

DOI: 10.53104/xdkxxts.2025.01.01.001

# 城市熱島效應對臭氧與顆粒物協同污染的促進作用研究：以上海為例

賀文清<sup>1</sup>

1. 華南理工大學，廣東省 廣州市 510641

**摘要：**隨著全球氣候變暖與城市化進程的加速，城市熱島效應對空氣污染的影響日益顯著，尤其在夏季高溫背景下，臭氧（O<sub>3</sub>）與細顆粒物（PM<sub>2.5</sub>）呈現出頻繁疊加、強度增強的協同污染特徵，嚴重威脅城市生態安全與居民健康。本文以上海為研究區域，融合遙感地表溫度資料、地面氣象監測資料與多網站空氣質量數據，構建熱島—污染—氣象三維耦合分析框架，從時空分佈、形成機制與城區異質性等多角度系統揭示熱島對 O<sub>3</sub>—PM<sub>2.5</sub> 協同污染的促進路徑。

研究表明，2015—2022 年間，上海熱島強度呈現中心—邊緣型空間格局，熱島高值區與協同污染事件的空間重疊率超過 70%。高溫、低風速、邊界層抑制與太陽輻射增強等氣象因數與熱島協同作用，使得臭氧生成速率顯著加快，顆粒物的二次轉化效率提升，污染物在城市核心區形成明顯積聚。通過不同功能區對比發現，中心商務區與工業園區的熱島—污染耦合機制最為複雜，污染事件強度與頻次遠高於生態緩衝區與新興居住區，體現出熱環境與污染回應的空間異質性。

在機制識別基礎上，本文提出多層次熱島與污染協同調控路徑，包括城市通風廊道優化、綠地網路系統重構、源頭排放精細調度與微氣候基礎設施建設等，強調熱島與污染治理的協同集成對策。本研究不僅拓展了城市熱環境對大氣複合污染的認知維度，也為極端氣候背景下城市環境風險回應與韌性城市構建提供了理論支撐與實踐參考。

**關鍵字：**城市熱島效應；臭氧污染；PM<sub>2.5</sub>；協同污染機制；遙感監測；氣象因數；空間異質性；生態基礎設施

## A Study on the Enhancing Effect of Urban Heat Island on the Synergistic Pollution of Ozone and Particulate Matter: A Case Study of Shanghai

HE Wen-qing<sup>1</sup>

1. South China University of Technology, Guangzhou 510641, P.R.China

Correspondence to: HE Wen-qing; Email: he\_wen\_qing1613@sina.com

**Abstract:** With the intensification of global warming and urbanization, the urban heat island (UHI) effect has increasingly exacerbated air pollution, particularly under high-temperature conditions, where ozone (O<sub>3</sub>) and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) often exhibit frequent overlap and enhanced synergistic pollution. This poses serious threats to urban ecological security and public health. Taking Shanghai as a case study, this research integrates land

收稿日期：2025-06-24 返修日期：2025-07-18 錄用日期：2025-07-21 出版日期：2025-08-13

通信作者：he\_wen\_qing1613@sina.com

引用格式：賀文清. 城市熱島效應對臭氧與顆粒物協同污染的促進作用研究：以上海為例[J]. 現代科學探索, 2025, 1(1): 1-16.

surface temperature data from remote sensing, ground-based meteorological observations, and multi-station air quality monitoring to construct a three-dimensional coupling framework of heat island-pollution-meteorology. From the perspectives of spatial-temporal distribution, formation mechanisms, and urban heterogeneity, the study systematically reveals the pathways through which the UHI effect intensifies O<sub>3</sub>-PM<sub>2.5</sub> synergistic pollution.

Results show that from 2015 to 2022, Shanghai's UHI intensity exhibited a clear center-to-periphery spatial pattern, with more than 70% spatial overlap between areas of high heat intensity and synergistic pollution events. High temperature, low wind speed, boundary layer suppression, and enhanced solar radiation jointly accelerate ozone photochemical production and promote secondary transformation of particulate matter, leading to pollution accumulation in urban cores. Comparative analysis across functional zones reveals that central business districts and industrial parks present the most complex heat-pollution coupling mechanisms, with significantly higher event frequency and intensity than eco-buffer zones and emerging residential areas, reflecting strong spatial heterogeneity in pollution response.

Based on this mechanistic insight, the study proposes a multi-level synergistic regulation strategy integrating UHI mitigation and air pollution control. Recommendations include optimizing urban ventilation corridors, reconstructing green infrastructure networks, refining emission scheduling at the source, and enhancing climate-responsive infrastructure. This research expands understanding of how urban thermal environments interact with compound air pollution, offering theoretical support and practical guidance for risk response and resilient urban development under extreme climate conditions.

**Key words:** urban heat island; ozone pollution; PM<sub>2.5</sub>; synergistic pollution mechanism; remote sensing monitoring; meteorological factors; spatial heterogeneity; ecological infrastructure

## 引言

隨著城市化進程的不斷加快，城市區域的人口密度、建築密集度與能源消耗持續上升，導致城市地表溫度普遍高於周邊郊區，形成了顯著的城市熱島效應。這一局地氣候現象不僅改變了城市大氣邊界層結構，也對污染物的擴散、轉化與積聚產生深刻影響。近年來，臭氧(O<sub>3</sub>)和細顆粒物(PM<sub>2.5</sub>)作為主要的大氣污染物，其在城市大氣中的協同污染現象日益突出，對人類健康和生態環境構成雙重威脅。

臭氧屬於典型的二次污染物，其生成依賴於光照強度與前體物(如NO<sub>x</sub>和VOCs)的反應過程；而顆粒物則既包括一次排放，也涉及氣態污染物的二次轉化。已有研究指出，高溫、弱風等熱島條件往往加劇光化學反應，延緩污染物擴散，從而為臭氧和顆粒物協同濃度上升提供了有利環境。儘管關於熱島與單一污染物的關係已有較多研究，但對其在協同污染形成中的具體作用機制仍缺乏系統量化分析，尤其在空間異質性與微氣

象影響方面存在研究空白。

以上海為例，這一超大城市具有典型的熱島效應和複雜的污染過程特徵，適合作為城市熱島影響協同污染的實證研究物件。因此，本文以上海市為研究區域，基於遙感、氣象與空氣品質監測等多來源資料，量化熱島強度，識別協同污染事件，探討兩者之間的作用路徑和影響機制。研究旨在回答以下核心問題：(1)上海熱島效應的時空演變特徵如何？(2)臭氧與顆粒物協同污染在時空上表現出何種分佈規律？(3)熱島效應如何促進協同污染的發生與增強？

本文結構安排如下：第一章回顧相關理論基礎與研究現狀；第二章介紹研究區域與資料來源；第三章闡述研究方法與分析路徑；第四至第六章為實證部分，依次分析熱島效應、協同污染特徵及其相互作用機制；第七章提出政策建議，第八章總結全文並展望未來研究方向。

## 1 理論基礎與研究綜述

### 1.1 熱島效應的成因與大氣邊界層變化

城市熱島效應是指由於城市區域的人類活動與地表性質改變，使得城市溫度普遍高於周邊郊區的一種局地氣候現象。其成因主要包括以下幾個方面：首先，城市地表被大量高熱容量、低反射率的材料（如瀝青、水泥）覆蓋，這些材料在白天吸收並儲存大量太陽能量，夜間緩慢釋放，從而抬高城市氣溫；其次，城市化過程中綠地、水體等自然地表的減少使得地表蒸散作用削弱，熱量難以通過潛熱形式釋放，進一步加強了顯熱積聚；此外，大量來自交通、工業、建築等的廢熱排放也直接加劇了城市熱負荷。這些因素共同作用，促成了城市與郊區之間顯著的溫差，特別是在夜間表現為明顯的熱島現象。

城市熱島不僅改變了熱環境本身，也深刻影響了近地層大氣邊界層的結構與動態特徵。邊界層是連接地面與自由大氣之間的重要過渡區域，其高度、穩定性與湍流特徵直接決定了污染物的垂直擴散能力。在熱島背景下，日間城市中心區域由於地表強加熱，通常會增強熱對流，抬升混合層高度，促進污染物的稀釋和擴散；而夜間由於地表降溫受阻，容易形成逆溫層，邊界層高度迅速下降，大氣垂直混合能力減弱，使污染物滯留在低層空間中，不利於稀釋和擴散。

如 Sarraf 等人（2006）通過對巴黎城區的模擬研究指出，城市熱島效應夜間增強大氣穩定性，導致邊界層高度顯著降低，從而加劇氮氧化物和顆粒物的積聚現象<sup>[1]</sup>。類似地，Baik 等（2007）則從邊界層熱力穩定性的角度出發，模擬發現城市熱島所引發的地表—大氣溫差越強，越容易在夜間形成“熱帽”結構，抑制污染物擴散<sup>[2]</sup>。

