

**A STUDY OF CONVECTION OVER BAY OF BENGAL  
USING CLOUD RESOLVING AND LARGE EDDY  
SIMULATION**

**GAURAV DOGRA**



**SCHOOL OF INTERDISCIPLINARY RESEARCH  
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**JULY 2024**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

**A Study of Convection over Bay of Bengal using Cloud  
Resolving and Large Eddy Simulation**

by

**Gaurav Dogra**

**SCHOOL OF INTERDISCIPLINARY RESEARCH**

**Submitted**

**In fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy**

**to the**



**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

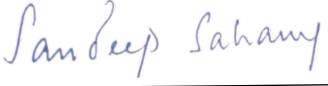
**JULY 2024**

## CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**A Study of Convection over Bay of Bengal using Cloud Resolving and Large Eddy Simulation**” being submitted by **Mr. Gaurav Dogra** is the report of bonafide research work carried out by him under our supervision. This thesis has been prepared in conformity with the rules and regulations on Indian Institute of Technology, Delhi. We further certify that the thesis has attained a standard required for the award of **Doctor of Philosophy** degree of the Institute. The research reported and the results presented in the thesis have not been submitted, in part or full to any other institute or university for the award of any other degree or diploma.

---

Prof. Anupam Dewan  
Professor  
Department of Applied Mechanics  
Indian Institute of Technology Delhi  
Hauz Khas, New Delhi, Delhi – 110016

---

Prof. Sandeep Sahany  
Deputy Principal Research Scientist  
Department of Climate Research  
Centre for Climate Research Singapore  
36 Kim Chuan Road, Singapore 537054

Date :

Place :

## ACKNOWLEDGEMENTS

To begin with, I'd like to express my heartfelt thanks to my professors, Prof. Anupam Dewan and Prof. Sandeep Sahany, for their unwavering support and guidance throughout my PhD journey. They were a constant source of motivation, and I credit their encouragement and invaluable advice for my achievements. Their sincerity, thoroughness, and determination have consistently inspired me. Their substantial contribution involved fostering my scientific capabilities over an extended period, genuinely grooming me for a prospective path as a climate scientist. Their unwavering confidence and sustained assistance not only facilitated my development as an autonomous researcher but also provided me with the tools to navigate demanding circumstances adeptly. Their counsel, encompassing both research and career guidance, has been immeasurably valuable.

Furthermore, I would like to express my appreciation to the members of my research committee, Prof. Shantanu Roy, Prof. B. Premachandran, and Prof. Saroj Kanta Mishra, for offering valuable insights whenever I needed them. I want to thank the entire faculty and staff of the School of Interdisciplinary Research for their assistance and collaboration during my coursework, making my PhD journey enjoyable. I'm also thankful to my collaborators, Dr. Anurag Dipankar (ETH Zurich) and Dr. Sudarsan Bera (IITM Pune), for their valuable feedback on various aspects of my work.

I'm deeply thankful to my parents, Mr. Rajnish Kumar Dogra and Mrs. Sushma, for embracing and supporting my PhD journey, providing me with moral and emotional support throughout these years. I'm also grateful to my brother, Mr. Vaibhav Dogra, and my wife, Mrs. Anupriya, for their unwavering love, support, and motivation. I extend my thanks to other family members and friends who have stood by me during this journey.

This is the perfect moment to express my gratitude to all those who directly or indirectly aided me during my thesis work. I'm grateful to Dr. Kamal Tewari, Dr. Anuj Shukla, Dr. Tej Pratap Singh, Mr. Sandeep Yadav, Mr. Rahul, Mr. Sumit, Mr. Rishab, Mr. Devansh, and all my friends for their support, which made my time at IITD enjoyable. I extend my thanks to DST COE in Climate Modelling for partially funding this research work. Lastly, I'm also thankful to everyone at the DST COE and CFD lab; it was an enriching experience to share the laboratory with all of you during my research. Thank you for your encouragement.

Lastly, I'd like to express my gratitude to the Almighty for granting me the strength, guiding me in the right direction, and showering countless blessings upon me, enabling me to successfully complete my thesis.

