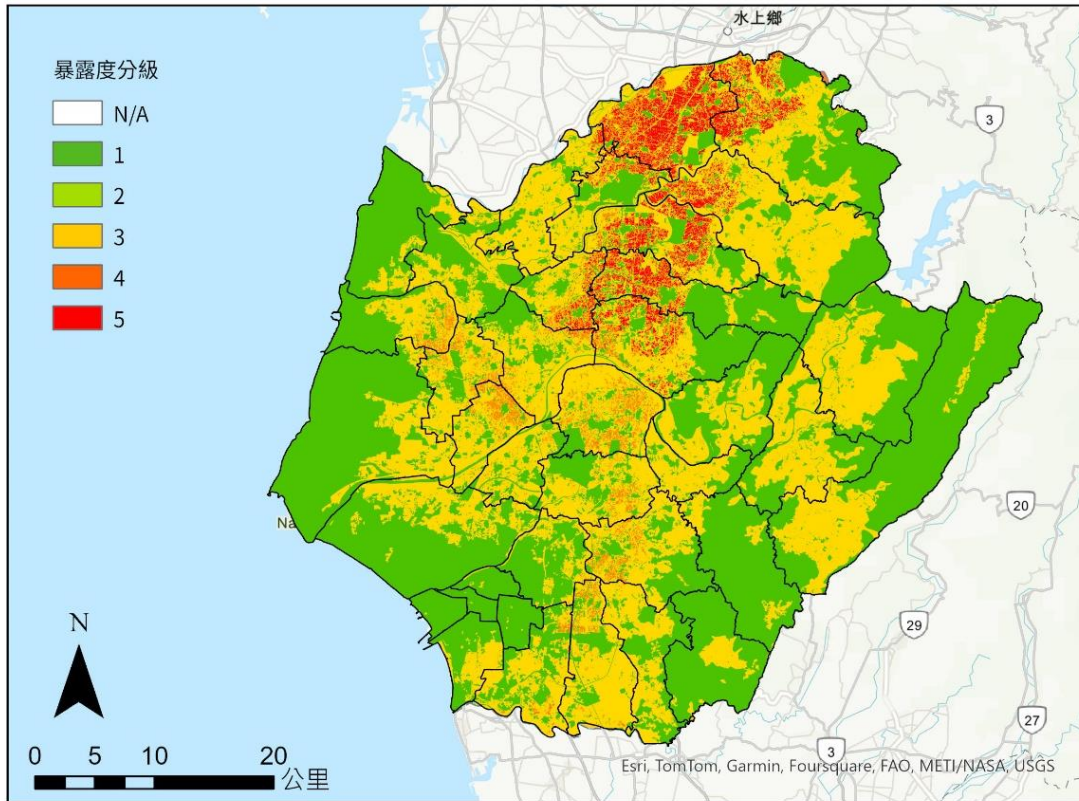


圖4.1-127 臺南市農業用水

(3) 工業用水

在本次分析中，我們採用自然分斷分級法 (Fisher-Jenks) 對不同工業種類進行分級。這種方法通過尋找資料集中的自然分隔點，可以創建分類間隔，將類內變異最小化，同時最大化類間變異。這樣可以更精確地反映不同工業種類的用水需求及其對供水不足的敏感性。各不同工業種類的用水如表 4.1-14。

表4.1-14 各業別單位面積日用水量

行業代碼與名稱	單位面積日用水量 (立方公尺/公頃/日)
08 金品及飼品製造業	32
09 飲料製造業	32
10 菸草製造業	2
11 紡織業	31
12 成衣及服飾品製造業	16
13 皮革、毛皮及其製品製造業	28
14 木竹製品製造業	40

15 紙漿、紙及紙製品製造業	1,030
16 印刷及資料儲存媒體複製業	50
17 石油及煤製品製造業	17
18 化學材料及肥料製造業	34
19 其他化學製品製造業	24
20 藥品及醫用化學製品製造業	24
21 橡膠製品製造業	48
22 塑膠製品製造業	23
23 非金屬礦物製品製造業	11
24 基本金屬製造業	13
25 金屬製品製造業	13
26 電子零組件製造業	18
27 電腦、電子產品及光學製品製造業	18
28 電力設備及配備製造業	18
29 機械設備製造業	5
30 汽車及其零件製造業	50
31 其他運輸工具及其零件製造業	50
32 家具製造業	15
33 其他製造業	310

