

# 全球糧食體系之氣候韌性

林裕彬

國立臺灣大學生物資源暨農學院

## 摘要

全球氣候變遷正影響四大主要糧食作物－稻米、玉米、大豆與小麥－之產區分布與潛在生產力，並導致作物氣候適栽性、區域生產及溫室氣體排放風險的重大轉變。跨模式模擬結果顯示，至 2100 年，全球作物適栽區將在低排放情境(RCP1-SSP2.6)下出現明顯向高緯度遷移的趨勢；而在高排放情境(RCP5-SSP8.5)下，受影響土地面積可能呈現倍增。預測結果指出，小麥與稻米在北美與歐洲等高緯度地區之適栽性與生產潛勢有望提升；相對地，南亞、東南亞、撒哈拉以南非洲及部分南美洲的玉米與大豆可能面臨 20~80% 的減產風險。同時，美國與巴西的低緯度至中緯度地區之稻作產量則可能增加 2~20 倍，顯示全球糧食生產中心可能由低緯度亞洲向西北高緯度地帶重新定位。

此空間轉折意味著未來糧食風險將從「產量不足」轉向「區域不均衡、土地競合與地緣脆弱性」模式。同時，溫室氣體排放熱點也可能重新分布：淹水型稻作擴張可能增加甲烷(CH<sub>4</sub>)排放；高緯度地區若以集約化方式生產玉米、大豆與小麥，則可能提升氧化亞氮(N<sub>2</sub>O)排放；而碳儲量高的森林、草原與濕地開發亦可能造成額外的土地利用變更排放。此外，由於中國與印度在稻米、小麥與玉米生產中占有重要角色，未來可能成為主要農業溫室氣體排放來源。

因此，未來全球農糧治理必須同時整合氣候調適、生產韌性與排放減量，透過氣候智慧農業(Climate-Smart Agriculture, CSA)、節水灌溉科技、耐熱與低碳品種育成，以及全生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)之政策工具，以建構全球永續糧食體系。

關鍵字：氣候韌性、作物適栽性、灌溉調適、溫室氣體排放



國立臺灣大學  
National Taiwan University



國立臺灣大學生物資源暨農學院  
College of Bioresources and Agriculture, National Taiwan University

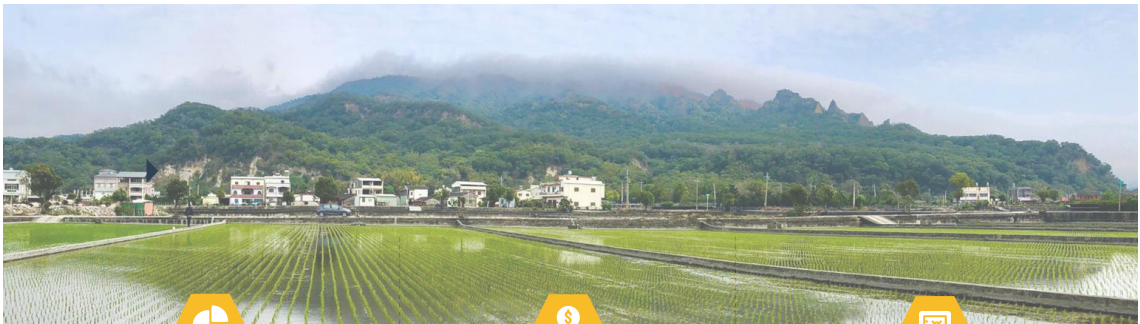
因應氣候變遷之水稻與雜糧未來研究論壇

## 全球糧食系統之氣候韌性

國立臺灣大學生物資源暨農學院

林裕彬 院長

2025.11.26



氣候變遷改變  
作物適栽區分布



作物耕種面積與  
溫室氣體排放趨勢



未來與展望

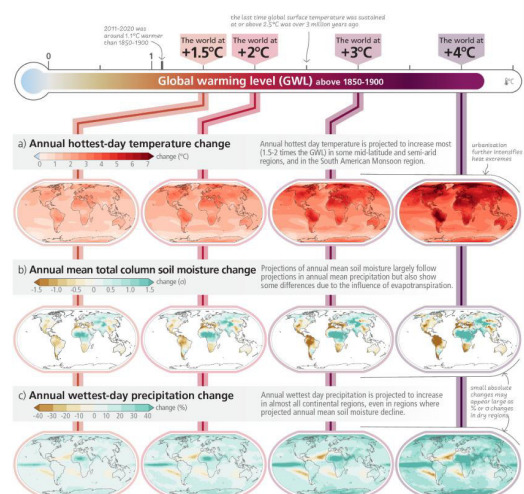
# 氣候變遷與 作物栽培

## 全球暖化與氣候變遷

Projected changes of annual maximum daily maximum temperature, annual mean total column soil moisture and annual maximum 1-day precipitation at global warming levels of 1.5°C, 2°C, 3°C, and 4°C relative to 1850–1900. **{ " " }** Projected (a) **annual maximum daily temperature change (°C)**, (b) **annual mean total column soil moisture (standard deviation)**, (c) **annual maximum 1-day precipitation change (%)**.