**Gaurav Dogra**

## ABSTRACT

*The Earth's atmosphere plays a pivotal role in shaping our planet's climate system. Among the many processes that occur within the atmosphere, convection stands out as a fundamental mechanism responsible for redistributing thermal energy and moisture, intriguing climate scientists for decades. Solar radiation heats the Earth's surface, and this heat is transferred to the atmospheric air primarily by conduction and convection. Convection, the vertical movement of air masses driven by the temperature and density differences, transports this heat to larger scales, leading to cloud formation and precipitation. Convection also results in the vertical redistribution of horizontal momentum through updrafts and downdrafts. This transport process causes frictional deceleration, which in turn facilitates the conversion of kinetic energy from large-scale atmospheric flows to convection and turbulence. Thus, atmospheric convection combines fluid mechanics and heat transfer in Earth's atmosphere. However, unlike classical fluid mechanics problems, for which numerical solutions are straightforward, geophysical fluid dynamics presents a challenge due to the complex three-dimensional and time-dependent nature of the flow and the phase change of water. Convection can manifest as dry or moist, shallow or deep, each exhibiting distinct characteristics.*

*This study focuses on deep convection, which involves the ascent of moist air to higher altitudes and the formation of towering cumulonimbus clouds. Deep convective clouds serve as a pivotal component in the regulation of the Earth's water and energy cycles. Deep convection frequently occurs over tropical oceans and varies across a range of spatio-temporal scales across the tropics, influencing weather and climate. In the Indian context, deep convection that typically occurs during the summer monsoon season of June-through-September is a fundamental process*

responsible for distributing rainfall across the Indian subcontinent. In the months of summer monsoon, the Bay of Bengal area commonly witnesses the occurrence of deep convective clouds. Although these clouds also occur during other months, in the present study our focus is on the case study during the monsoon months. Understanding the deep convection during the convection with the large-scale environment in this region is crucial for improving convection simulation. Obtaining observational data over regions of interest is the ideal approach to understand these phenomena accurately. However, it is not possible to have observational data for every point. Therefore, computational studies play a crucial role in filling this gap. In addition to the ability to simulate these deep clouds, given the backdrop of global warming which is causing changes in the dynamics and thermodynamics of the atmospheric processes, understanding the impact of warming on deep clouds is a critical research question, and addressing it will enhance our comprehension of the complex convective systems of the future. The overarching objective of this thesis is to understand the atmospheric convection over the Bay of Bengal during active monsoon phase using a high-resolution model. By employing this model, the study aims to address some of the challenges mentioned above by examining each aspect in isolation and translating the knowledge gained to evaluate the impact of warming in the plausible future.

In the first part of the thesis, we use a large eddy simulation model to set up a study over the Bay of Bengal region to successfully simulate the deep convective clouds during an active convection phase and to understand the dynamical features of these clouds. Due to the lack of observational data, these simulations are based on ERA5 (Fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecast atmospheric reanalysis) data. The results demonstrate that the clouds formed over the region during the active phase are deep and precipitating in nature. Given that the simulations are forced with ERA5 data, the results indicate that simulations accurately

*reproduced the vertical structure of cloud hydrometeors, exhibiting similarities to that observed in ERA5 data. These clouds reach heights of around 18 km and are typically observed over the region during the monsoon season. The turbulent fluxes of heat and moisture provide details of turbulent atmosphere during active convection event. The cloud core fields are conditionally averaged, and their properties align well with the deep convective clouds reported in the literature.*

*Next, we explore the impact of boundary conditions on convection evolution. Simulations performed with large-scale forcings as boundary conditions emphasize their importance in capturing deep convection phenomena. These forcings play a crucial role in representing the influence of larger atmospheric conditions on convection evolution and organization. We observe from the large-scale forcings simulations that these forcings are necessary to simulate the convection evolution. We also examine how domain size affects convection evolution and observe that smaller domains are inadequate for capturing deep convection. We observe that in smaller domains, the clouds are formed with size as big as the domain and then break and this process continues again. Thus, not allowing the simulation to reach a steady state. Therefore, to simulate deep convective clouds a larger domain size is required. Additionally, we investigate the grid size sensitivity and determine that in comparison to 125 m horizontal grid size, 250 m grid size is suitable for simulating deep convective clouds, as the results converge for both the cases. Further 250 m grid will also reduce computational time by a factor 4 in comparison to 125 m grid.*