資料來源：經濟部水利署 111 年工業用水量統計報告

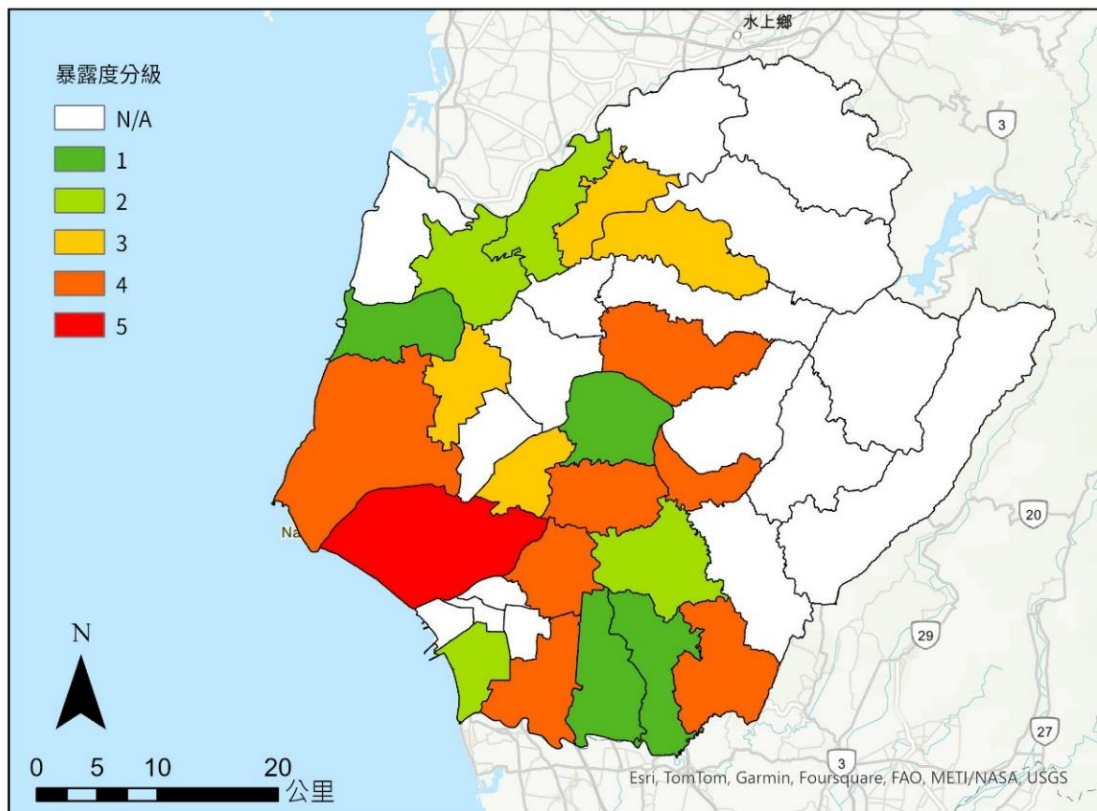


圖4.1-128 臺南市工業用水

(三) 脆弱度(韌性)

1. 給水管線

在分析各面向用水需求時，考慮管線設施在乾旱極端天氣條件下，設施的完備性和可靠性將變得重要。高密度的管線設置雖然能提高用水效率，但在缺乏水資源的狀況下也可能加劇不同用水需求間的競爭，導致了供水量不足抑或不平衡之情形，就比如民生用水和農業用水之間的競爭關係。

因此，在必須平衡各用水需求之情形下將管線密度納入脆弱度因子，可以更全面地評估區域用水需求與供應的矛盾。未來也許可以考慮制定因應台南市地區之水資源管理方案，以確保在滿足民生用水的同時，給予農業用水足夠的保障。就如本計畫後續探討之農業供水議題將提到可以通過優化灌溉技術、推行智能用水管理系統和多源水供應策略等手段，提高水資源利用效率以應對氣候變遷之影響。