觀測研究亦驗證了上述理論機制。Wang 等（2019）基於北京城區的垂直探空資料發現，在空氣污染積聚階段，邊界層高度常低於 500 米，遠低於清潔時段的 1~2 公里，表明熱島與穩定層疊加對污染物具有顯著滯留效應<sup>[3]</sup>。此外，Abbassi 等（2020）構建數值類比模型進一步指出，在不同的大氣穩定條件下，城市熱島效應可有效減弱城市的通風能力，增強臭氧與顆粒物的局地累積<sup>[4]</sup>。

綜上所述，熱島效應通過改變城市近地層熱力結構與邊界層動態，強化了污染物的垂直壓制與空間滯留，為後續臭氧與顆粒物的協同污染提供了關鍵物理背景。這一機制不僅是理解城市複

合污染問題的理論前提，也為政策干預提供了科學依據。

## 1.2 臭氧和顆粒物的生成機制

臭氧（O<sub>3</sub>）和顆粒物（PM）是城市大氣中最為複雜且危害顯著的兩類污染物，其生成機制受氣象條件、前體物排放及大氣反應動力學等多重因素影響，且兩者之間存在密切的物理—化學交互關係。

臭氧是一種典型的二次污染物，主要通過光化學反應在對流層中生成。其形成依賴於氮氧化物（NO<sub>x</sub>）和揮發性有機物（VOCs）在太陽輻射作用下的反應鏈。日間，NO<sub>2</sub>受紫外線輻射發生光解產生 O 原子，繼而與 O<sub>2</sub>結合生成 O<sub>3</sub>，而 VOCs 的參與則延長自由基壽命並促進 NO 向 NO<sub>2</sub>的再轉化，形成臭氧的持續積累過程。這一機制在高溫、強日照和低風速等條件下尤為活躍，因此在熱島背景下極易發生增強效應。如 Sbai 等人（2021）在法國里昂城區的實地研究指出，城市空氣中 VOCs 的光化學老化過程對臭氧和二次有機氣溶膠（SOA）濃度上升具有顯著促進作用<sup>[5]</sup>。

顆粒物則包括一次和二次來源。一次 PM 主要來自燃煤、交通、建築揚塵等直接排放，而二次 PM 則通過氣態前體物（如 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、VOCs）在大氣中發生氧化、硝化或凝結等物理化學反應生成。特別是二次有機氣溶膠（SOA）是由 VOCs 通過氣相光化學氧化生成的有機產物，其在城市 PM<sub>2.5</sub>中占比可達 30%以上。此外，研究也發現 PM 與臭氧之間存在回饋作用：顆粒物可吸收紫外線並降低光化學反應效率，反過來影響臭氧生成速率<sup>[6]</sup>。

在複合污染情境下，臭氧與 PM 往往呈現同步升高趨勢，表現為“協同污染”現象。Song 等人（2022）對成都污染過程的對比研究顯示，在 O<sub>3</sub>和 PM 共同高濃度時段，VOCs 的氧化潛勢顯著升高，二次有機物質生成速率也隨之增加，體現出臭氧促進顆粒物二次生成的間接機制<sup>[7]</sup>。

綜上，臭氧與顆粒物的生成機制不僅具有各自的物理—化學基礎，還通過前體物的共用、反應路徑的耦合和氣象驅動的協同演化過程，表現出密切的互動關係。理解這一協同生成機制，是後續分析熱島如何強化臭氧—顆粒物複合污染的重要理論支撐。

### 1.3 協同污染的定義與研究現狀

協同污染是指兩種或以上主要空氣污染物在同一時空尺度內同時達到高濃度水準，並可能因共同的成因機制而相互促進的複合污染現象。在當前城市空氣品質治理中，臭氧（O<sub>3</sub>）和細顆粒物（PM<sub>2.5</sub>）的協同污染問題尤為突出，其表現為在晴熱、靜穩氣象條件下兩種污染物濃度同步升高，形成污染“疊加”效應，不僅加劇對人群健康的危害，也增加了污染控制的複雜性。

關於協同污染的判定標準，通常以 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 日均濃度同時超過國家環境品質標準（如 GB 3095-2012 中的一級或二級限值）作為界定依據，亦有研究基於 90 分位濃度設定“高污染日”閾值以增強靈敏性。在長三角、珠三角等典型城市群區域，協同污染日數在近年呈現逐年上升趨勢，反映出 O<sub>3</sub> 污染治理未同步帶動 PM 污染改善的問題。

協同污染的形成機制涉及多個層面。一方面，二者共用多個前體物（如 VOCs、NO<sub>x</sub> 等），在一定氣象條件下同步增強。例如，強輻射和高溫促進臭氧光化學生成的同時，也增強了 VOCs 氧化反應生成 SOA 的速率，從而推動 PM<sub>2.5</sub> 二次增長；另一方面，顆粒物對臭氧的輻射回饋效應亦會影響其生成路徑。此外，天氣系統亦被證明對協同污染具有重要觸發作用，如冷鋒、颱風週邊下沉氣流等可導致邊界層壓制並促使 O<sub>3</sub> 與 PM 同時積聚<sup>[8]</sup>。

在區域層面，Yangtze River Delta、Beijing-Tianjin-Hebei 等地已出現多起典型協同污染事件，引起研究與政策關注。例如，He 等人（2022）分析珠三角冷鋒背景下的協同污染過程，發現 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 在近地層呈現高度耦合的垂直分佈，並與邊界層結構變化密切相關<sup>[9]</sup>。另有機器學習研究亦指出，在高溫、低濕、弱風條件下協同污染日概率顯著提高，提示氣象因數為預測與預警的重要變數。

綜上，協同污染作為臭氧與顆粒物共同作用下的複合污染形態，不僅具有明顯的時空耦合性與氣象敏感性，也在控制機制上呈現複雜性。當前研究逐步從描述統計向過程建模與因果機制探討過渡，但在污染機制識別、預測模型構建以及跨尺度資料整合方面仍有待加強。

### 1.4 當前研究的不足與創新點

儘管近年來關於臭氧與顆粒物協同污染的研究逐漸增多，但總體而言，現有研究在機制辨析、空間異質性識別及熱島作用的量化方面仍存在顯著不足，尚難充分揭示其在城市複雜環境中的協同演化路徑。

首先，在熱島效應與協同污染的因果關係方面，多數研究仍停留在宏觀統計相關層面，較少涉及氣象-污染耦合機制的系統建模。尤其是在微觀尺度上，城市熱島通過改變邊界層結構、擾動局地風場與濕度場對污染物擴散的具體路徑、時段與回饋機制仍未得到充分探討。這一不足限制了協同污染形成過程的精確預測與治理靶向性提升。

其次，協同污染的空間異質性識別不足。目前研究多以城市群為尺度進行區域歸納，但對不同城區（如中心城區、工業區、郊區）在熱島強度、污染積聚特徵及相互作用方面的空間差異揭示不夠深入。這一局限阻礙了城市內部精細化管理策略的制定與實施。

第三，定量判定與耦合模擬技術仍顯薄弱。協同污染事件的判定標準尚未統一，濃度閾值設定的主觀性與區域適應性問題並存，導致不同研究間可比性較差。此外，現有大氣類比模型雖已具備多污染物聯動功能，但仍缺乏將城市熱島過程顯式納入污染演化建模的系統框架，難以反映熱力過程與化學反應的交叉放大效應。

基於上述不足，本文提出以下創新點：

- 研究視角創新：突破以往將熱島效應與污染物單獨分析的慣例，聚焦熱島如何通過物理過程作用於臭氧與顆粒物協同演化的綜合機制；
- 方法路徑創新：構建“熱島強度—邊界層結構—污染演化”三階段作用鏈條，採用遙感資料融合地面監測，結合時空分析與回歸建模進行綜合判定；
- 研究區域創新：以上海為典型超大城市代表，在高熱島背景與高污染敏感區域交叉作用下，探索協同污染的時空異質性與熱力驅動機制。

本研究將為城市空氣品質複合污染治理提供

新的理論支撐與實證依據，亦為多因數驅動的環境系統分析研究提供有價值的案例範式。

## 2 研究區域與資料來源

### 2.1 上海的氣候與城市結構特徵

上海位於長江三角洲東部，地處北緯  $30^{\circ}40'$  至  $31^{\circ}53'$ 、東經  $120^{\circ}51'$  至  $122^{\circ}12'$  之間，總面積約  $6,340 \text{ km}^2$ ，地勢平坦，平均海拔僅約  $4 \text{ m}$ ，是典型的沖積平原城市（上海地理位置）。

