ABSTRACT

Clouds and aerosols are among the most critical components of the Earth's climate system, regulating both the radiative and hydrological budgets through their individual effects as well as their complex interactions. While the IPCC AR6 report highlights progress in reducing uncertainties in aerosol–cloud interactions (ACI) and their impacts on Earth's radiative balance, many of the underlying processes remain unresolved due to their highly nonlinear nature. This thesis investigates key challenges faced by both the observational and modeling communities in quantifying ACI and explores their implications for radiative forcing estimates over South Asia using a global climate modeling framework.

A major focus of this work is the role of meteorology in shaping model-simulated ACI. Using the Community Atmosphere Model version 5 (CAM5), which forms part of the Community Earth System Model (CESM), specialized simulations were conducted in which model-predicted meteorology was replaced with GEOS5 reanalysis data or selectively constrained through nudging techniques. These experiments were designed to evaluate uncertainties in ACI over the northern Bay of Bengal (NBoB), a region characterized by frequent low-level clouds and high aerosol loading during winter. Analysis revealed that CAM5 overestimates the first indirect effect (FIE), leading to enhanced evaporative cooling of smaller droplets, a reduction in available moisture, and a spurious negative second indirect effect (SIE) that is inconsistent with observations. Nudging specific humidity improved SIE estimates by stabilizing the boundary layer and sustaining shallow cloud growth through continuous moisture supply. In contrast, nudging horizontal winds improved aerosol transport but also enhanced the influx of fine-mode absorbing black carbon (BC), which amplified semi-direct effects through additional atmospheric heating, stronger instability, and enhanced evaporation. These results highlight serious deficiencies in model-simulated specific humidity and demonstrate its central role in improving the representation of shallow cumulus and stratocumulus cloud ACIs, which remain a major source of uncertainty in estimates of aerosol-induced cooling.

The thesis then turns to aerosol-induced cloud invigoration effects, which represent fast adjustments of clouds in response to aerosol perturbations under conditions of high convective instability and moisture abundance. Although widely studied using observations and mesoscale models, the strong coupling of these processes with large-scale circulation necessitates their examination using global models. CAM5 simulations revealed that the representation of

convective invigoration is highly sensitive to horizontal resolution: while coarse (~2°) simulations failed to reproduce key signatures, finer resolutions (1° and especially 0.5°) captured the dynamical, thermodynamical, and microphysical responses more realistically. These results demonstrate that studying aerosol-induced convective invigoration requires the use of high-resolution global models with horizontal grid spacing of 0.5° or finer.

Building on this, species-specific perturbation experiments were performed to disentangle the roles of sulfate, BC, and dust aerosols in shaping mid- and high-level cloud properties during the Indian Summer Monsoon (ISM). Results revealed a clear size–composition dichotomy. Larger, absorbing aerosols such as BC and dust primarily influenced cloud vertical structure by altering the atmospheric dynamical and thermodynamical environment, ultimately deepening convective towers and enhancing upper-level cloud development. In contrast, smaller, hygroscopic sulfate aerosols acted as efficient cloud condensation nuclei, being readily transported to higher altitudes but leading to cloud stratification and shallowing due to the formation of numerous small ice particles under weakened updrafts. These distinct pathways resulted in different magnitudes and signs of radiative forcing associated with fast cloud adjustments to aerosol perturbations.

To the best of the author's knowledge, this is the first systematic effort to isolate deficiencies in model-simulated meteorology as a source of uncertainty in ACI representation and to examine species-specific invigoration and suppression mechanisms using a high-resolution global climate model. The findings highlight the critical role of meteorology (especially specific humidity), spatial resolution, and aerosol size–composition diversity in shaping ACI responses. By elucidating the feedback pathways through which aerosols influence cloud microphysics, macrophysics, and atmospheric energetics, this thesis advances the scientific understanding of aerosol–cloud–climate feedback over South Asia and provides new insights for reducing uncertainties in estimates of aerosol radiative forcing.