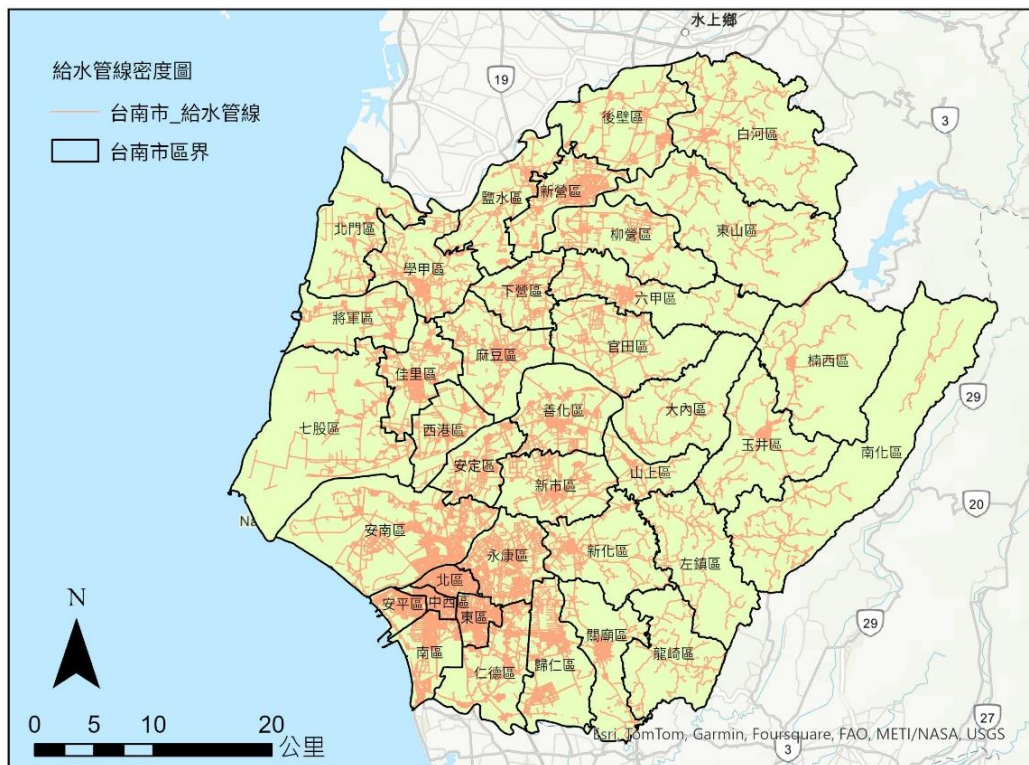


圖4.1-129 臺南市給水管線密度圖

2. 地下水水位

在分析各面向用水需求時，考慮到台南市之農業用水及工業用水皆有一定比例使用地下水，因此本計畫將地下水水位圖納入脆弱度分析中。

地下水作為關鍵的水資源，尤其在乾旱或供水不足的情況下，對於農業的灌溉和工業的生產活動均有重大影響。有效的利用地下水也將是開源節流管理水資源的一部份，而地下水水位圖能夠顯示不同區域地下水的深度和分佈狀況，本計畫以近五年(2019-2023)之地下水水位年變化量進行分級量化，透過分析地下水水位的變化，可以了解且界定受影響之區域分級，並對後續議題進行針對性之應對措施。