*Finally, we study the impact of warming on deep convective clouds over the Bay of Bengal using large eddy simulations. By increasing both atmospheric and sea surface temperatures from the base case, we observe that warming enhances deep convection intensity, leading to higher Convective Available Potential Energy (CAPE) values and more intense convective systems with increased precipitation. The warmer atmosphere results in higher liquid water path values,*

*indicating intensified deep convection. The intensification of cloud hydrometeors is further augmented as cloud tops rise in response to warming conditions. We observe from these simulations that due to warming in future there will be more intense convective events over the BoB region, and this can lead to more cyclonic activity across the region. These results provide valuable insights into the complex dynamics of deep convection and its response to various factors that can be implemented in development of India centric climate model.*

## सारांश

पृथ्वी का वायुमंडल हमारे ग्रह की जलवायु प्रणाली को आकार देने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। वायुमंडल में होने वाली कई प्रक्रियाओं में से, संवहन एक मौलिक तंत्र के रूप में सामने आता है जो तापीय ऊर्जा और नमी के पुनर्वितरण के लिए जिम्मेदार है, जिसने दशकों से जलवायु वैज्ञानिकों को हैरान कर रखा है। सौर विकिरण पृथ्वी की सतह को गर्म करता है, और यह गर्मी मुख्य रूप से चालन और संवहन द्वारा वायुमंडलीय हवा में स्थानांतरित होती है। संवहन वायु द्रव्यमानों की ऊर्ध्वाधर गति है जो तापमान और घनत्व के अंतर से प्रेरित होती है, जो ऊष्मा को बड़े पैमाने पर स्थानांतरित करती है, जिससे बादल बनते हैं और वर्षा होती है। संवहन के परिणामस्वरूप अपड्राफ्ट और डाउनड्राफ्ट के माध्यम से क्षैतिज गति का ऊर्ध्वाधर पुनर्वितरण भी होता है। यह परिवहन प्रक्रिया घर्षण मंदन का कारण बनती है, जो बदले में बड़े पैमाने पर वायुमंडलीय प्रवाह से गतिज ऊर्जा के संवहन और अशांति में रूपांतरण की सुविधा प्रदान करती है। इस प्रकार, वायुमंडलीय संवहन पृथ्वी के वायुमंडल में द्रव यांत्रिकी और ऊष्मा हस्तांतरण को जोड़ता है। हालाँकि, शास्त्रीय द्रव यांत्रिकी समस्याओं के विपरीत, जिसके लिए संख्यात्मक समाधान सीधे हैं, भूभौतिकीय द्रव गतिकी प्रवाह की जटिल त्रि-आयामी और समय-निर्भर प्रकृति और पानी के चरण परिवर्तन के कारण एक चुनौती प्रस्तुत करती है। संवहन शुष्क या नम, उथला या गहरा हो सकता है, प्रत्येक अपनी अलग-अलग विशेषताएं प्रदर्शित करता है।

यह अध्ययन गहरे संवहन पर केंद्रित है, जिसमें नम हवा का अधिक ऊंचाई तक चढ़ना और विशाल क्यूम्यलोनिम्बस बादलों का निर्माण शामिल है। गहरे संवहनीय बादल पृथ्वी के जल और ऊर्जा चक्रों के नियमन में एक महत्वपूर्ण घटक के रूप में कार्य करते हैं। गहरा संवहन अक्सर उष्णकटिबंधीय महासागरों पर होता है और उष्णकटिबंधीय क्षेत्रों में स्थानिक-अस्थायी पैमाने की एक श्रृंखला में भिन्न होता है, जो मौसम और जलवायु को प्रभावित करता है। भारतीय संदर्भ में, गहन संवहन जो आमतौर पर जून से सितंबर के