सारांश

बादल और एरोसोल पृथ्वी के जलवायु तंत्र के सबसे महत्वपूर्ण घटक हैं, जो पृथ्वी के विकिरणीय तथा जलविज्ञानीय बजट को अलग-अलग भी और अपनी पारस्परिक अंतःक्रिया के माध्यम से भी विनियमित करते हैं। यद्यपि "आईपीसीसी" के "एआर-६" प्रतिवेदन में दर्शाया गया है कि उनकी अंतःक्रिया तथा उससे पृथ्वी के विकिरणीय संतुलन पर पड़ने वाले प्रभावों से जुड़ी अनिश्चितताओं के आकलन में सुधार हुआ है, फिर भी उनकी अरेखीय प्रकृति के कारण बादलों और एरोसोल से संबंधित अनेक प्रक्रियाएँ अब भी अनसुलझी हैं। यह शोधप्रबंध एरोसोल–बादल अंतःक्रिया (एसीआई) के संदर्भ में प्रेक्षण समुदाय और मॉडलन समुदाय के सम्मुख उपस्थित विविध चुनौतियों तथा विकिरणीय बाध्यन के अनुमानों पर उनके प्रभावों को समझने का एक प्रयास है।

एरोसोल में परिवर्तन के प्रति बादलों के त्वरित समायोजनों से उत्पन्न विकिरणीय बाध्यन की अनिश्चितताओं को, **सीएफ़एमआइपी प्रेक्षण सिमुलेटर पैकेज (सीओएसपी)** के सिमुलेटर-आउटपुट का उपयोग कर, कुछ हद तक कम किया जा सकता है; जिसके माध्यम से प्रेक्षणों और मॉडलन अध्ययनों के बीच विद्यमान पूर्वाग्रह के बड़े हिस्से को मॉडल पैरामीट्रीकरण योजनाओं के खाते में डाला जा सकता है। तथापि, अन्य वायुमंडलीय कारक भी इन अनिश्चितताओं में योगदान करते हैं—और यही इस शोधप्रबंध का मुख्य केन्द्र है।

सामान्य परिसंचरण मॉडल (जीसीएम) का उपयोग करके वैश्विक जलवायु का अनुकरण करते समय, एरोसोल–बादल अंतःक्रियाएँ बादलों तथा परिवेश की प्रतिक्रिया-प्रक्रियाओं से निरंतर प्रभावित होती रहती हैं; परिणामस्वरूप अनुमानित एसीआई प्रभावों में भ्रामक सह-परिवर्तनशीलताएँ उत्पन्न हो जाती हैं, जिन्हें न प्रेक्षणों में और न ही मॉडल अनुकरणों में आसानी से अलगाया जा सकता है। मॉडल-निरूपित निम्न-स्तरीय बादलों के एसीआई प्रभाव महापरिसंचरण और मौसम विज्ञान के प्रति कैसे प्रत्युत्तर देते हैं, इसे समझने के लिए हमने कम्युनिटी एटमॉस्फ़ियर मॉडल (कैम-५)—जो कम्युनिटी अर्थ सिस्टम मॉडल (सीईएसएम) का वायुमंडलीय अवयव है—के साथ विशेषीकृत अनुकरण बनाए। इन प्रयोगों में (i) मॉडल द्वारा भविष्यवाणी की गई मौसम-स्थितियों को जिओस-५ के पुनर्परीक्षण (रीऐनालिसिस) से निर्दिष्ट मौसम-स्थितियों द्वारा प्रतिस्थापित किया गया, तथा (ii) चयनित मौसम संबंधी पैरामीटर—जैसे विशिष्ट आर्द्रता और क्षैतिज पवन—को नजिंग विधि से नियंत्रित किया गया; उद्देश्य था शीतकाल में उच्च एरोसोल भार और निम्न-स्तरीय बादलों की बारंबारता वाले उत्तरी बंगाल की खाड़ी (एनबीओबी) क्षेत्र में मॉडल-निरूपित एसीआई प्रभावों की कमियों को समझना।