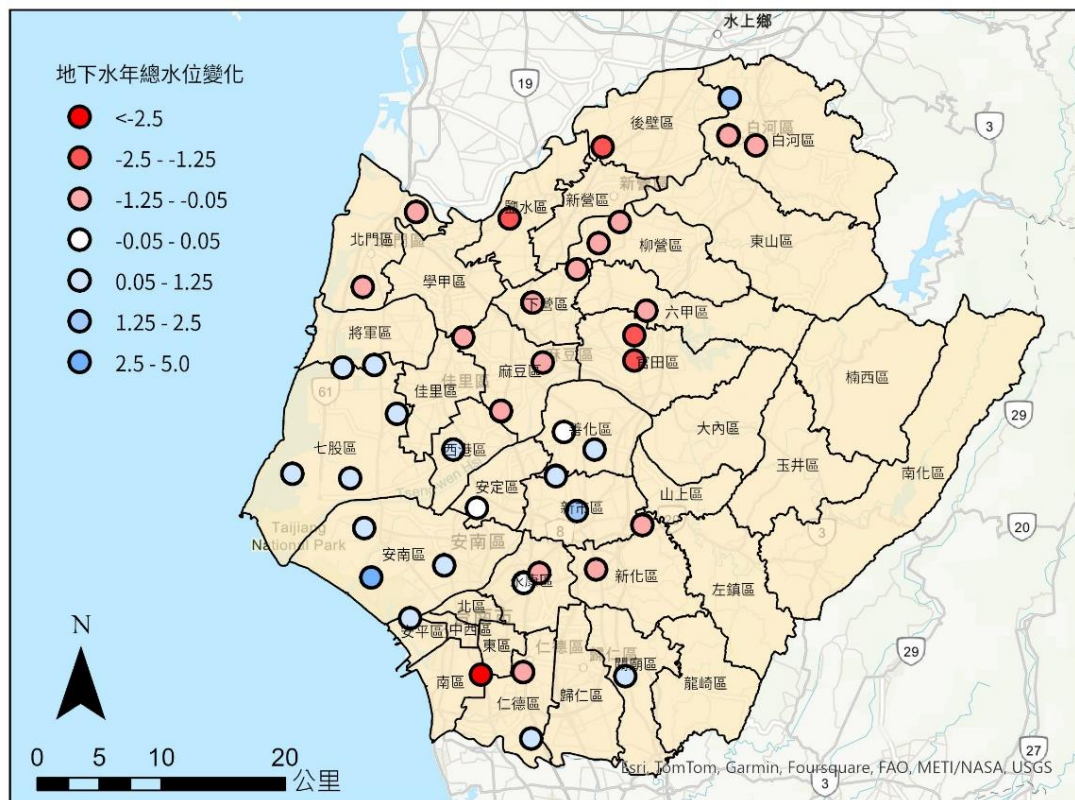


圖4.1-130 臺南市地下水水位分級圖

(三) 風險評估

由於水資源日前對於脆弱度之分析資料不足及相關設施正在建構中，因此本計畫將利用雙變量分析來評估風險並建議未來脆弱度指標。而根據這些分析結果，可以提供針對性的未來脆弱度指標方案。這些指標將幫助城市制定更有效的水資源管理策略，提升抗水資源短缺的能力，並促進城市的可持續發展。

雙變量分析是一種統計方法，用於研究兩個變量之間的關係。分位數回歸 (Quantile Regression) 是一種擴展的雙變量分析技術，用於分析不同條件下兩個變量之間的關聯。與傳統的線性回歸不同，分位數回歸可以提供變量之間關係的更全面視圖，特別是在數據的不同分位數上：

雙變量分析旨在探索兩個變量之間的相關性。傳統的線性回歸分析主要集中在解釋變量的均值，而分位數回歸則能夠在數據的不同位置進行回歸分析，從而提供更豐富的信息。這在處理非對稱數據或當數據分佈有異常值時尤其有用。

分位數回歸可表示為：

$$Q_Y(\tau|X) = X\beta(\tau)$$

其中， $Q_Y(\tau|X)$ 是條件分位數， τ 是分位數 (0.25, 0.5, 0.75)， $\beta(\tau)$ 是分位數 τ 下的回歸係數。

本次初步分析，在台南市的 2022 年民生用水情況中，自來水配量達到 248,593,260 立方公尺，而自行取水為 2,433,140 立方公尺。這表明自來水仍然是主要的民生用水來源，佔據了絕大部分的用水需求。自行取水的量雖然相對較小，但仍然在一定程度上補充了用水需求，基於這一數據，建議增加建築物雨水貯留系統，以提升水資源的利用效率和自給能力。建築物雨水貯留系統能夠有效地收集和儲存降雨水，將其轉化為可供使用的水資源，這對於應對