ग्रीष्मकालीन मानसून के मौसम के दौरान होता है, भारतीय उपमहाद्वीप में वर्षा के वितरण के लिए जिम्मेदार एक मौलिक प्रक्रिया है। ग्रीष्म मानसून के महीनों में, बंगाल की खाड़ी क्षेत्र में आमतौर पर गहरे संवहनीय बादल बनते हैं। यद्यपि ये बादल अन्य महीनों में भी आते हैं, परंतु वर्तमान अध्ययन में हमारा ध्यान मानसून के महीनों के दौरान के केस स्टडी पर केंद्रित है। इस क्षेत्र में बड़े पैमाने पर पर्यावरण के साथ संवहन के दौरान गहन संवहन को समझना, संवहन सिमुलेशन में सुधार के लिए महत्वपूर्ण है। इन घटनाओं को सटीक रूप से समझने के लिए रुचिकर क्षेत्रों से संबंधित अवलोकन संबंधी डेटा प्राप्त करना आदर्श दृष्टिकोण है। हालाँकि, हर बिंदु के लिए अवलोकन संबंधी डेटा प्राप्त करना संभव नहीं है। इसलिए, कम्प्यूटेशनल अध्ययन इस अंतर को भरने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। इन गहरे बादलों का अनुकरण करने की क्षमता के अलावा, ग्लोबल वार्मिंग की पृष्ठभूमि को देखते हुए, जो वायुमंडलीय प्रक्रियाओं की गतिशीलता और ऊष्मप्रवैगिकी में परिवर्तन का कारण बन रही है, गहरे बादलों पर वार्मिंग के प्रभाव को समझना एक महत्वपूर्ण शोध प्रश्न है, और इसे संबोधित करने से भविष्य की जटिल संवहनीय प्रणालियों की हमारी समझ बढ़ेगी। इस थीसिस का व्यापक उद्देश्य उच्च-रिज़ॉल्यूशन मॉडल का उपयोग करके सक्रिय मानसून चरण के दौरान बंगाल की खाड़ी पर वायुमंडलीय संवहन को समझना है। इस मॉडल को अपनाकर, अध्ययन का उद्देश्य ऊपर बताई गई कुछ चुनौतियों का समाधान करना है, प्रत्येक पहलू की अलग-अलग जांच करना और प्राप्त ज्ञान का अनुवाद संभावित भविष्य में वार्मिंग के प्रभाव का मूल्यांकन करने के लिए किया जाएगा। थीसिस के पहले भाग में, हम बंगाल की खाड़ी क्षेत्र पर एक अध्ययन स्थापित करने के लिए एक बड़े भंवर सिमुलेशन मॉडल का उपयोग करते हैं ताकि सक्रिय संवहन चरण के दौरान गहरे संवहनीय बादलों का सफलतापूर्वक अनुकरण किया जा सके और इन बादलों की गतिशील विशेषताओं को समझा जा सके। अवलोकन डेटा की कमी के कारण, ये सिमुलेशन ERA5 (पांचवीं पीढ़ी के यूरोपीय केंद्र के लिए मध्यम-श्रेणी मौसम पूर्वानुमान वायुमंडलीय पुनर्विश्लेषण) डेटा पर आधारित हैं। परिणाम दर्शाते हैं कि सक्रिय चरण के

दौरान क्षेत्र में बनने वाले बादल गहरे और वर्षा करने वाले प्रकृति के होते हैं। यह देखते हुए कि सिमुलेशन ERA5 डेटा के साथ मजबूर हैं, परिणाम संकेत देते हैं कि सिमुलेशन ने क्लाउड हाइड्रोमेटेओर्स की ऊर्ध्वाधर संरचना को सटीक रूप से पुनः प्रस्तुत किया, जो ERA5 डेटा में देखी गई समानताओं को प्रदर्शित करता है। ये बादल लगभग 18 किमी की ऊंचाई तक पहुंचते हैं और आमतौर पर मानसून के मौसम के दौरान इस क्षेत्र में देखे जाते हैं। गर्मी और नमी के अशांत प्रवाह सक्रिय संवहन घटना के दौरान अशांत वातावरण का विवरण प्रदान करते हैं। क्लाउड कोर फ्रील्ड सशर्त रूप से औसत हैं, और उनके गुण साहित्य में बताए गए गहरे संवहनीय बादलों के साथ अच्छी तरह से संरेखित हैं।