With every increment of global warming, regional changes in mean climate and extremes become more widespread and pronounced

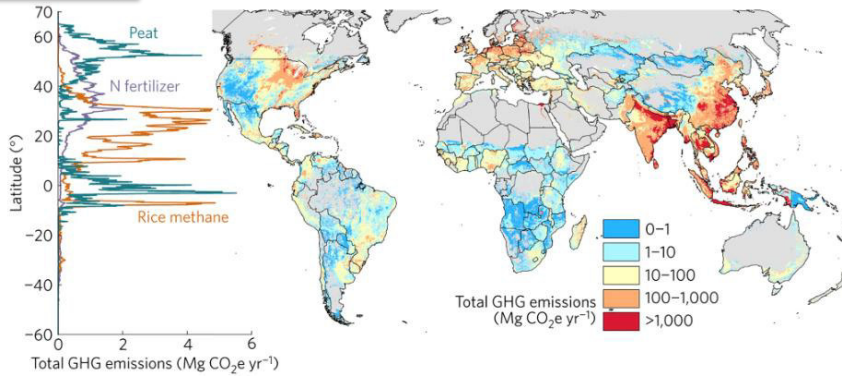


\*Source: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/figures/IPCC\\_AR6\\_Syr\\_SPM\\_Figure2.png](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/figures/IPCC_AR6_Syr_SPM_Figure2.png)



# 全球溫室氣體排放分布

nature climate change



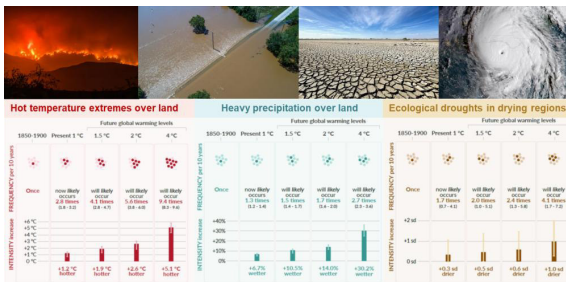
全球農地溫室氣體排放高度集中於亞洲，由稻作甲烷、泥炭地排放與氮肥施用三大來源主導。熱帶以 CH<sub>4</sub> 為主、高緯度以 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O 為主，形成明顯的緯度排放差異。

\*資料來源：Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. Nature Clim Change 7, 63–68 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3158>

# 極端氣候發生之頻率與強度正在增加

ipcc

風險變化由下列三種因素構成：  
災害強度、受暴露人口及資產，  
以及人類或生態系統之脆弱度



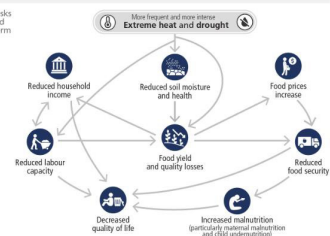
### b) Increased frequency of extreme sea level events by 2040

Frequency of events that currently occur on average once every 100 years. The absence of a circle indicates an inability to perform an assessment due to a lack of data.



### c) Example of complex risk, where impacts from climate extreme events have cascading effects on food, nutrition, livelihoods and well-being of smallholder farmers

Multiple climate change risks will increasingly compound and cascade in the near term

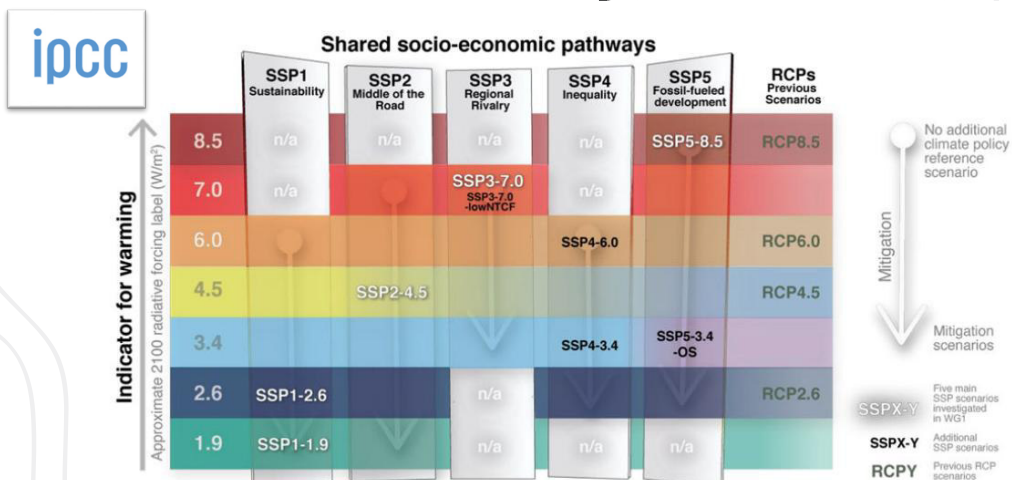


\*資料來源：Climate Change 2021, The Physical Science Basis, IPCC, <https://www.scientificamerican.com/>

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/figure-4-3>



## The IPCC 6th Assessment Report on Climate Science



The final SSPs in white lettering indicate the core set of five illustrative SSP scenarios, which spans "a wide range of plausible societal and climatic futures from potentially below 1.5C best-estimate warming to over 4C warming by 2100"