台南市面臨的水資源挑戰尤為重要。而本議題結合人口密度與降雨系統危害度分級進行分析，並提供多項調適：

(1) 減少自來水需求：

雨水貯留系統可以收集降雨並儲存，從而減少對自來水的需求。這不僅能降低生活用水成本，還能減輕自來水供應系統的壓力。

(2) 應對乾旱和水資源短缺：

當面臨乾旱和水資源短缺問題。雨水貯留系統能夠提供額外的水源，有助於在乾旱期間提供穩定的水供應，增加城市的抗旱能力。

(3) 促進可持續發展：

雨水貯留系統符合可持續發展的理念，能夠有效利用自然資源，減少對地下水和其他水源的過度開採，支持環境保護和資源節約。

(4) 降低污水處理壓力：

收集的雨水可以用於非飲用水用途，如灌溉、清潔和景觀用水，從而減少污水處理系統的壓力和運營成本。

● 高風險區

永康、中西、仁德、東區及南區

● 未來可追蹤脆弱度指標

雨水貯留和管理系統的運行效率和性能

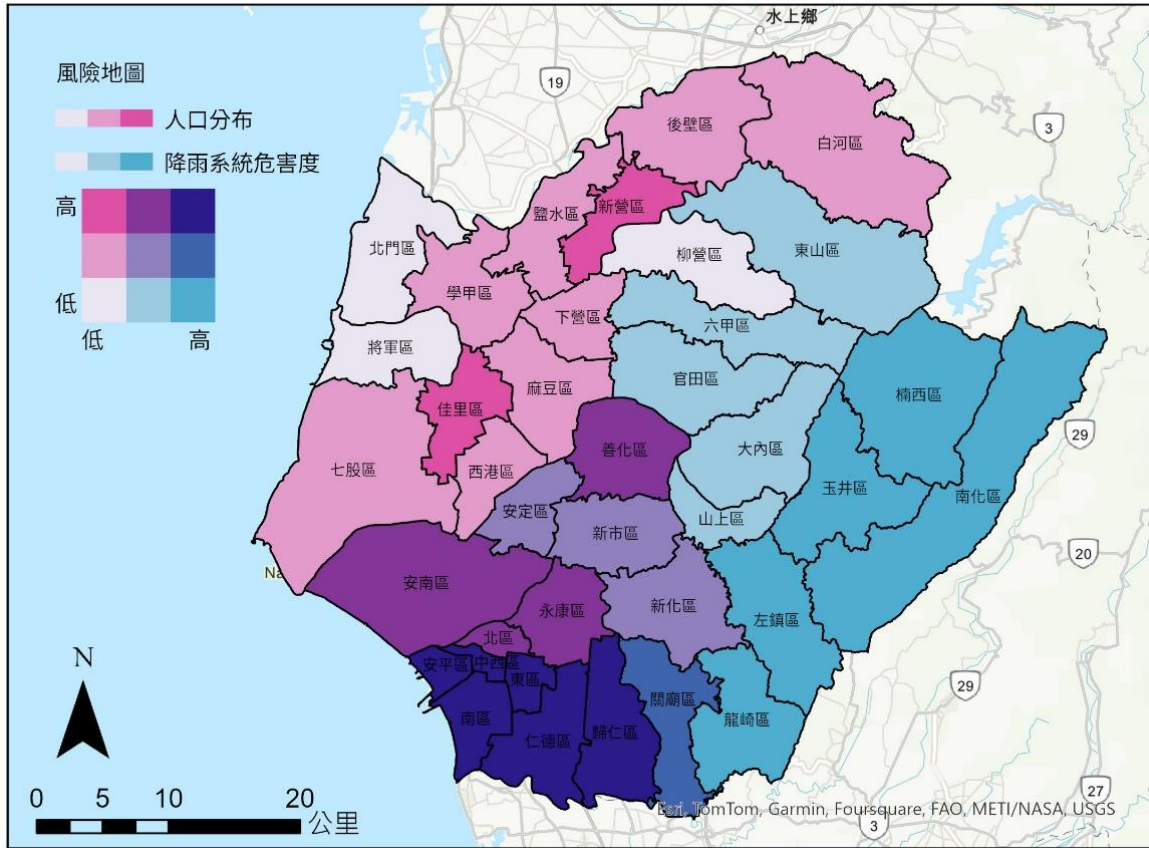


圖4.1-131 臺南市雨水貯留系統需求風險地圖

4.2 檢視既有施政計畫能否因應關鍵領域未來風險

4.2.1 國土計畫

檢視民國 110 年臺南市國土計畫，其中氣候變遷調適計畫章節訂有氣候變遷空間調適策略，彙整如表 4.2-1 所示。

表4.2-1 國土計畫中氣候變遷空間調適策略

地區	空間調適策略
山坡地區	<ol style="list-style-type: none"> 1. 坡地農業利用應加強災害防治，並兼顧水源地維護、植被維護及基礎設施安全。 2. 檢討山區城鄉及產業發展之潛在風險及研析轉型調適方式。 3. 加強坡地住宅及坡地農業之暴雨逕流、崩塌潛勢監測及相關保全措施。
非都市平原地區	<ol style="list-style-type: none"> 1. 維護一定面積比例農地資源及灌排系統，以確保特殊時期糧食安全。 2. 持續監測河川系統洪枯流量及地下水位變化，推動脆弱環境集水區治理。 3. 強化水源調配機制及系統，降低水資源相關設施環境衝擊並發展多目標利用。 4. 針對枯水期有較高乾旱潛勢之地區及產業類型，規劃區域水資源調度方案。
城鄉發展地區	<ol style="list-style-type: none"> 1. 落實及增修相關減排措施，減少建成地區溫室氣體排放並推廣韌性城市規劃。 2. 都市發展及產業園區配置，應考量乾旱潛勢及水源供需，強化保水儲水及緊急備援用水規劃。 3. 因應氣候風險類型及社會長期發展趨勢，檢討基盤設施區位及型態，優先保留開放空間並加強綠覆率、保水、透水及儲水設施。 4. 配合氣候變遷可能影響（如淹水災害）進行防災型都市規劃，提供中繼基地或安全建地。 5. 城鄉發展地區之未來發展用地如具災害潛勢，應於開發計畫中特別載明相關調適原則及行動方案。