इसके बाद, हम संवहन विकास पर सीमांत स्थितियों के प्रभाव का पता लगाते हैं। सीमांत स्थितियों के रूप में बड़े पैमाने पर बल के साथ किए गए सिमुलेशन गहरे संवहन घटना को पकड़ने में उनके महत्व पर जोर देते हैं। ये बल संवहन विकास और संगठन पर बड़े वायुमंडलीय स्थितियों के प्रभाव का प्रतिनिधित्व करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। हम बड़े पैमाने पर बल सिमुलेशन से देखते हैं कि ये बल संवहन विकास का अनुकरण करने के लिए आवश्यक हैं। हम यह भी जांचते हैं कि डोमेन का आकार संवहन विकास को कैसे प्रभावित करता है और देखते हैं कि गहरे संवहन को पकड़ने के लिए छोटे डोमेन अपर्याप्त हैं। हम देखते हैं कि छोटे डोमेन में, डोमेन जितने बड़े आकार के बादल बनते हैं और फिर टूट जाते हैं और यह प्रक्रिया फिर से जारी रहती है। इस प्रकार, सिमुलेशन को स्थिर अवस्था तक पहुंचने की अनुमति नहीं दी गई। इसलिए, गहरे संवहनीय बादलों का अनुकरण करने के लिए बड़े डोमेन आकार की आवश्यकता होती है। इसके अतिरिक्त, हमने ग्रिड आकार संवेदनशीलता की जांच की और पाया कि 125 मीटर क्षैतिज ग्रिड आकार की तुलना में, 250 मीटर ग्रिड आकार गहरे संवहनीय बादलों के अनुकरण के लिए उपयुक्त है, क्योंकि दोनों मामलों के परिणाम एक जैसे हैं। इसके अलावा 250 मीटर ग्रिड 125 मीटर ग्रिड की तुलना में कम्प्यूटेशनल समय को 4 गुना कम कर देगा।

अंत में, हम बड़े भंवर सिमुलेशन का उपयोग करके बंगाल की खाड़ी के ऊपर गहरे संवहनीय बादलों पर वार्मिंग के प्रभाव का अध्ययन करते हैं। आधार मामले से वायुमंडलीय और समुद्री सतह दोनों के तापमान में वृद्धि करके, हम देखते हैं कि वार्मिंग गहरी संवहन तीव्रता को बढ़ाती है, जिससे संवहन उपलब्ध संभावित ऊर्जा (CAPE) मान अधिक हो जाते हैं और वर्षा में वृद्धि के साथ अधिक तीव्र संवहन प्रणाली बन जाती है। गर्म वायुमंडल के परिणामस्वरूप तरल जल पथ का मान अधिक होता है, जो गहन संवहन को तीव्र करता है। बादलों के शीर्ष के गर्म होने की स्थिति में ऊपर उठने से बादलों के हाइड्रोमेटियोर की तीव्रता और बढ़ जाती है। इन सिमुलेशनों से हम पाते हैं कि भविष्य में गर्मी के कारण बंगाल की खाड़ी क्षेत्र में अधिक तीव्र संवहनीय घटनाएँ होंगी, और इससे पूरे क्षेत्र में अधिक चक्रवाती गतिविधियाँ हो सकती हैं। ये परिणाम गहन संवहन की जटिल गतिशीलता और विभिन्न कारकों के प्रति इसकी प्रतिक्रिया के बारे में मूल्यवान जानकारी प्रदान करते हैं, जिन्हें भारत केंद्रित जलवायु मॉडल के विकास में लागू किया जा सकता है।