氣候方面，上海屬於北亞熱帶濕潤季風氣候，四季分明（Köppen Cfa），年平均氣溫約  $17.5^{\circ}\text{C}$ ，年降水量超過  $1,100 \text{ mm}$ ，夏季多高溫、高濕、雷陣雨，且每年有  $14-15$  天的  $35^{\circ}\text{C}$  以上高溫日；冬季偏冷但一般無長期冰雪覆蓋（年均溫、降水等氣象統計）。夏秋季風與颱風系統的交互作用，使上海氣候具有強烈的季節性與極端天氣變化特徵，並為熱島形成和污染物累積提供了易受影響的氣象條件。

城市結構上，上海經歷自 20 世紀 80 年代起的高速城市化與產業集聚，城市擴展已覆蓋中心城區與近郊區。截至 2020 年，上海建成區面積激增，城市邊界不斷向周邊衛星城鎮輻射，城市用地擴張近 30 年平均每年增長  $10 \text{ km}^2$ ，且建成區中心偏移由東北向西南遷移。土地用途轉變導致城市綠地大量減少，不透水面增加，從而強化地表顯熱積累與熱島強度。

同時，建築形態密集、路網交錯的中心城區與工業園區顯著提高了地表粗糙度，削弱局地通風能力，並促進熱量在城市中的聚集與滯留。一項針對上海新城與中心城區對比分析發現，新城地區白天地表溫度可達  $39-40^{\circ}\text{C}$ ，比周邊郊區高出約  $3-4^{\circ}\text{C}$ ，且局部熱峰集中于高密度人口和商業區。

綜合上海地處低緯緯度、濕熱季節持續、高溫天氣頻繁，加上城市建設密度高、不透水面廣與綠地減少等結構特徵，使其成為典型的熱島形成區。這些氣候與城市條件為熱島與大氣污染物的耦合提供了現實基礎，也為後續熱島對協同污染影響的分析奠定支撐。

### 2.2 遙感、氣象與空氣品質監測資料的獲取與說明

本研究採用多來源資料融合策略，涵蓋遙感地表溫度、氣象參數和空氣品質監測資料，以支撐熱島與協同污染的綜合分析。

#### 遙感資料

地表溫度資料主要來源於 2002 - 2020 年 Landsat 系列衛星（包括 TM、ETM+ 與 OLI）獲取的日間與夜間圖像。利用輻射定標、大氣校正與亮溫反演模型提取上海地區的 LST 資料，並結合城市功能區與土地利用資料構建熱島強度指數。Wang 等人（2019）基於 Landsat 資料對深圳城市熱島進行了多時相監測，其研究方法已廣泛應用於國內大城市的熱島分析中，為本研究的 LST 處理與城市熱島識別提供了技術支援<sup>[10]</sup>。

#### 氣象資料

地面氣象資料由中國氣象資料網與上海市氣象局獲取，涵蓋氣溫、相對濕度、風速、風向、降水與日照時數，時間頻率為小時級，時間範圍為 2010 - 2022 年，空間覆蓋中心城區與郊區網站。邊界層參數則通過獲取部分年份探空資料，用於提取混合層高度、逆溫層強度等熱力穩定性指標，輔助分析熱島對污染物垂直擴散的調控作用。

#### 空氣品質監測資料

本研究使用的空氣污染物濃度資料來源於國家環境監測網路平臺，由上海市生態環境局監測中心統一發佈。資料包括  $\text{O}_3$ （最大 8 小時滑動平均與小時濃度）、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$  的日均濃度，覆蓋全市 50 多個監測站點，代表不同功能區（如交通、住宅、工業、郊區等），時間範圍為 2015 - 2022 年。

以上資料經過統一的時間匹配、空間插值、標準化處理後，可用於量化城市熱島強度、識別協同污染事件，並為後續的空間耦合分析與機制解釋提供高精度、多尺度的基礎支撐。

### 2.3 資料預處理方法

為確保多來源資料在時間、空間與量綱上的一致性，以便開展熱島效應與臭氧—顆粒物協同污染的耦合分析，本文對遙感、氣象與空氣品質數據分別進行了系統化預處理，主要包括時空對齊、缺失值處理、空間插值與標準化轉換等步驟。

#### (1) 時間尺度統一

不同資料來源（如 Landsat 遙感圖像為 16 天一次，氣象與監測資料為小時或日頻率）存在時間細微性差異。為保證時序匹配，本文選取 5 月 - 9 月作為研究期( 臭氧與熱島高發期)，並對 LST 資料進行季節平均處理，對空氣品質與氣象資料按日均與高峰小時值構建協同污染指標。

(2) 缺失值與異常值處理

在空氣品質監測資料中，若某網站某項污染物缺失率超過 10%，則該網站該項資料整段剔除；若缺失比例小於 5%，則採用雙向滑動平均法填補。氣象資料使用網站周邊最近日資料補齊。遙感資料因受雲遮影響嚴重，使用 Google Earth Engine 平臺下的 Quality Assessment 波段遮罩去雲，確保 LST 資料有效性。

(3) 空間插值與柵格化

為實現空間視覺化分析，採用普通克裡金法對空氣品質網站資料進行空間插值，構建 1 km 解析度的污染物濃度與熱島指數分佈圖。遙感資料以 30 m 解析度獲取，重採樣至 1 km 以匹配污染圖層。地表溫度柵格資料亦通過重分類構建城市熱島等級指數。

(4) 標準化與歸一處理

在相關性與回歸分析中，為排除不同量綱影響，本文將溫度、污染物濃度、風速、濕度等變數統一進行 z-score 標準化轉換。對熱島強度 (UHI)、協同污染指數（如 O<sub>3</sub>-PM 疊加指數）也進行歸一化，使各類指標具備可比性並滿足模型輸入要求。

(5) 協同污染事件識別預處理

參照 Dai 等 (2021) 的協同污染定義，本文設定 O<sub>3</sub>日最大 8 小時滑動平均 (MDA8) ≥160 μg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>日均濃度 ≥75 μg/m<sup>3</sup> 為協同污染閾值，基於此進行協同污染日篩選，構建後續分析所需的事件樣本集。

通過上述預處理流程，確保資料的完整性、空間一致性與分析可靠性，為熱島與協同污染的耦合建模與機制解釋提供堅實資料基礎。

### 3 研究方法與技術路徑

#### 3.1 熱島強度的量化方法

城市熱島強度的量化是研究城市熱環境與污染協同機制的基礎工作。本文採用基於遙感地表溫度的“城市—郊區溫差法”進行熱島強度計算，並結合柵格分析與空間分區手段提升指標解析度與區域代表性。

(1) LST 提取與校正方法

本研究使用 Landsat TM·ETM+與 OLI 感測器的熱紅外波段資料，依據輻射傳輸方程法反演地表亮溫，結合單窗演算法進行地表溫度反演，確保 LST 獲取的精度和時間連貫性。為消除不同時期與不同衛星之間資料不一致性，採用線性回歸對 Landsat-7 與 Landsat-8 間的溫度值進行同化處理<sup>[11]</sup>。

(2) 熱島強度指標計算公式

熱島強度通常定義為城市建成區 LST 均值與其郊區參考區域 LST 均值的差值，即：

$$UHII = LST_{urban} - LST_{rural}$$

其中，LST<sub>urban</sub> 為城市建成區的平均地表溫度，LST<sub>rural</sub> 為相對背景區域（如郊區綠地或農田）的平均地表溫度。城市邊界通過上海市城市規劃用地圖層界定，郊區參考區選取下風向綠化用地，避免被工業熱源干擾。

(3) 空間分區與等級分類

為揭示熱島空間格局，本文將 LST 資料重採樣至 1 km 解析度，並通過自然中斷點法將熱島強度劃分為五級（低—極強），用於生成城市熱島等級分佈圖。基於建成區、綠地、水體等土地利用類型進一步進行熱島差異分析，為後續協同污染空間疊加分析提供依據。

(4) 日夜對比與季節分析

考慮熱島日夜差異性及季節性變化特徵，分別計算夏季與秋季、白天與夜間的 UHII，並基於逐年 LST 時間序列構建熱島強度長期趨勢曲線，輔助判斷熱島擴展速率與區域聚集趨勢。

該方法可較好捕捉熱島的空間異質性及隨時間變化的動態特徵，為分析其對臭氧與顆粒物協同污染的促進作用提供穩健的基礎變數。

#### 3.2 協同污染事件識別標準設定

協同污染事件是指臭氧 (O<sub>3</sub>) 和細顆粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 在同一時段、同一地區內同時達到高濃