海岸地區	<ol style="list-style-type: none"> 1. 考量海平面上升及海嘯潛勢，設置必要安全防護設施或劃設緩衝區域，於環境承载力容許之安全範圍中，集中發展人工設施並保留自然環境之完整性。 2. 配合氣候變遷風險及海岸侵淤狀況，調整沿海土地使用強度，適度調整開發密度及規範開發行為。 3. 加強海岸及近海生態保育，並保全漁業及相關產業之生態基礎。

4.2.2 施政計畫

參考臺南市政府 113 年度施政計畫，盤點屬關鍵領域中與氣候變遷調適相關的措施，再透過各局處填寫的目標彙整表實際了解計畫執行內容後，與前述針對領域議題的氣候變遷風險評估成果進行比對及歸納，若既有計畫已可因應未來風險，則歸類為「持續推動」；若既有計畫調整後可因應未來風險，則歸類為「調整後執行」；若既有計畫無法應對風險，表示有調適缺口，應評估新增則歸類為「建議新增」，本計畫針對關鍵領域將既有計畫彙整成上述三類，並說明如表 4.2-2 所示。

表 4.2-2 關鍵領域中與氣候變遷相關既有施政計畫盤點

領域	對應災害議題	施政計畫名稱	局處	分類	具有以自然/社區為本的調適措施
維生基礎設施	降雨造成排水及下水道系統壓力提升	落實防洪治水及區域排水整體改善計畫	水利局	調整後執行	
		推動智慧防汛系統及改善工程		調整後執行	
		臺南市雨水下水道即時水情監測系統建置計畫		調整後執行	
		推動雨水下水道建設結合都市總合治水策略		調整後執行	
	降雨/土砂災害導致道路、橋梁交通受影響	辦理道路橋梁拓修整建改善及緊急應變工程	工務局	調整後執行	
		辦理市內非重劃區既有農水路改善	農業局	調整後執行	
	降雨/土砂/高溫導致水電等維生管線設施受影響	維生管線韌性提升調適平台	工務局	調整後執行	
水資源	供水量不足	公共汙水處理廠放流水回收再利用推動計畫	水利局	持續推動	
		辦理污水管線緊急搶修及用戶接管維護		調整後執行	
		臺南市政府及所屬機關學校用電用水效率管理計畫	秘書處	調整後執行	
		辦理工業區節水宣導	經發局	調整後執行	
		抗旱水井備援	經發局	調整後執行	

領域	對應災害議題	施政計畫名稱	局處	分類	具有以自然/社區為本的調適措施
		農林漁牧業水資源回收再利用	農業局	調整後執行	
	水庫集水區坡地崩塌影響庫容/水源濁度上升影響取水及淨水效率	治山防災野溪治理	水利局	調整後執行	以自然為本的調適措施
	地下水使用壓力增加，減少地下水補注/蒸發散量增加導致水資源減少	落實地下水保育及水資源永續利用政策	水利局	調整後執行	
土地利用	都市計畫區淹水問題加劇	辦理臺南市國土功能分區圖繪製作業及後續管制事項	都發局 地政局	調整後執行	
	非都市計畫區雨水承受能力降低	農地資源空間規劃	農業局	調整後執行	
		鄉村地區整體規劃	都發局	調整後執行	
	在熱浪下都市熱島效應會有增加趨勢	綠社區培力計畫、好望角專案計畫	都發局	調整後執行	以自然為本的調適措施
		美麗新家園空地綠美化	民政局	調整後執行	以自然為本的調適措施
	開發區綠美化	地政局	持續推動	以自然為本的調適措施	
雨水貯留系統需求增加	建物雨水貯留	工務局	持續推動		