\*Source: <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science/>

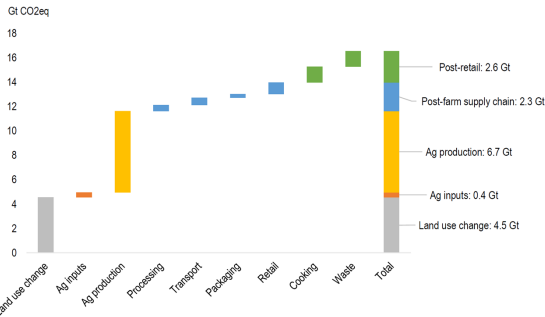


# 農業生產與溫室氣體排放

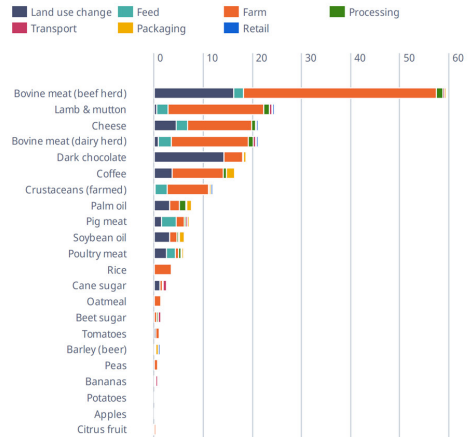
全球糧食系統排放中，超過六成來自土地利用與農業生產階段



Gt CO<sub>2</sub>e



Kg CO<sub>2</sub>e per kg of product

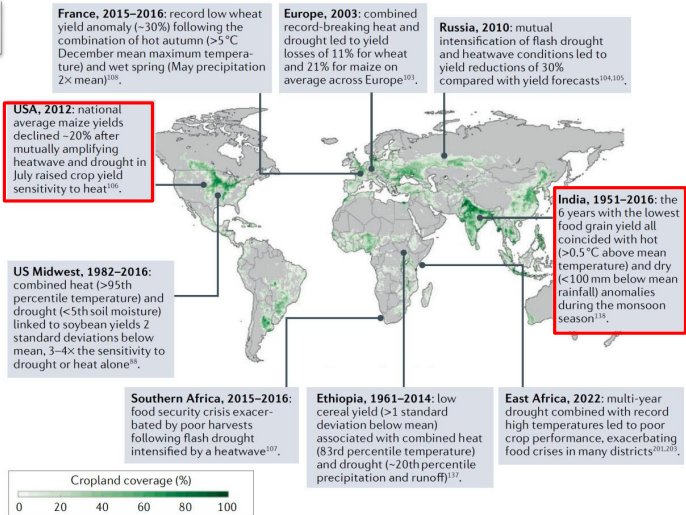


\*資料來源： OECD (2025), Measuring Carbon Footprints of Agri-Food Products: Eight Building Blocks, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/8eb75706-en>.

# 複合極端氣候對作物生產之衝擊

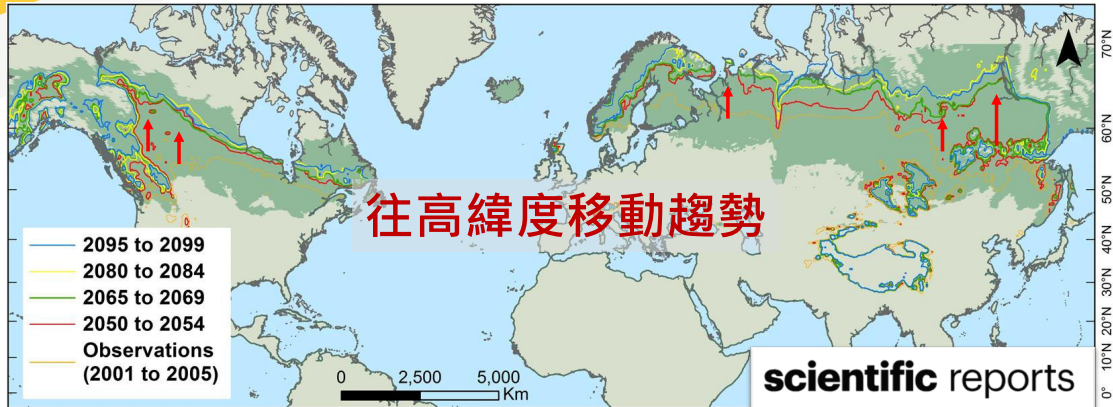
nature reviews earth & environment

在全球與區域尺度上，熱浪與乾旱等複合極端氣候事件已造成作物產量下滑與波動加劇



\*資料來源： Nature Reviews Earth & Environment (2022) 872–889. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8>

## 全球氣候變遷下農業氣候帶北移動

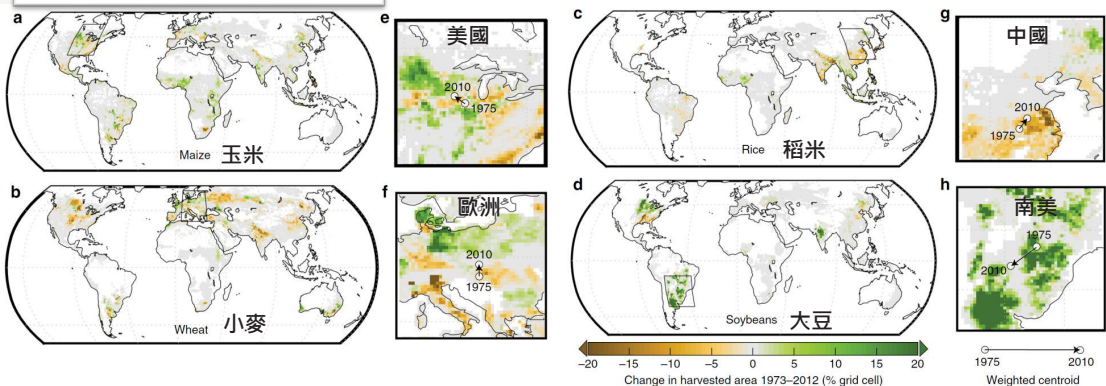


隨著氣候變遷加劇，低緯度農業區域面臨生產風險升高，高緯度地區暖化與更長的生長期，導致全球農業氣候帶向北（高緯度）擴張。

\*資料來源：PNAS, 117 (47) 29526-29534, 2020. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2017796117](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2017796117)