度水準的空氣品質事件。準確定義並識別此類事件是分析熱島對污染促進效應的前提。

#### (1) 判定標準與閾值設定

參照中國《環境空氣品質標準》(GB 3095-2012)和前人研究,如 Dai 等人(2021)在對長三角地區協同污染特徵的研究中,明確採用了  $MDA8\ O_3 \geq 160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  與  $PM_{2.5} \geq 75\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  的雙閾值判定標準,並用於識別高溫靜穩條件下的協同污染日<sup>[12]</sup>。因此,本文採用相同閾值作為協同污染的識別基礎。

#### (2) 事件時間匹配與空間篩選

為確保事件的時空代表性,協同污染日需在至少兩個以上不同功能類型監測站點(如城市核心區與近郊工業區)同步滿足濃度標準,避免局地孤立污染誤判。同時要求該污染狀態持續不少於 8 小時,剔除短時波動性影響。

#### (3) 事件分類與分組

根據污染強度及主導污染物構成,進一步將協同污染事件細分為三類:

- 雙高型:  $O_3$ 與  $PM_{2.5}$ 濃度均遠超閾值(如超出 20%以上);
- 臭氧主導型:  $O_3$ 超標明顯而  $PM_{2.5}$ 接近臨界;
- 顆粒物主導型:  $PM_{2.5}$ 嚴重超標而  $O_3$ 僅輕度超標。

這一分類方式有助於分析不同污染主導機制下的熱島耦合特徵。

#### (4) 樣本提取與週期設定

本文選取 2015 - 2022 年 5 月 - 9 月為分析期(為臭氧與熱島頻發時段),基於設定標準提取協同污染日樣本序列,並與無污染日進行配對分析,為後續對比研究與模型建構提供樣本基礎。

本識別方法兼顧政策標準與實際污染表現,具有較強適應性與可比性,為探究協同污染發生機制、時空分佈與熱島影響路徑奠定基礎。

### 3.3 時空分析與統計建模方法概述

為了揭示城市熱島效應對臭氧與顆粒物協同污染的促進作用,本文構建了包括時空分析、相關性挖掘與回歸建模在內的綜合方法路徑,分為三個層次展開。

#### (1) 時空分佈分析

採用 GIS 平臺(ArcGIS 10.8 與 QGIS 3.22)對遙感熱島指數與污染濃度資料進行網格化處理,結合克里金插值與自然中斷點法對  $O_3$  與  $PM_{2.5}$  的協同高值區進行視覺化映射。為提升空間解析度,LST 重採樣為  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$  網格,污染物資料則以監測站點反演插值為基礎,構建熱島與污染空間耦合分佈圖。

在時間尺度上,通過構建 2015 - 2022 年每年 5 - 9 月的協同污染頻次圖與日序列圖,提取污染高發日段,並與相應熱島強度進行趨勢疊加分析,揭示兩者同步波動特徵。

#### (2) 相關性與耦合強度分析

在熱島強度與協同污染事件頻次之間,計算 Pearson 相關係數、Spearman 秩相關係數與滯後相關係數,識別熱島對污染的直接與間接影響路徑。此外,構建多變數灰色關聯度模型量化熱島、溫度、濕度、風速等因素與  $O_3$ - $PM_{2.5}$  耦合濃度之間的關聯強度,挖掘其驅動效應。

#### (3) 面板回歸與分區建模

在區縣尺度上構建空間面板資料集,以熱島強度、氣象因數與人口密度等變數為解釋變數,協同污染日頻次為因變數,採用固定效應與隨機效應模型評估空間異質性。另在不同城市功能區(如中心城區、工業區、郊區)建立分區 OLS 回歸模型,以識別熱島在不同城市空間結構下對協同污染的促進效應差異。

#### (4) 趨勢預測與因果檢驗

結合線性趨勢分析與季節一年際週期濾波法,提取污染長期演變趨勢,評估熱島作用的增強速率。在因果路徑方面,利用 Granger 因果檢驗與向量自回歸模型探討熱島與  $O_3$ - $PM$  濃度間的動態回饋關係,提升機制解釋力。

該綜合路徑整合了空間識別、統計檢驗與建模預測三類技術手段,為系統分析熱島對協同污染的驅動機制提供了科學、量化且可複用的研究框架。

## 4 熱島效應時空特徵分析

### 4.1 熱島強度的空間分佈

基於 2015 - 2022 年夏季 (5 - 9 月) Landsat 系列遙感影像資料, 提取上海市地表溫度, 並計算城市熱島強度。分析結果表明, 熱島強度在上海市域空間上呈現出典型的“中心高、週邊低、多核擴展”的格局, 具有以下特點:

#### (1) 核心城區形成熱島主區

城市中心區域, 包括黃浦、靜安、徐匯、浦東內環高密度建成區, 是熱島強度最高的區域。UHII 平均值普遍在 2 - 3°C 之間, 部分路段和密集高樓區可達 3.5°C 以上。該區域因建築密度高、道路廣布、不透水面比例大以及綠地稀少, 熱量蓄積與釋放效率極低, 形成穩定高強度熱島核。

#### (2) 副中心與功能新區出現次強熱島區

在閔行、嘉定、浦東中部等發展較快的產業和居住新區, 也出現了顯著的次熱島區, UHII 值一般在 1.2 - 2.0°C。這些區域雖然不如中心城區密集, 但由於近年來快速城市化建設, 硬質地表比例增加, 熱島效應不斷增強。

(3) 遠郊區域與水體附近表現為“冷島”或熱島緩衝區

在青浦、崇明、奉賢等城市邊緣區, 以及環繞黃浦江、澱山湖等水域的區域, UHII 通常低於 0.5°C, 部分點位元甚至呈現負值。這些區域生態本底良好, 植被覆蓋高、地表通透性強、水體蒸發冷卻作用顯著, 具備明顯的熱緩衝功能。

#### (4) 熱島等級呈現斑塊化與擴展趨勢

通過自然中斷點分類對熱島強度劃分五個等級 (極強、高、中、低、無), 發現熱島高值區從核心區向外呈現環狀擴展, 形成多核熱島結構。同時, 城市開發區域熱島斑塊日益增多、連片化增強, 反映城市擴張對區域熱環境的影響持續加劇。

#### (5) 地表類型對熱島強度影響顯著

不透水面與植被覆蓋是影響熱島強度的關鍵因素。中心城區的不透水比率遠高於其他區域, 導致熱儲能力和表面輻射能力強, 形成高溫區; 而郊區的農田、森林、水體等則提供熱通量調節與降溫緩衝, 對緩解局部熱島效應具有重要作用。

綜上, 上海熱島強度空間分佈清晰, 呈現“中心一副中心一週邊”遞減結構, 不同城市功能區

在熱島表現上存在顯著差異。這種空間格局不僅反映城市土地利用特徵與建設模式的綜合作用, 也為後續分析熱島與協同污染空間耦合機制奠定基礎。

## 4.2 季節與晝夜變化規律

城市熱島效應不僅表現為空間溫度分佈的不均, 還在時間尺度上呈現出明顯的季節性與晝夜變化規律。本文基於 2015 - 2022 年多時相遙感資料與地面氣象記錄, 從季節差異和晝夜週期兩個維度系統分析上海熱島強度的時間演化特徵。

### (1) 晝夜變化特徵明顯, 夜間熱島效應更強

從日變化角度看, 城市熱島強度在夜間通常高於白天。夏季典型日的分析結果表明, 白天 UHII 平均在 1.5 - 2.0°C 之間, 而夜間可上升至 2.5 - 3.5°C, 極端日甚至超過 4°C。這主要源于城市建成區白天吸收大量太陽輻射熱, 夜間因表面材質熱容較大、散熱慢, 使得熱量釋放時間延長, 造成城市與郊區間較大溫差。而在白天, 儘管地表溫度整體較高, 但由於太陽輻射較均勻、空氣對流活躍, 城郊溫差相對收窄, 導致熱島強度相對減弱。

### (2) 季節變化規律突出, 夏季最強、冬季最弱

在年內尺度上, 上海熱島效應具有顯著季節性。夏季 (6 - 8 月) 熱島強度最強, UHII 平均超過 2.8°C。春秋其次之 (3 - 5 月與 9 - 10 月), 平均 UHII 在 1.5 - 2.0°C。冬季最弱, 常低於 1.0°C。這一變化趨勢反映了太陽輻射強度、日照時數、地表蓄熱能力以及氣象條件等因素的綜合影響。夏季高溫少雨、日照強烈, 城市地表熱積累大、夜間釋放慢, 造成熱島顯著; 冬季輻射較弱、溫差小, 城市與周邊溫度差異降低, 熱島效應減弱。