प्रेक्षणों के साथ मॉडल-निरूपित एसीआई प्रभावों के विश्लेषण से संकेत मिला कि कैम-५ प्रथम अप्रत्यक्ष प्रभाव (एफ़आईई) को अत्यधिक प्रबल रूप में निरूपित करता है; फलतः छोटी बूंदों का वाष्पीकरणीय शीतलन बढ़ता है, उपलब्ध नमी घटती है और इस प्रकार प्रेक्षणों में दिखने वाले संकेतों के विपरीत नकारात्मक द्वितीय अप्रत्यक्ष प्रभाव (एसआईई) सूचित होता है। आगे, विशिष्ट आर्द्रता की नियंत्रित नजिंग सीमांत परत को स्थिर कर तथा नमी की निरंतर आपूर्ति देकर अनुकरणित एसआईई आकलनों में सुधार लाती है, जिससे उथले क्यूम्यलस/स्ट्रैटोक्यूम्यलस बादल गहराते हैं। इसके विपरीत, पवनों की नजिंग एनबीओबी पर प्रचलित एरोसोल का बेहतर अनुकरण तो कराती है, पर सूक्ष्म-मोड अवशोषक ब्लैक कार्बन (बीसी) एरोसोल का परिवहन बढ़ाती है, जिससे विकिरण का अधिक क्षीणन होता है। यह वातावरण में अतिरिक्त ऊष्मीकरण उत्पन्न करता है; परिणामस्वरूप ऊर्ध्वगामी प्रवाह अधिक सशक्त होते हैं, अस्थिरता बढ़ती है और बीसी एरोसोल की अवशोषण विशेषताओं—अर्थात प्रधान अर्ध-प्रत्यक्ष प्रभाव—के कारण नमी का वाष्पीकरण बढ़ता है, जो अंततः अनुकरणित एसीआई प्रभावों की शक्ति को घटा देता है। अतः हमारे परिणाम दर्शाते हैं कि मॉडल-निरूपित विशिष्ट आर्द्रता में गंभीर समस्याएँ हैं; इसलिए उथले क्यूम्यलस/स्ट्रैटोक्यूम्यलस बादलों के लिए एसीआई से होने वाले शीतन प्रभावों की प्रमुख अनिश्चितताओं को घटाने हेतु मॉडल-आधारित एसीआई अनुकरणों में सुधार पर वैज्ञानिक समुदाय का विशेष ध्यान अपेक्षित है।

इसके बाद हमारा ध्यान एरोसोल-प्रेरित बादल प्रबलन प्रभाव, अर्थात एरोसोल–बादल अंतःक्रिया (एसीआई) के एक अन्य पहलू पर केंद्रित होता है। हालिया जलवायु प्रक्षेपण प्रतिवेदन में आईपीसीसी ने एरोसोलों में परिवर्तन के प्रति बादलों के त्वरित समायोजनों से उत्पन्न विकिरणीय बाध्यन की अनिश्चितता को शामिल किया है। ऐसे त्वरित समायोजन उच्च संवहनीय अस्थिरता और प्रचुर नमी वाले क्षेत्रों में अधिक दिखते हैं। एक स्वच्छ परिवेश में, जहाँ अस्थिरता और नमी उपलब्ध हो, प्रदूषित एरोसोल का प्रवेशन गतिकीय, ऊष्मागतिकीय तथा बादलों के सूक्ष्म/स्थूल भौतिक गुणों में ऐसे नाटकीय परिवर्तन ला सकता है, जिनके कई आयाम वैज्ञानिक समुदाय के लिए अब भी अज्ञात हैं। इस संदर्भ में प्रेक्षणों तथा क्षेत्रीय/मेसोस्केल मॉडलों से अनेक प्रयास हुए हैं, किन्तु वायुमंडलीय अस्थिरता और महापरिसंचरण के साथ एसीआई प्रभावों के घनिष्ठ युग्मन के कारण इनका अध्ययन वैश्विक जलवायु मॉडल के माध्यम से करना आवश्यक है। यहाँ हम वैश्विक जलवायु मॉडल का उपयोग करके संवहनीय प्रबलन प्रभावों के अनुकरण में उसकी क्षमता तथा ऐसे अनुकरणित प्रभावों पर मॉडल संकल्प की भूमिका को समझने का प्रयास करते हैं।