## 作物正從較熱地區移向較涼爽地區

nature communications

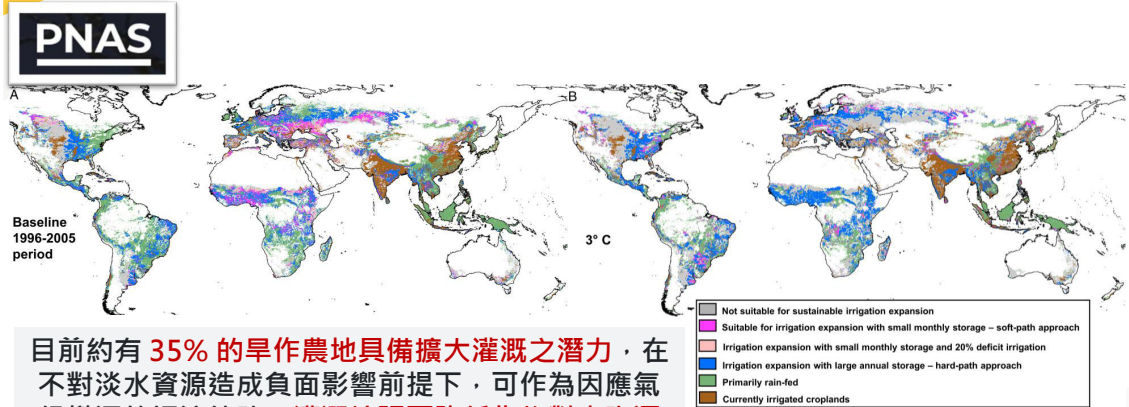


美國玉米呈現向西北遷移的趨勢；歐洲小麥則有明顯的北移；中國稻作區同樣向北移動；而巴西與阿根廷的大豆種植則普遍向更涼爽區域擴張。

\*資料來源：Nat Commun 11, 1243 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15076-4>



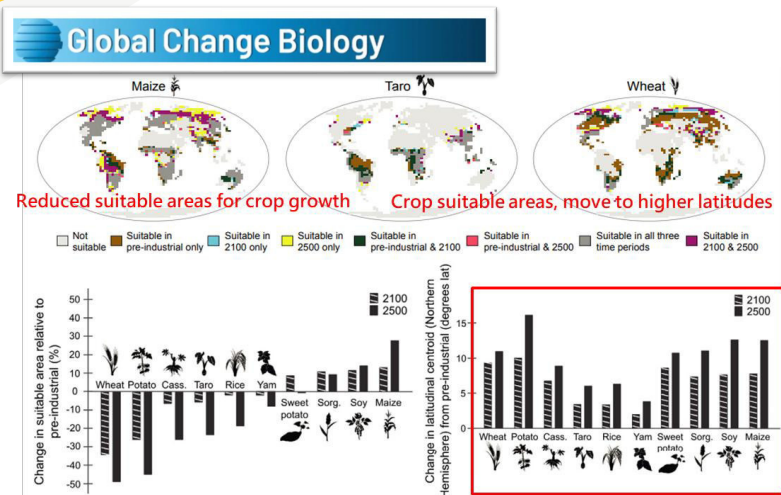
## 全球灌溉適宜區域分布擴大



目前約有 **35%** 的旱作農地具備擴大灌溉之潛力，在不對淡水資源造成負面影響前提下，可作為因應氣候變遷的調適策略。灌溉擴張可降低作物對水資源稀缺壓力之脆弱度，並提升農作物生產力。

\*資料來源：PNAS, 117 (47) 29526-29534, 2020. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2017796117](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2017796117)

## 全球作物適栽區將往極地方向移動

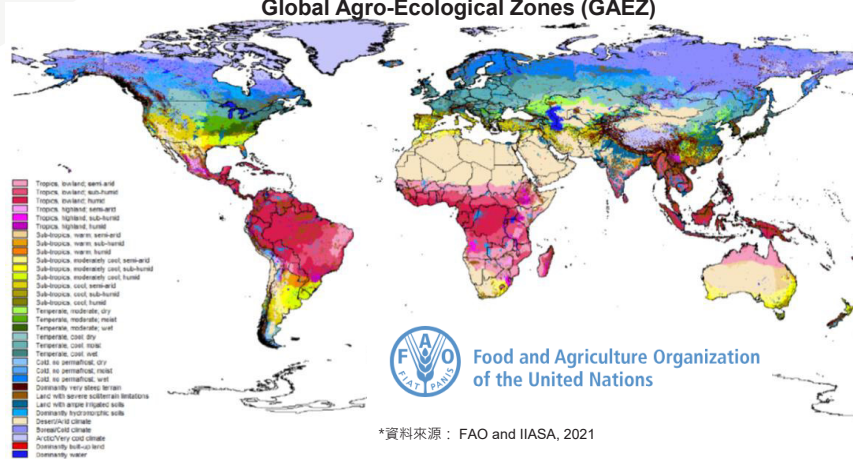


\*資料來源：Glob Change Biol. 2022;28:349-361

- 在 RCP6.0 (中度至高排放) 情境下，全球作物適栽度分布在 2100 與 2500 年將發生顯著改變。
- 氣候變遷將使全球適合作物生長區域縮減，並逐漸向更高緯度遷移。熱帶作物適栽土地面積將減少 **2.3%** ( $\pm 1.6%$ )；溫帶則減少 **10.9%** ( $\pm 24.2%$ )。顯示溫帶作物適栽區受到氣候變遷之衝擊更為明顯。