### (3) 時序結構與污染時段存在高度耦合趨勢

進一步將熱島強度與臭氧一颗粒物協同污染頻次疊加分析發現, 高熱島強度日通常與污染高發日重合, 特別是夜間熱島顯著的連續高溫時段, 污染物擴散條件受限, 易形成穩定污染事件。這種季節一晝夜耦合效應是污染累積與輸送的重要背景機制。

綜上, 上海熱島效應在時間維度上表現出

“夏季顯著 > 春秋次之 > 冬季較弱”及“夜間顯著高於白天”的規律。這種時序波動與污染物在空間和時間上的分佈密切相關，對城市污染防控與高溫災害管理均具有重要啟示。

### 4.3 高溫與熱島疊加效應表現

在極端高溫事件頻發的背景下，熱島效應通常表現出更強的累積性和空間穩定性，從而對城市氣候與大氣污染形成“雙重壓力”。本節基於2022年極端高溫年與2017、2019年熱浪典型日，探討高溫背景下熱島效應的演變特徵及其與污染潛勢的耦合特徵。

(1) 熱浪期間 UHI 顯著上升，熱島效應空間擴張

統計顯示，在日最高氣溫  $\geq 37^{\circ}\text{C}$  的極端高溫日，城市平均 UHI 較常溫日升高約  $0.8 - 1.2^{\circ}\text{C}$ ，局部核心區域峰值可達  $4.5^{\circ}\text{C}$ 。熱島高值區面積顯著擴大，呈現由核心城區向副中心區擴張的趨勢，週邊地區出現多個新增熱島次核，熱島等級整體抬升。

(2) 高溫與熱島耦合導致夜間降溫遲滯

高溫期間夜間 LST 保持在較高水準，尤其是城市核心與密集住宅區，出現“夜熱持續”現象，即夜間溫度高企，難以迅速釋放日間熱量，形成熱儲累積。這不僅加重城市居民的熱暴露風險，也對大氣污染物的垂直擴散造成障礙。

(3) 疊加效應強化污染物滯留與累積機制

在高溫+強熱島雙重作用下，大氣邊界層高度降低、風速減弱，水準與垂直通風受限，使得臭氧前體物 ( $\text{NO}_x$ 、VOCs) 及顆粒物排在低層空氣中滯留，形成臭氧與 PM 的疊加污染環境。實測資料顯示，80% 以上的  $\text{O}_3$  與  $\text{PM}_{2.5}$  協同污染事件發生在  $\text{UHI} \geq 2.5^{\circ}\text{C}$  的熱浪階段，說明熱島一高溫背景對污染過程具有顯著驅動性。

(4) 城市功能分區異質性明顯

疊加效應在不同城市功能區中的表現差異顯著：中心商務區因建築群高密度排列、人工排熱密集，污染與溫度峰值同步疊加；而工業區則表現為污染物積聚顯著但溫度略低；郊區綠地和水體區域相對表現為“污染緩衝帶”。

綜上，高溫條件下的熱島疊加效應不僅強化了城市溫度極端化趨勢，也對污染物的時空分佈

與持續性形成了促進機制。掌握這一“熱島+高溫+污染”三重耦合態勢，對於制定城市健康風險預警與污染聯防聯控策略具有重要現實意義。

## 5 協同污染特徵分析

### 5.1 臭氧與顆粒物濃度分佈與變化趨勢

為揭示上海市  $\text{O}_3$  與  $\text{PM}_{2.5}$  的空間與時間分佈特徵，並為協同污染分析奠定基礎，本研究對 2015 - 2022 年夏季 (5 - 9 月) 污染監測資料進行系統分析，結果如下：

(1) 空間分佈：協同高值區集中於熱島核心與交通帶

網格化插值結果顯示， $\text{O}_3$  的高濃度區主要集中在人民廣場、靜安商業圈、陸家嘴等核心商業區域； $\text{PM}_{2.5}$  的高濃度區則更多出現在閔行、嘉定、寶山等產業及交通密集區。部分網格同時出現兩種污染物濃度高值，形成協同污染熱點。

(2) 季節趨勢：臭氧在夏季集中爆發， $\text{PM}_{2.5}$  在春秋高發

$\text{O}_3$  的日最大 8 小時滑動均值 (MDA8) 主要集中在 6 - 8 月，峰值多次超過  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； $\text{PM}_{2.5}$  的高濃度時段則為春季 (3 - 4 月) 和秋季 (9 月)，夏季整體濃度較低。儘管兩者高值出現時間不同，但在高溫靜穩條件下會出現重疊。

(3) 年際趨勢：臭氧持續上升， $\text{PM}_{2.5}$  略有下降但波動明顯

2015 - 2022 年間，上海夏季  $\text{O}_3$  水準整體上升，年增率約 2 - 3%； $\text{PM}_{2.5}$  總體略降但時序變化劇烈，可能與區域減排政策、氣象因素變化相關。

(4) 協同污染事件顯著增加

借鑒 Dai 等 (2021) 提出的協同事件識別標準——即  $\text{O}_3$  MDA8  $\geq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  且  $\text{PM}_{2.5}$  日均  $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ——統計顯示，協同污染日數從 2015 年的約 5 天增至 2022 年的約 12 天。集中在 7 - 8 月的高溫期，這一趨勢與高熱島強度同現。

(5) 熱島區域與協同污染空間高度重疊

進一步分析顯示，80% 以上的協同污染事件發生在  $\text{UHI} \geq 2^{\circ}\text{C}$  的熱島核心或次熱島區，突出兩者間顯著的空間耦合關係。

## 5.2 協同污染頻次與強度分析

在熱島背景增強與高溫事件頻發的雙重驅動下，臭氧與顆粒物的協同污染表現出逐年上升的頻次和愈發突出的強度特徵。通過設定統一判別標準（ $O_3$  MDA8  $\geq 160 \mu g/m^3$  且  $PM_{2.5} \geq 75 \mu g/m^3$ ），本文對 2015 - 2022 年間協同污染事件進行識別與量化，得出如下結果：

### （1）協同污染事件頻次持續上升

統計顯示，2015 - 2022 年夏季協同污染事件總數由年均約 5 次增加至 12 次，呈逐年增長態勢。尤其是在 2020 年與 2022 年極端高溫年份，協同污染頻次顯著偏高，分別達到 14 次和 16 次，表明高溫年背景對協同污染形成具有強化作用。

### （2）污染事件持續時間與污染強度同步增強

協同污染事件的持續時間在 2015 年時多為單日過程，而至 2022 年，部分事件已延長至 3 - 5 天連續過程。臭氧日最大值多超過  $180 \mu g/m^3$ ， $PM_{2.5}$  在協同污染期間平均水準也維持在  $90 - 110 \mu g/m^3$ ，短時超標率顯著提升，說明污染物在不利氣象與熱環境下形成明顯累積。

### （3）強污染事件具有明顯分佈集中性

通過對所有事件進行等級劃分發現，強協同污染事件（ $O_3 \geq 180 \mu g/m^3$  且  $PM_{2.5} \geq 100 \mu g/m^3$ ）集中出現在 7 月下旬至 8 月上旬，約占全年協同事件的 40%。這些事件通常與長時間無風、高溫和高熱島同時發生重疊，污染物傳輸與擴散條件嚴重受限。

### （4）熱島與污染疊加顯著放大風險

空間疊加分析表明，熱島強度較高（UHII  $\geq 2.5^\circ C$ ）的區域出現強協同污染的概率是一般區域的 2.8 倍，說明熱環境與氣象條件構成污染強化背景。熱島“滯熱+抑風”效應對污染物的局地富集起到核心驅動作用。

### （5）年內事件呈現雙峰分佈格局

協同污染事件主要集中於 6 月下旬 - 7 月初和 8 月上旬兩個時間段，呈“高溫前沿+極端高溫”雙峰分佈。前者通常伴隨初始熱浪，後者對應城市持續高熱場，為污染防控提供關鍵時間窗。

綜上所示，協同污染事件在熱島與氣象耦合作用下呈現“頻次升高—強度增強—疊加效應突顯”的發展趨勢，這要求未來在城市空氣品質監管中納入熱力環境評價維度，提升污染預警的敏感性與時效性。

## 5.3 污染事件的空間聚集性特徵

為識別臭氧與顆粒物協同污染事件在空間上的聚集規律，本文基於 2015 - 2022 年協同污染日網格濃度資料，採用熱點分析與核密度估計法，揭示其在上海市域範圍的地理分佈模式。研究發現，協同污染事件具有顯著的空間聚集性，呈現出以下特徵：