# TABLE OF CONTENTS

<b>CERTIFICATE.....</b>	<b>i</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENTS .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>LIST OF FIGURES .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LIST OF TABLES .....</b>	<b>xviii</b>
<b>NOMENCLATURE.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction and Motivation.....	2
1.2 Background .....	7
1.3 Objective and Scope of Present Thesis .....	16
1.4 Layout of Present Thesis .....	16
<b>2. GOVERNING EQUATIONS AND COMPUTATIONAL METHODOLOGY .....</b>	<b>17</b>
2.1 Modeling Convection.....	18
2.2 Large Eddy Simulation.....	22
<b>3. LARGE EDDY SIMULATION STUDY OF CONVECTIVE CLOUDS OVER BAY OF BENGAL.....</b>	<b>34</b>
3.1 Introduction .....	35
3.2 Methodology .....	37
3.3 Results and Discussion.....	41

3.4 Summary .....	55
<b>4. SENSITIVITY OF LES TO LARGE-SCALE FORCINGS, DOMAIN AND GRID SIZE, AND INITIAL CONDITIONS .....</b>	<b>57</b>
4.1 Introduction .....	58
4.2 Data and Methodology .....	60
4.3 Results and Discussion.....	62
4.4 Summary .....	76
<b>5. IMPACT OF WARMING ON DEEP CONVECTIVE CLOUDS OVER BOB .....</b>	<b>78</b>
5.1 Introduction .....	79
5.2 Data and Methodology .....	81
5.3 Results and Discussion.....	84
5.4 Summary .....	92
<b>6. CONCLUSIONS .....</b>	<b>94</b>
6.1 Conclusions .....	95
<b>REFERENCES.....</b>	<b>98</b>
<b>APPENDIX.....</b>	<b>110</b>
<b>A) ATMOSPHERIC VARIABLES.....</b>	<b>110</b>
<b>PUBLICATIONS FROM THE THESIS .....</b>	<b>116</b>
<b>BRIEF BIO-DATA OF AUTHOR .....</b>	<b>117</b>

## LIST OF FIGURES

<b>Figure 2.1:</b> Major natural and anthropogenic processes and influences on the climate system addressed in ESM (Source: <a href="https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/">https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/</a> ).....	<b>19</b>
<b>Figure 2.2:</b> Regional Climate Model (source <a href="https://climate4impact.eu/impactportal/downscaling">https://climate4impact.eu/impactportal/downscaling</a> ) .....	<b>20</b>
<b>Figure 2.3:</b> Location of the simulation domain, averaging domain, and observation site over the map in a black box. In the zoomed view, the outer box shows the averaging domain for large-scale forcings, the inner box shows the simulation domain, and the black circle shows the radiosonde location.....	<b>30</b>
<b>Figure 3.1:</b> Large scale wind flows (vectors) and cloud fraction (color contour) during the weak convection. ....	<b>38</b>
<b>Figure 3.2:</b> Comparison between radiosonde data (solid line) and ERA5 data (dashed lines) for 24-hour averaged data (a) specific humidity, (b) potential temperature, (c) u-velocity and (d) v-velocity.....	<b>39</b>
<b>Figure 3.3:</b> Large scale a) Advective tendencies of moisture, potential temperature and b) vertical velocity to force LES. ....	<b>40</b>
<b>Figure 3.4:</b> Panel plot of brightness temperature from NOAA for 14-15 August 1999. ....	<b>42</b>
<b>Figure 3.5:</b> Time evolution of (a) domain averaged liquid water path (LWP) and (b) contour plot of liquid water content (g/kg). ....	<b>43</b>
<b>Figure 3.6:</b> Time series comparison of CM1 precipitation rate (solid line) with ERA5 (dashed line); here red and blue lines indicate the simulation with 125 m and 250 m grid sizes, respectively. .....	<b>44</b>

**Figure 3.7:** Time evolution comparison of horizontally-averaged CAPE (J/kg), CIN (J/kg), and liquid water path (LWP, g/m<sup>2</sup>) for 125 m and 250 m simulations..... 46

**Figure 3.8:**The time evolution comparison of horizontally-averaged cloud liquid/ice profiles for 125 m and 250 m simulations. .... 47