## 全球農業生態分區

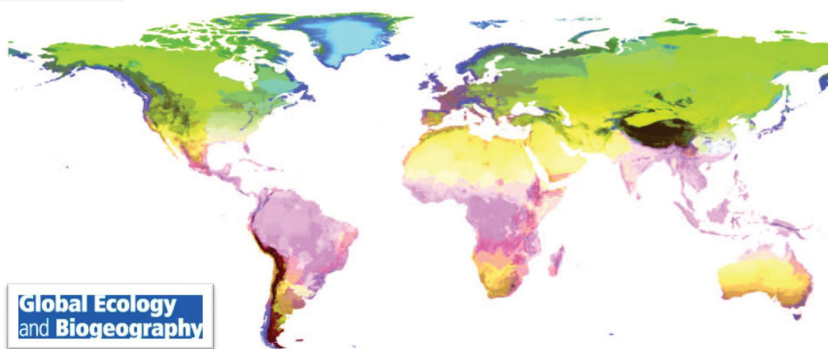
Global Agro-Ecological Zones (GAEZ)



GAEZ 結合氣候資料、土壤特性、地形資訊與作物特定參數，用於推估農業生產潛力。此模型可支援全球與區域的糧食生產能力評估、土地利用最佳化分析，以及氣候變遷對農業的影響研究，支援全球、區域與國家層級之永續土地利用規劃與糧食安全策略。

## 全球環境分區

Global Environmental Zone, GEZ



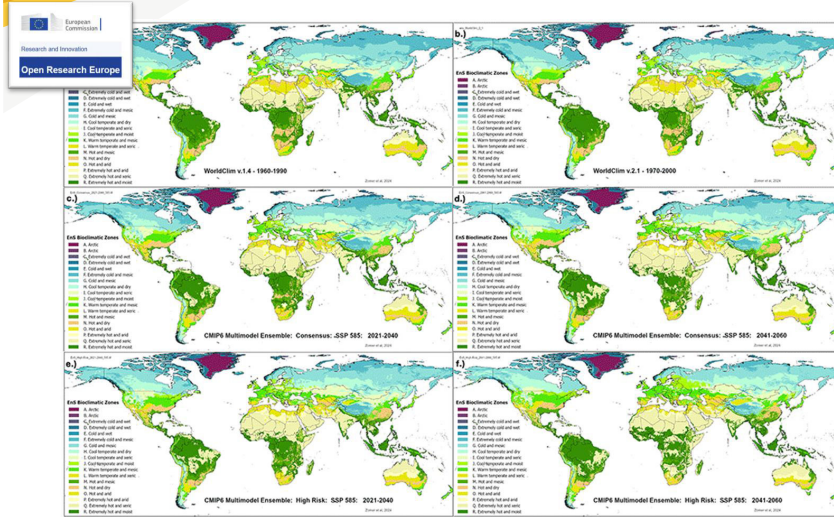
Global Environmental Zone Name	
A. Arctic	1
B. Arctic	2
C. Extremely cold and wet	3
D. Extremely cold and wet	4
E. Cold and wet	5
F. Extremely cold and mesic	6
G. Cold and mesic	7
H. Cool temperate and dry	8
I. Cool temperate and xeric	9
J. Cool temperate and moist	10
K. Warm temperate and mesic	11
L. Warm temperate and xeric	12
M. Hot and mesic	13
N. Hot and dry	14
O. Hot and arid	15
P. Extremely hot and arid	16
Q. Extremely hot and xeric	17
R. Extremely hot and moist	18

全球環境分區 (GENs) 是利用多變量分群方法，整合氣候、輻射、地形指標所建立的全球環境分類系統。此分類包含 125 類環境層級，並進一步彙整為 18 類主要環境區。GENs 可支援全球尺度的生態格局、土地適宜性及不同氣候情境下環境變遷影響之空間描繪與分析。

\*資料來源：Global Ecology and Biogeography, (Global Ecol. Biogeogr.) (2013) 22, 630–638; DOI: 10.1111/geb.12022



# GEnS 模型顯示生物氣候條件之變化

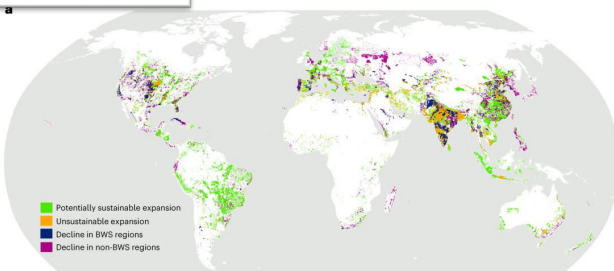


GEnS 分析顯示，到本世紀中期生物氣候分布將出現顯著改變。在高排放情境下，**溫暖區域將向極地方向與更高海拔移動**，而**熱帶與乾旱區域則加劇擴張**，反映出與觀測趨勢一致的大規模生態帶位移。