हमारे परिणाम दर्शाते हैं कि एरोसोल-प्रेरित बादल प्रबलन प्रभाव मॉडल के संकल्प के प्रति अत्यधिक संवेदनशील है। कैम-५ मॉडल में, जब संकल्प 2° (मोटा संकल्प) से बढ़ाकर 1° और अंततः 0.5° किया गया, तब इस प्रकार की अंतःक्रिया के स्पष्ट चिह्नों का सफल अनुकरण संभव हुआ। अतः एरोसोल-प्रेरित बादल प्रबलन प्रभावों का अध्ययन 0.5° या उससे अधिक क्षैतिज संकल्प वाले उच्च-संकल्प वैश्विक जलवायु मॉडल से करना उचित है।

इन परिणामों के आधार पर, आगे हमने यह समझने का प्रयास किया कि विभिन्न प्रकार के एरोसोल भारतीय ग्रीष्मकालीन मानसून (आईएसएम) ऋतु के दौरान—जब क्षेत्र में नमी प्रचुर होती है और संवहनीय गतिविधि तीव्र रहती है—मध्य एवं उच्च-स्तरीय बादलों की संरचना (आकृति-विन्यास) तथा उनके स्थूल/सूक्ष्म भौतिक गुणों को कैसे प्रभावित करते हैं। इस अध्याय के परिणाम दर्शाते हैं कि वायुमंडल में शीत बादलों के प्रबलन में एरोसोल के कण-आकार बनाम रासायनिक संरचना का प्रभाव अत्यंत महत्वपूर्ण है। धूल तथा ब्लैक कार्बन (बीसी) एरोसोल, अपने बड़े कण-आकार और प्रभावी अवशोषी गुणों के कारण, पहले वायुमंडलीय गतिकीय और ऊष्मागतिक प्रत्याभूतिक्रिया को संशोधित करते हुए बादलों की ऊर्ध्वाधर संरचना को प्रभावित करते हैं, जिससे अंततः अधिक गहरे और ऊँचे बादल बनने लगते हैं। इसके विपरीत, सल्फेट एरोसोल कुशल बादल-संघनन नाभिक (सीसीएन) होते हैं और आकार में छोटे; अतः वे आसानी से वायुमंडल के उच्च स्तरों तक पहुँच जाते हैं, किन्तु कमजोर ऊर्ध्व प्रवाह के कारण हिमीय बादलों को गहराने में असफल रहते हैं। बीसी और धूल के गहराने वाले प्रभाव के उलट, सल्फेट एरोसोल अनेक, पर छोटे आकार के हिमकण नाभिक बनाकर हिमीय बादलों में परतदारता और उथलापन बढ़ाते हैं। इन दोनों मार्गों से एरोसोल विक्षोभ के प्रति बादलों के त्वरित समायोजनों के कारण, विभिन्न परिमाणों के साथ, विकिरणीय बाध्यन में परिवर्तन उत्पन्न होते हैं।

लेखक की सर्वोत्तम जानकारी के अनुसार, मॉडल-निरूपित एसीआई प्रभावों की अनिश्चितताओं के संदर्भ में मॉडल-पूर्वानुमानित मौसम विज्ञान से संबंधित मुद्दों को अलग से विश्लेषित करने का पूर्व में कोई प्रयास नहीं किया गया है। साथ ही, उच्च-संकल्प वैश्विक जलवायु मॉडल का उपयोग कर एरोसोल के कण-आकार और रासायनिक संरचना के बादल प्रबलन/क्षीणन पर प्रभावों की समझ विकसित करने वाला यह अध्ययन अपनी तरह का पहला, विशिष्ट प्रयास है, जो वायुमंडलीय विकिरणीय संतुलन में परिवर्तन लाने वाले विविध प्रत्याभूति-पथों को स्पष्ट करता है और एरोसोल–बादल–जलवायु प्रत्याभूतिक्रिया में विद्यमान अनिश्चितताओं के समाधान हेतु आगे के अनुसंधान प्रयासों को प्रोत्साहित करेगा।