**Figure 3.9:** Mean profile averaged over the last 4 hours of (a) potential temperature, (b) specific humidity, (c) u-velocity and (d) v-velocity. The red and blue lines are the time-averaged profiles for 125 m and 250 m simulations, respectively, while the grey lines indicate the initial profiles.48

**Figure 3.10:** Mean hydrometeor profile averaged over the last 4 hours of (a) snow, (b) graupel, (c) cloud-ice, (d) cloud-water, and (e) rain. The red and blue lines are the time-averaged profiles for 125 m and 250 m simulations, respectively, while the grey lines indicate profiles from ERA5 data..... 49

**Figure 3.11:** Mean profiles averaged over the last 4 hours of (a) vertical velocity variance, (b) turbulence potential temperature flux, and (c) turbulence flux of total water. The red and blue lines are the time-averaged profiles for 125 m and 250 m simulations, respectively. .... 52

**Figure 3.12:** Profiles of (a) core vertical velocity (m/s) and (b) core-mass flux (m/s). The cyan dots represent 50 percentile and the red dots represent 99 percentile..... 53

**Figure 3.13:** Profiles of (a) core average vertical velocity (m/s) and b) core-condensate (g/kg) in the cloud core averaged over the last 4 hours. The solid black lines are the time averaged profile from 250 m simulation, while the grey lines are from K2009..... 54

**Figure 4.1:**Large scale wind flows (vectors) and cloud fraction (color contour) during the weak convection. .... 62

**Figure 4.2:** Comparison of the last four hours and horizontally averaged atmospheric state profiles of (a) Potential temperature, (b) Specific humidity, (c) u-velocity, and (d) v-velocity, here red, blue

and black lines indicate simulations with no external forcings, with forcings and without wind nudging, and with forcings plus wind nudging, respectively. .... 64

**Figure 4.3:** Time evolution comparison of (a) Liquid water path ( $\text{g/m}^2$ ), (b) CAPE ( $\text{J/kg}$ ), (c) Precipitation rate ( $\text{mm/day}$ ), (d) Sensible heat flux ( $\text{W/m}^2$ ), and (e) Latent heat flux ( $\text{W/m}^2$ ); here red, blue and black lines indicate simulations with no external forcings, with forcings and without wind nudging, and with forcings plus wind nudging, respectively. .... 65

**Figure 4.4:** Time evolution comparison of (a) Liquid water path ( $\text{g/m}^2$ ), (b) CAPE ( $\text{J/kg}$ ), (c) Precipitation rate ( $\text{mm/day}$ ), (d) Sensible heat flux ( $\text{W/m}^2$ ), and (e) Latent heat flux ( $\text{W/m}^2$ ); here black, blue and red lines indicate simulations of  $25 \times 25 \text{ km}^2$  with 125 m, 250 m and 500 m grid size, respectively. .... 68

**Figure 4.5:** Time evolution comparison of (a) Liquid water path ( $\text{g/m}^2$ ), (b) CAPE ( $\text{J/kg}$ ), (c) Precipitation rate ( $\text{mm/day}$ ), (d) Sensible heat flux ( $\text{W/m}^2$ ), and (e) Latent heat flux ( $\text{W/m}^2$ ); here black, blue and red lines indicate simulations of  $50 \times 50 \text{ km}^2$  with 125 m, 250 m and 500 m grid size, respectively. .... 70

**Figure 4.6:** Initial profile of (a) potential temperature; (b) specific humidity; (c) u-velocity; and (d) v-velocity from ERA5 compared with observations (BOBMEX). .... 71

**Figure 4.7:** Time evolution of liquid water path. .... 72

**Figure 4.8:** Contour plot for the time evolution of horizontally averaged cloud liquid water content. .... 73

**Figure 4.9:** Cloud core profiles of (a) vertical velocity and (b) cloud condensate. .... 74

**Figure 4.10:** Vertical profile of entrainment rate variation with height. .... 75

**Figure 5.1:** Initial profiles of (a) potential temperature, (b) specific humidity, (c) u-velocity, and (d) v-velocity for base case (black line), 2 K increase (blue line) and 4 K increase (red line). .... 83