\*資料來源：2025, 5:193 (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.20387.1>)

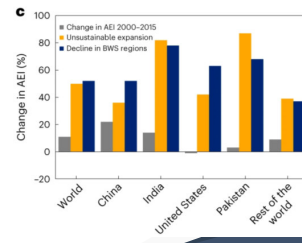
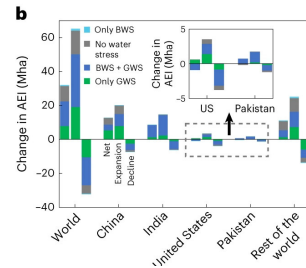
# 全球灌溉限制與效益差異

nature water



全球農業使用超過 **70%** 的淡水資源，並生產約 **40%** 的全球糧食，其中大多依賴灌溉。然而灌溉管理不當已造成 **20%** 灌溉農地鹽化；同時，許多地區的取水量遠超過可再利用之水資源，導致長期水資源使用風險。

\*資料來源：Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. Nat Water 2, 254–261 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00206-9>





法國波爾多暖化(過去30年，氣溫增加1.5度)導致葡萄提前成熟(提早 20 天採收)、糖分增加、酸度降低，影響紅酒口感與酒精濃度，面臨產量與品質挑戰。



## Dismissed as a joke, UK's first rice crop ripe for picking after hot summer

28 September 2025

Share Save

Georgina Rannard  
Climate and science correspondent



Nadine Mitschunas is the UK's first rice grower

Gwynndaf Hughes/BBC

<https://www.bbc.com/news/articles/c1wgeq702dyo>

## WEATHER

Home | Weather Warnings | Flood Warnings | Monthly Outlook | Coast and Sea | Help

### Summer 2025 confirmed as UK's hottest on record



Ben Rich

#### A summer of four heatwaves

The highest temperature of the summer was 35.8C (96.4F), recorded at Faversham, Kent on 1 July.

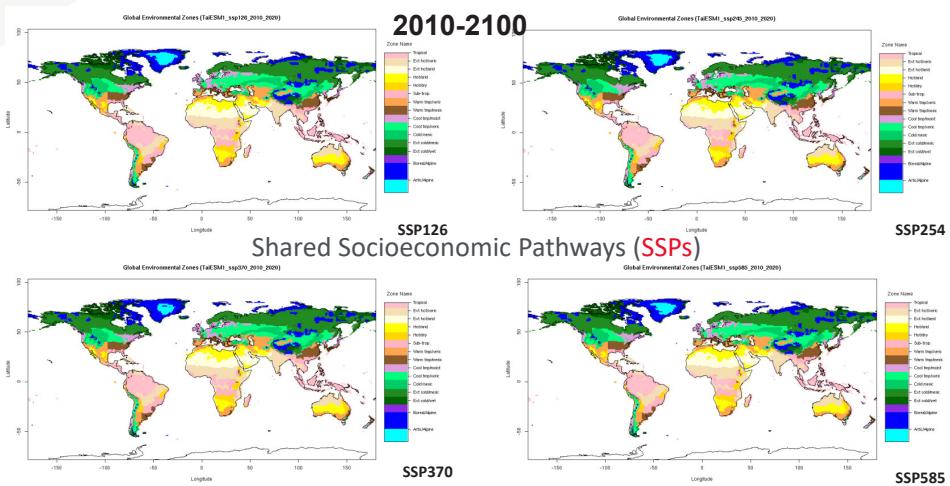
This may seem relatively modest compared with some of the exceptional highs of previous years, including the [record-breaking 40.3C \(104.5F\) recorded in July 2022](#).