### （1）核心熱島區為主要污染聚集中心

協同污染熱點高度集中于上海市中心區及其周邊密集建築區，尤其是黃浦、靜安、徐匯、長寧與浦東內環一線，核密度估值顯著高於其他區域。這些區域地形封閉、建築密度高、不透水面廣，熱島效應與污染源疊加，形成污染積聚區。

### （2）工業與交通樞紐帶形成次熱點區

閔行莘莊、嘉定南部、寶山楊行及金山化工區等區域出現協同污染次級高密度聚集區。這些地區工業排放源較多，且位於城市邊緣通風廊道薄弱帶，受熱島與不利氣象條件耦合作用，污染擴散受阻，形成局地富集。

### （3）郊區綠地與水體區污染頻次較低

在青浦、崇明、奉賢等區域，協同污染事件頻次明顯較低，空間分佈疏散。這些區域植被覆蓋率高、水域資源豐富、通風條件良好，對污染物稀釋與擴散具備天然優勢，構成天然“污染緩衝帶”。

### （4）污染聚集格局穩定但邊界有所擴展

縱向對比 2015 與 2022 年熱點分佈格局發現，雖然核心污染熱點位置基本未變，但高密度區邊界有所外擴，尤其是在嘉定、浦東南部與虹橋發展帶沿線，說明城市擴張與功能轉移帶動協同污染區位變化。

### （5）空間聚集與功能區分異高度一致

將污染熱點圖與城市功能區域圖疊加後發現，污染空間分佈高度對應于高強度建設區、工業園區與交通幹線密集帶。熱島高值區與協同污

染高發區的疊合面積超過總熱點面積的 75%，驗證了熱環境與污染聚集機制之間的聯動關係。

綜上所述，協同污染事件在上海呈現出“中心密集—工業次聚—週邊稀疏”的空間格局。這一空間結構高度受城市佈局、功能分區與熱力環境影響，為制定區域分區管控與差異化治理措施提供了關鍵依據。

## 6 熱島對協同污染的影響機制

### 6.1 熱島對 O<sub>3</sub>-顆粒物協同污染的促進效應分析

城市熱島效應作為城市氣候系統的重要組成部分，不僅改變了地表溫度分佈格局，更通過對輻射平衡、大氣動力學與污染物理化學反應速率的調節，深刻影響臭氧 (O<sub>3</sub>) 與顆粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 協同污染的形成與發展機制。本節結合熱島強度 (UHII) 與污染事件時空疊加資料，深入剖析熱島對協同污染的促進路徑。

(1) 地表升溫增強臭氧前體物的光化學反應速率

熱島引起的城市核心區升溫現象可顯著提升光化學反應活性，加快 O<sub>3</sub> 的生成速率。研究表明，地表溫度每升高 1°C，O<sub>3</sub> 生成潛勢可提升 2 - 5%。高溫條件促使揮發性有機物 (VOCs) 與氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 發生更強烈的光化學反應，生成更多臭氧分子。此外，溫度升高還加快部分揮發性組分 (如芳香族化合物) 的釋放，進一步提供 O<sub>3</sub> 生成的活性前體物，加劇污染水準。

(2) 熱島引發邊界層壓縮，限制污染物垂直擴散

熱島效應通過增強地表熱通量，導致近地氣層過熱，從而抑制邊界層抬升，使污染物聚集於低空。邊界層壓縮使 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 更易在近地表累積，形成“熱封蓋”效應，阻礙垂直稀釋路徑。這種邊界層低平與污染富集之間的正回饋關係，使污染強度在熱島區域顯著增加。

(3) 熱島誘導城市局地環流，加強污染物平流輸送與滯留

城市熱島可誘發局地環流，尤其在白天表現為城市熱力引導風，將週邊區域污染物輸送至城市核心區，在熱核區域彙聚，形成集中污染區。夜間由於地表熱量釋放緩慢，熱島核心區形成低

氣壓區，引導近地面污染氣團回流，加重局地污染負擔，延長污染持續時間。

(4) 人為排放疊加熱島加劇污染協同作用

熱島強度最大的區域往往也是機動車交通密集、工業排放活躍的不透水地面區，人為污染排放強度與熱儲積效應形成空間耦合。PM<sub>2.5</sub> 的二次生成過程亦受溫度與濕度調控，高溫低濕條件有利於硝酸鹽和有機組分的生成與轉化。熱島背景下光化學反應鏈與氣溶膠反應鏈交織疊加，使 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 同時進入高值狀態，協同污染特徵增強。

(5) 實證結果顯示 UHII 與協同污染事件正相關

基於 2015 - 2022 年夏季 UHII 與污染事件的回歸分析表明，當 UHII > 2.5°C 時，協同污染日發生概率顯著上升，O<sub>3</sub> 濃度均值較 UHII ≤ 1.5°C 時高出 25 - 30%，PM<sub>2.5</sub> 亦高出約 15%。兩者呈現空間重疊與回應同步特徵，表明熱島在物理和化學層面均強化了污染物耦合機制。

綜上所述，城市熱島通過提升溫度、壓縮邊界層、誘導環流與強化反應速率四重路徑，系統促進了 O<sub>3</sub> 與顆粒物的協同污染過程，其作用既直接影響污染生成強度，也間接影響污染物空間傳輸與積聚格局，是城市協同污染高發區形成的關鍵背景機制。

### 6.2 氣象條件與熱島污染作用的耦合機制

城市熱島效應作為人為增強的局地氣候現象，往往與區域性氣象要素緊密耦合，共同決定污染物的時空演化路徑與協同強度。通過分析上海夏季熱島強度與關鍵氣象因數的時空耦合特徵，本文歸納出以下四類主要聯動機制：

(1) 高溫與熱島疊加強化光化學污染潛勢

熱島引起的局地升溫常常與高溫天氣共同出現，雙重升溫導致地面氣溫迅速上升並長時間維持在 32°C 以上，為光化學反應提供了最適宜的溫度背景。臭氧的生成速率與氣溫呈指數型關係，而二次有機氣溶膠的生成也受溫度顯著影響。因此，高溫+熱島組合可同步提升 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 的協同生成能力。

(2) 低風速與熱島形成“滯留罩層”

熱島區常伴隨局地風速減弱，風速小於

1.5 m/s 的靜穩條件有利於污染物近地表聚集。與此同時，城市密集建築造成的表面粗糙度增強，也會降低地面摩擦風，加劇空氣滯留。熱島—靜穩聯合作用構建“熱蓋+靜風”雙封閉結構，污染物難以擴散出局地，協同污染風險顯著提高。

#### (3) 相對濕度下降助推氣溶膠二次生成

熱島區域通常濕度偏低，尤其在中午至下午高溫時段，相對濕度可下降至 35 - 45%。這種條件下，硝酸鹽與部分有機顆粒（SOA）生成效率提升，形成較強的顆粒物二次轉化路徑；此外乾燥條件降低了污染物的沉降與洗脫能力，促使其在城市空氣中長時間停留。

#### (4) 強太陽輻射加速臭氧與二次氣溶膠反應鏈

夏季熱島區域受輻射增強影響，地面淨輻射通常較郊區高出 10 - 20%，疊加城市反照率差異與建築反射，形成高能輻射帶。增強的紫外輻射不僅加快  $\text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_3$  的光化學鏈速率，還加速有機氣體氧化生成 SOA，提升  $\text{PM}_{2.5}$  的二次組分占比。

#### (5) 氣象-熱島複合場下污染演化路徑更為複雜

協同污染形成常受“高溫—靜穩—乾燥—強輻射—熱島”複合影響，污染物不再單點聚集，而是沿城市主風向或熱島環流主路徑呈現帶狀或扇形分佈。城市功能區、建築密度、風向與邊界層穩定度交織構成動態污染背景，對污染預測與防控提出更高要求。

綜上，氣象因數並非孤立作用，而是在熱島主導的城市氣候背景下協同驅動污染物的富集、轉化與滯留。理解這些複合機制對於提高污染回應模型精度與科學設定氣象—污染耦合預警系統具有重要理論與實踐意義。

### 6.3 不同城區的異質性對比

城市在功能佈局、建築密度、地表結構與排放特徵等方面存在顯著差異，使得熱島效應對協同污染的驅動機制在不同城區中呈現出明顯的空間異質性。以下從典型城市功能區（中心商務區、工業園區、居住新區、生態緩衝區）入手，比較熱島—污染耦合特徵的異同：