<https://www.bbc.com/weather/articles/c1kz18d3wjro>



# 作物耕種與 溫室氣體排放趨勢

## 氣候變遷下全球環境分區之變動

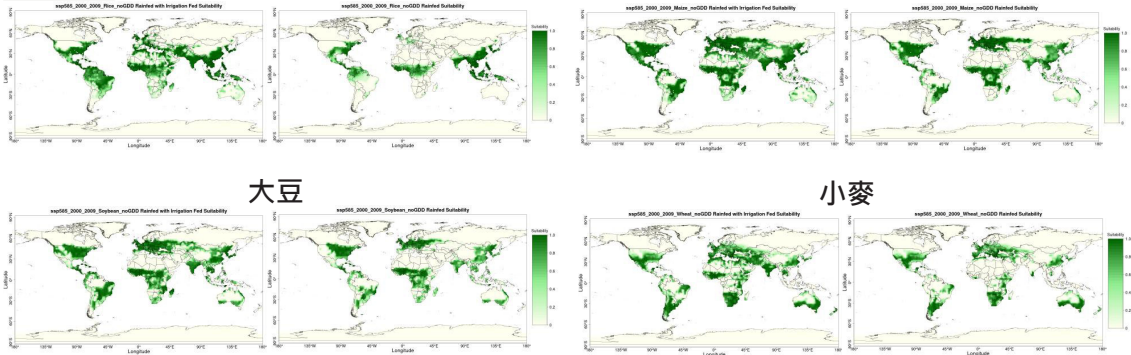


\*資料來源：Lin et al., 2025. Under review

# 氣候變遷改變全球作物適栽區

稻米

玉米



在 SSP5-RCP8.5 情境下，2000 至 2100 年間作物適栽性的變化

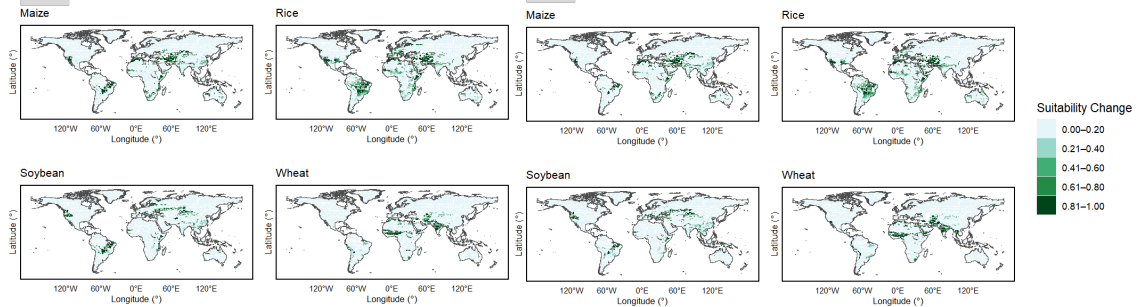
**作物適栽區逐漸向北移動，有利於北美與東歐等高緯度地區。**

\*資料來源：Lin et al., 2025. Under review

# 灌溉對作物適栽性之影響

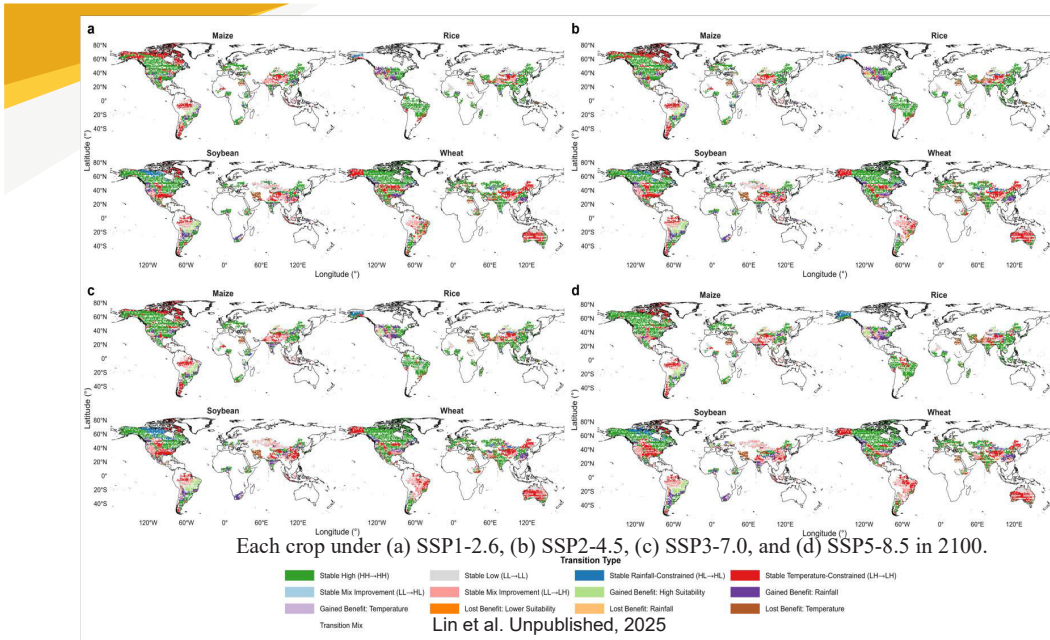
2020

2100

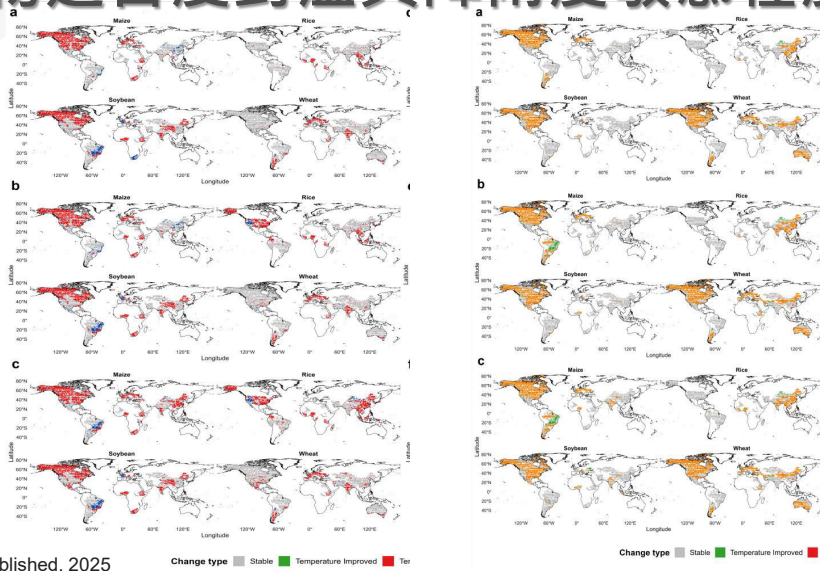


- 灌溉效益最顯著的地區：北印度、中國、美國中西部。
- 適栽性改善有限或呈現負向變化：中非、東南亞。
- 需呈現適栽性變化與產量反應之間的關聯。

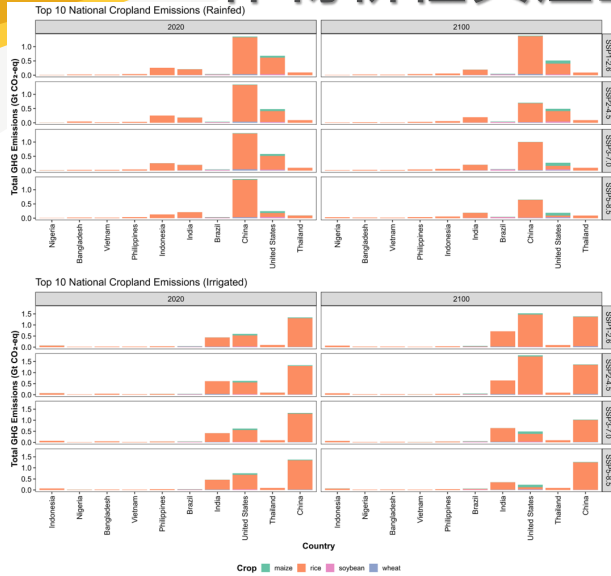
\*資料來源：Lin et al., 2025. Under review



## 作物適合度對溫與降雨度敏感程度



## 作物耕種與溫室氣體排放



- 兩養之排放量低於同時考慮兩養灌溉，主要原因是灌溉狀態下之適栽面積擴大。多數地區的主要排放來源皆來自稻作。
- 中國作為全球主要稻米生產國，在2020年的排放量最高，但由於未來氣候變遷使中國稻作適栽性下降，2100年排放量反而減少。
- 相反地，美國因未來稻作適栽區增加，2100年的排放量將顯著上升。同時可以看到，主要生產稻米的國家（如印度、印尼與泰國）在氣候變遷下仍展現高排放量。

\*資料來源：Lin et al., 2025. Unpublished



## 小結

- ▶ 氣候變遷情境下全球農業環境區域變動，影響作物適合耕作面積，影響各國或區域作物生產與供給，進而影響全球溫室氣體排放。
- ▶ 灌溉大幅提高作物可耕面積與產量（尤其在中國、印度、美國、巴西），顯示灌溉能顯著擴大農地利用潛力。灌溉在部分地區（如印度北部、中國、美國中西部）能提升適栽性與提高產量；但在非洲部分國家與東南亞，灌溉效益有限甚至負向，代表水資源可得性、氣溫壓力與生態條件是限制灌溉效益的主要因素，全球效益呈現「地域差異化」。灌溉系統主導全球農業溫室氣體排放，尤其稻米生產的 CH<sub>4</sub> 以及灌溉集約化生產（玉米、小麥、大豆）增加 N<sub>2</sub>O（氧化亞氮），因此全球主要排放區集中於中國、印度、印尼、越南與美國等稻作或集約化地區。

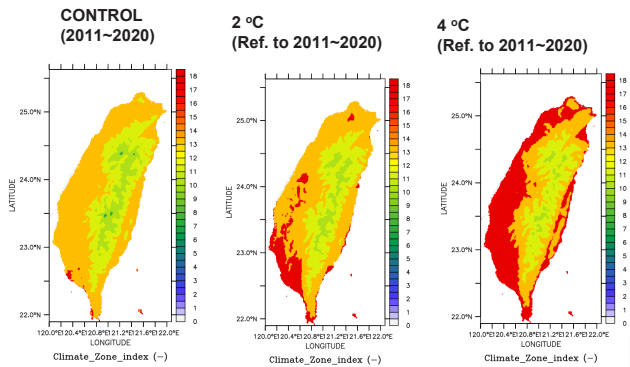
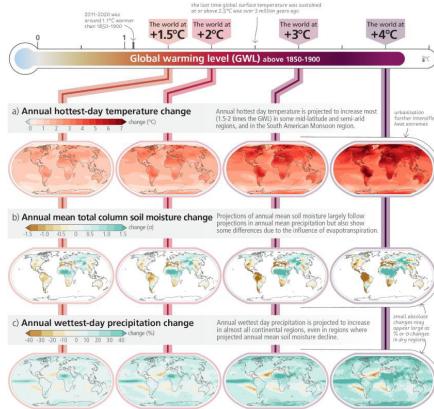


# 未來與展望

## 未來情境下全球與臺灣環境分區

Pseudo-Global Warming (PGW)

With every increment of global warming, regional changes in mean climate and extremes become more widespread and pronounced





## 未來氣候變遷下糧食生產與排放

- ▶ 氣候變遷使環境區改變，情境逐漸惡化，作物適栽區北移日益明顯，高溫乾旱區域之灌溉效益遞減。因此，未來不應僅靠灌溉擴張，而須導入精準灌溉以及更精準作栽培與育種，且須依區域條件進行差異化部署。
- ▶ 氣候變遷下溫度的變異，影響灌溉的潛力與限制，全球灌溉對於作物栽培也受影響，因灌溉受益國家或區域亦有很大的不同，宜對不同區域盡擬早定不同策略。
- ▶ 灌溉擴張易造成栽培面積增加。目前地區性減排方法陸續研發，未來宜擬定整合性方法的研發，並以 LCA 工具評估作物精準栽培與管理，同時提高產量並減少碳排放。藉由有效方法，可部分抵銷因灌溉與生產增加的溫室氣體排放，並提升農地韌性與淨零潛力。

# 感謝聆聽



國立臺灣大學  
National Taiwan University



國立臺灣大學生物資源暨農學院  
College of Bioresources and Agriculture, National Taiwan University