#### (1) 中心商務區（CBD）：熱核效應顯著，

#### 污染峰值同步疊加

以上海人民廣場、南京西路、陸家嘴等為代表的 CBD 區域，高層建築密集、交通負荷大、不透水率接近 90%，人工熱排放強，形成極強熱島核。 $\text{O}_3$  與  $\text{PM}_{2.5}$  在該區域表現出典型的協同高值疊加特徵，熱島強度 UHII 常年維持在 2.5 - 3.5 °C，污染物峰值日出現頻率明顯高於其他區域。污染物在垂直方向受限、水準擴散通道狹窄，滯留時間更長，是污染防控重點區段。

#### (2) 工業園區：高排放疊加熱島形成污染“滯積區”

嘉定、金山、寶山等工業集聚區雖然熱島強度略低於 CBD（UHII 一般為 1.5 - 2.5 °C），但由於  $\text{NO}_x$  與顆粒物排放基數大，熱島升溫促進前體物反應，導致二次污染物快速富集。同時，部分工業區靠近江灣與內河，環流結構複雜，污染物易在特定風向條件下“迴旋”滯留，形成高濃度污染滯積區。

#### (3) 新興居住區：熱島增強中，污染峰值日有所上升

浦東中部、閔行南部等新開發居住區近年來熱島強度逐年增強，主要因大量硬質鋪裝、綠地占比不足、機動車擁有量增加。UHII 在 2015 - 2022 年間增長幅度接近 30%，與協同污染日增幅趨勢高度一致。雖污染濃度低於工業區與 CBD，但污染事件持續性更長，居民暴露風險不可忽視。

#### (4) 生態緩衝區：熱島與污染雙低值區，呈“調節極”作用

崇明島、青浦濕地、松江佘山林地等生態控制區熱島強度普遍低於 1.0 °C，綠地率高、地表通風良好，是典型的冷島區。 $\text{O}_3$  與  $\text{PM}_{2.5}$  濃度顯著低於城市平均水準，在極端污染日也具備較強“降噪”能力。這些區域不僅自身污染水準低，還對相鄰城區具備污染緩衝與稀釋作用，是構建城市“綠色通風廊道”與“熱污染屏障”的關鍵區域。

#### (5) 城市空間梯度體現熱—污染聯動強度遞減規律

從城市中心向外依次是核心熱島區、工業與副中心次熱島區、新興居住區、生態緩衝區，熱

島與污染協同效應呈現出梯度式遞減。每下降一個城市功能等級，UHII 與協同污染頻率平均降低 20 - 35%，反映出城市結構與地表覆蓋類型是聯動強度分異的主導因素。

綜上，熱島對協同污染的驅動作用具有顯著的城區異質性。CBD 和工業區是污染耦合機制最複雜、強度最高的區域，應作為治理優先區；而居住新區需強化綠地和通風設計，生態緩衝區則應進一步完善保護機制，維護其“生態安全島”功能。

## 7 治理建議與政策啟示

### 7.1 熱島效應調控路徑

針對熱島效應在城市污染、健康與能耗等方面日益突出的影響，亟需構建系統化、分層次的調控路徑，以緩解城市熱環境壓力並降低其對協同污染的驅動效應。結合上海熱島分佈格局及城市結構特點，本文提出以下三類調控路徑：

#### (1) 優化城市空間結構，重塑熱力通風格局

城市總體規劃應充分考慮熱島強度空間分佈，避免高熱值區過度建設。可通過以下方式提升城市熱—風環境協調性：

- 建設“通風廊道”網路：在城市主風向路徑（如黃浦江兩岸）預留 5 - 8 km 寬的綠地或低密度功能帶，促進城市通風交換；
- 強化“藍綠緩衝帶”佈局：利用河流、湖泊與濕地在城市內部構建高效的冷源網路，增強城市熱壓梯度調節；
- 控制高熱區建設強度：在 UHII 超過 2.5°C 的核心熱島區，限制新增高強度功能開發，轉向混合功能區或生態化更新。

#### (2) 提升生態空間品質，增強地表降溫能力

綠地、水體等自然空間對緩解熱島效應具有顯著效果，應通過“增量+提質”並舉策略強化生態調控能力：

- 提升綠地覆蓋率與均衡性：確保主城區綠化率不低於 35%，並重點提升住宅區與商業核心區周邊綠量；
- 引導垂直綠化與屋頂綠化發展：對老舊建築與立面開展綠色改造，提升單位面積降溫效

率；

- 實施海綿城市建設標準：提高地表滲透能力，減少硬質鋪裝率，在功能複合型廣場與道路引入透水與反射型材料。

#### (3) 推進城市建築熱調節技術更新

建築是城市熱量蓄積的核心介質，應通過材料與設計更新提升建築熱調控能力：

- 推廣高反射率材料與屋頂白化：在大型商業、工業廠房等地面輻射強點推行屋頂白化、反射塗層技術，降低建築表面溫升；
- 強化建築節能標準：新建建築應滿足綠色三星或 LEED 銀級以上標準，在空調能耗高峰區實施建築能耗上限制度；
- 建設區域能量調控系統：探索區域熱管理平臺，對高熱區進行即時監控與能耗調節，實現智慧城市熱環境回應。

綜上，熱島效應調控不應限於降溫手段，而應從城市空間格局、生態基礎系統與建築體系三個層面形成多維聯動機制。城市更新應同步考慮“熱環境—生態安全—污染協同”的三元關係，以實現真正意義上的熱島治理目標。

### 7.2 協同污染防控策略優化

面對熱島背景下 O<sub>3</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 協同污染頻次升高、機制複雜化的新態勢，傳統“單污染物、單尺度”防控手段已難以應對協同污染的複合挑戰。為此，需構建精確、協同、高效的污染治理體系，從源頭、機制與調度三個維度提出如下優化路徑：

#### (1) 源頭減排路徑一體化設計

現有臭氧與顆粒物防控存在前體物控制“分離”的問題，需推動 VOCs、NO<sub>x</sub> 與一次顆粒物的聯動管控：

- 強化揮發性有機物 (VOCs) 分行業、分時段減排：針對石化、交通、印刷等 VOCs 重點行業實行差異化排放標準，強化夏季高溫季節错峰生產；
- 推進氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 與一次 PM 協同限排：優化柴油車與工業鍋爐等 NO<sub>x</sub>-PM 重疊排放源清單，推廣“雙控”技術如脫硝+除塵一體化系統；

- 更新多污染物共生排放清單：構建 O<sub>3</sub>-PM 協同污染重點源名錄，作為治理資源優先配置依據。

(2) 建立跨尺度協同治理機制

協同污染表現出強烈的跨區域輸送與城市—郊區聯動特徵，需打破行政邊界，實現多尺度協同聯控：

- 強化城市群層面區域聯防聯控：在長三角區域實施預警共識、應急同步啟動機制，對典型協同污染事件啟動“一體化回應”；
- 推動市內多區協同調度與生態補償：將熱島高值區、交通重負區與風道通廊區納入動態管理模型，對“淨輸出區”實施激勵政策；
- 構建污染-熱島一體化預報模型：融合氣象、遙感與污染物實測資料，形成城市級即時協同污染風險分佈圖。

(3) 提升時空精準調控能力

協同污染形成具有顯著的時段集中性與空間耦合性，應構建動態、回應式的污染干預系統：

- 推進“時變排放清單+即時氣象驅動”的模型化監管：建立逐小時、逐日級別的污染演化模擬，即時預測協同污染事件；
- 實施污染源差異化“彈性排放”機制：對熱島—污染疊加區的重點排放源實行污染物排放彈性調節，避免峰時高疊加；
- 發展城市微氣候調控工程：在典型協同污染聚集區（如 CBD 與工業園）佈設微尺度風場調節裝置（風塔、通風井等），提高污染稀釋能力。

綜上，協同污染防控必須打破傳統“單因數”治理思維，構建以“源控—區域協同—動態回應”為核心的新型防控體系。只有將污染治理與熱環境調控協同納入城市管理主框架，方能實現區域空氣品質系統性改善。

7.3 城市規劃與生態基礎設施建設建議

熱島—協同污染問題根源於城市空間結構失衡與生態系統服務功能弱化，因此，城市規劃與基礎設施建設應跳脫傳統“工程導向”，從系統韌性、生態承載與功能分區出發，構建面向氣候適應型與污染防控型的城市空間治理框架。具體

建議如下：

(1) 構建“熱環境敏感型”城市結構體系

當前城市核心區熱島強度與污染疊加顯著，應從空間佈局源頭進行調控：

- 劃定“熱島調控區”並納入控規管理：在 UHI<sub>1</sub> ≥ 2.5 °C 的重點熱區劃設調控邊界，實施開發強度分級管理與建設用地限制；
- 優化用地混合比例，降低熱/排耦合效應：避免將高密度人口居住區與污染源（如高架路口、產業帶）共置，強化功能分區彈性；
- 提升城市密度—通風—綠量協同指數：推行通風走廊嵌入式佈局，引導建築高度階梯式排列，確保熱壓差與風壓差協同形成微尺度通風網路。

(2) 加強生態基礎設施網路化佈局

城市綠色基礎設施不僅具有降溫和污染削減功能，也是緩解熱島污染協同機制的核心生態介質：

- 構建“主幹—節點—面狀”三級綠網結構：主幹為 10 - 20 km 城市通風廊道（沿河、沿鐵路）；節點為公園綠地、濱水帶；面狀為住宅片區小微綠地；
- 推進“灰綠融合”基礎設施轉型：將雨水管網、城市廣場、下沉式綠地等納入海綿城市系統，實現防澇—通風—污染削減三合一；
- 實施“綠色組團+通風介面”組合控規：在新建住區統一規劃綠地面向、寬度與與風道走向，保障綠網通達性與生態連通性。

(3) 推動適應性基礎設施更新機制

面向未來氣候與污染不確定性的城市發展，應強化基礎設施在氣候韌性方面的適應性：

- 開展“熱島脆弱性評估”並定期更新基礎設施適配標準：結合 LST、污染物分佈與社會暴露資料建立多因數脆弱性評價圖；
- 推廣可調控微環境構件與綠色材料：如熱回應地面材料、智能遮陽構件、透水-保水複合路面等；
- 建立基礎設施生命週期碳排放與熱回饋核算機制：確保城市更新不再造成熱島-污染回

饋效應加劇，實現綠色建設與健康環境的正向耦合。

綜上，生態基礎設施與城市規劃若能納入熱島與污染協同管理視角，不僅有助於環境品質提升，也將為城市適應極端氣候與健康風險提供制度支撐與空間保障。

## 8 結論與展望

本研究聚焦於城市熱島效應對臭氧與顆粒物協同污染的促進機制，以上海為典型城市樣本，綜合遙感資料、地面氣象觀測與空氣品質監測資料，系統分析了熱島強度的時空演變特徵、 $O_3$  與  $PM_{2.5}$  的協同污染表現及其相互耦合機制。在構建多來源資料融合框架的基礎上，本文明確揭示了熱島在污染物濃度提升、空間聚集與協同增強中的關鍵作用，並為應對極端污染風險提供了科學依據與治理方向。

研究發現，熱島效應在城市空間中具有穩定的核心分佈與外擴趨勢，其強度與城市建設密度、地表不透水率密切相關。夏季與夜間是熱島效應最強的時段，而這些時段亦往往對應  $O_3$  濃度上升和  $PM_{2.5}$  滯留的高風險期。進一步分析表明， $O_3$  與  $PM_{2.5}$  在熱島核心區頻繁同時達到高濃度值，形成典型協同污染事件，其空間分佈與熱島強度格局高度一致。特別是在夏季高溫天氣背景下，熱島作用疊加高輻射、低風速與邊界層抑制，顯著增強污染物的生成效率與滯留強度，從而導致污染事件頻次升高、持續時間延長，表現出突出的時空同步性與累積性。

機制層面，熱島通過升高地表溫度加速光化學反應鏈條，推動臭氧快速生成；同時壓縮邊界層厚度，減少垂直擴散空間，加劇近地面污染物積聚；而局地環流形成和污染排放源的空間重合，則進一步增強了污染物的輸送與富集效應。此外，

### 參考文獻：

- [1] C. Sarrat, A. Lemonsu, V. Masson, D. Guedalia Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(10): 1743-1758.
- [2] Baik, J.J., Kim, Y.H., Kim, J.J. et al. Effects of boundary-layer stability on urban heat island-induced circulation. Theor. Appl. Climatol., 2007, 89: 73-81.
- [3] Wang, L., Liu, J., Gao, Z., Li, Y., Huang, M., Fan, S., Zhang, X., Yang, Y., Miao, S., Zou, H., Sun, Y., Chen, Y., and Yang, T. Vertical observations of the atmospheric boundary layer structure over Beijing urban area during air pollution

熱島與典型氣象條件（如乾燥、無風、強輻射）之間存在高度協同關係，這種複合氣候背景不僅強化了污染物的化學反應潛勢，也對污染時空分佈施加深刻影響。不同城區因功能定位、建築格局與綠地配置的差異，在熱島與污染回應強度上呈現明顯空間異質性。中心商務區與工業園區通常為熱島-協同污染耦合機制最為強烈的區域，而生態緩衝區則在降溫與污染擴散中發揮了積極作用。

在治理層面，本文建議應從空間結構重構、生態基礎設施佈局優化與協同污染防控機制完善三方面著手，建立熱環境與空氣品質的聯動調控系統。應優先在熱島高值區實施建設強度控制與生態修復工程，推動綠網體系重構與通風廊道規劃，並構建面向協同污染識別的多來源資料預警模型，實現“氣象—污染—熱島”一體化回應。同時，通過跨區協同與排放清單整合，構建源頭聯控體系，提升污染防控的協同效能與動態適應能力。

未來研究仍有數個關鍵方向亟待深化。首先，在資料方面，應提升空間解析度與動態類比能力，引入高頻觀測、無人機遙感與微氣候模型，捕捉污染與熱島演化的即時過程。其次，協同污染的健康影響機制尚待系統建模，尤其是熱暴露與多污染物複合暴露下的人體風險路徑需加強實證研究。此外，在政策層面，可探索“熱島—污染”共治試點區建設，通過實際案例檢驗治理路徑的可行性與有效性，推動形成系統化、制度化、空間化的城市應對體系。

綜上，城市熱島與臭氧-顆粒物協同污染之間的系統互動機制，是未來城市環境研究與治理政策制定的核心議題。唯有打破學科壁壘，統籌空間結構優化與生態調控策略，才能實現面向未來的低碳、韌性與健康型城市轉型。

episodes[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, 19: 6949-6967.

[4] Yasser Abbassi, Hossein Ahmadikia, Ehsan Baniasadi. Prediction of pollution dispersion under urban heat island circulation for different atmospheric stratification[J]. *Building and Environment*, 2020, 168.

[5] Salah Eddine Sbai, Chunlin Li, Antoinette Boreave, Nicolas Charbonnel, Sebastien Perrier, Philippe Vernoux, Farida Bentayeb, Christian George, Sonia Gil. Atmospheric photochemistry and secondary aerosol formation of urban air in Lyon, France[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 99: 311-323.

[6] Qi Ying, Michael J. Kleeman. Effects of aerosol UV extinction on the formation of ozone and secondary particulate matter[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(36): 5047-5068.

[7] Song T, Feng M, Song D, Liu S, Tan Q, Wang Y, Luo Y, Chen X, Yang F. Comparative Analysis of Secondary Organic Aerosol Formation during PM<sub>2.5</sub> Pollution and Complex Pollution of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in Chengdu, China. *Atmosphere*, 2022, 13(11): 1834.

[8] Min Shao, Jianbo Yang, Jinmei Wang, Pulong Chen, Baoshuang Liu, Qili Dai. Co-Occurrence of Surface O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> Pollution, and Tropical Cyclones in China[J]. *JGR Atmospheres*, 2022, 127(14).

[9] Yuanping He, Lei Li, Haolin Wang, Xinqi Xu, Yuman Li, Shaojia Fan. A cold front induced co-occurrence of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> pollution in a Pearl River Delta city: Temporal variation, vertical structure, and mechanism[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119464.

[10] Weimin Wang, Kai Liu, Rong Tang, Shudong Wang. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 110: 168-175.

[11] Xiong Xu, Haoyang Pei, Chao Wang, Qingyu Xu, Huan Xie, Yanmin Jin, Yongjiu Feng, Xiaohua Tong, Changjiang Xiao. Long-term analysis of the urban heat island effect using multisource Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159777.

[12] Huibin Dai, Jia Zhu, Hong Liao, Jiandong Li, Muxue Liang, Yang Yang, Xu Yue. Co-occurrence of ozone and PM<sub>2.5</sub> pollution in the Yangtze River Delta over 2013-2019: Spatiotemporal distribution and meteorological conditions[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105363.

## 版權聲明

© 2025 作者版權所有。本文依據“知識共用署名 4.0 國際授權合約”（CC BY 4.0）以開放獲取方式發佈。該許可允許使用者在任何媒介中自由使用、複製、傳播與改編文章（含商業用途），惟須明確署名原作者及出處，並注明所作修改（如有）。完整協議詳見：<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.zh-hans>

## 出版聲明

所有出版物中的陳述、觀點及資料僅代表作者及供稿者個人立場，與 Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員無關。Brilliance Publishing Limited 及/或編輯人員對因內容所提及的任何理念、方法、說明或產品所導致的人身或財產損害概不負責。