**Figure 5.2:** Time evolution comparison of (a) Liquid water path ( $\text{g/m}^2$ ), (b) CAPE ( $\text{J/kg}$ ), (c) Precipitation rate ( $\text{mm/day}$ ), (d) Sensible heat flux ( $\text{W/m}^2$ ), and (e) Latent heat flux ( $\text{W/m}^2$ ); here red, blue and black lines indicate simulations with 4 K warming, with 2 K warming, and the base case, respectively. .... **85**

**Figure 5.3:** Mean hydrometeor profile averaged over the last 4 hours of (a) snow, (b) graupel, (c) cloud-ice, (d) cloud-water, and (e) rain; here red, blue, and black lines indicate simulations with 4 K warming, with 2 K warming, and the base case, respectively. .... **88**

**Figure 5.4:** Comparison of mean profile averaged over the last 4 hours of cloud core (a) vertical velocity variance, (b) potential temperature flux, (c) total water flux, and (d) total water variance; here red, blue and black lines indicate simulations with 4 K warming, with 2 K warming, and the base case, respectively. .... **89**

**Figure 5.5:** Comparison of mean profile averaged over the last 4 hours of cloud core (a) average velocity, (b) maximum velocity, and (c) condensate for the warming simulation; here red, blue, and black lines indicate simulations with 4 K warming, with 2 K warming, and the base case, respectively. .... **91**

## LIST OF TABLES

<b>Table 3.1:</b> Details of numerical simulation.....	<b>40</b>
<b>Table 4.1:</b> Details of forcing simulations.....	<b>63</b>
<b>Table 4.2:</b> Details of domain and grid size sensitivity simulations. ....	<b>67</b>
<b>Table 5.1:</b> Details of warming Simulations .....	<b>84</b>

# NOMENCLATURE

$p$	Pressure
$e$	Subgrid turbulence kinetic energy
$t$	Time
$u_i, u, v, w$	Wind components in x, y, and z, $i \in \{1, 2, 3\}$
$x_i, x, y, z$	Cartesian coordinates, $i \in \{1, 2, 3\}$
$c_p$	Specific heat at constant pressure
$c_v$	Specific heat at constant volume
$f$	Coriolis parameter
$g$	Gravitational acceleration
$K_m$	Eddy viscosity
$K_h$	Eddy diffusivity
$C_m, C_h, C_\varepsilon$	Parameters for turbulence closure
$N_m$	Brunt-Vaisala frequency
$N_q$	Number concentration for hydrometeor
$N_x$	Rayleigh damping on $u_i, \theta$ and $\pi$
$S_x$	Sink and source terms in governing equations with $x \in \{\theta, q_x, \pi\}$
$q_\chi$	Mixing ratio, where $\chi \in \{v, l, i\}$

## Greek Symbols

$\varepsilon$	<i>Entrainment rate</i>
$\theta$	<i>Potential temperature</i>

$\rho$	Density
$\pi'$	Nondimensional pressure
$\delta_{i3}$	Kronecker delta
$\varepsilon_{ijk}$	Alternating stress tensor
$\tau_{ik}$	Turbulent stress tensor
$\tau_k^q, \tau_k^\theta$	Subgrid turbulent fluxes for scalars
$\varphi_c$	Cloud core variable

### Abbreviation

ABL	Atmospheric Boundary Layer
AR6	Assessment Report 6
BoB	Bay of Bengal
BOBMEX	Bay of Bengal Monsoon Experiment
CAPE	Convective Available Potential Energy
CIN	Convective Inhibition
CM1	Cloud Model 1
COSMIC	Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate
CRM	Cloud Resolving Model
ERA5	ECMWF Reanalysis 5
GCM	Global Climate Model
INSAT	Indian National Satellite
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
LES	Large Eddy Simulation

LWP	Liquid Water Path
METEOSAT	Meteorological Satellite
OLR	Outgoing Longwave Radiation
PRATE	Precipitation Rate
RCM	Regional Climate Model
SCM	Single Column Model
SGS	Subgrid Scale
SST	Sea Surface Temperature
TKE	Turbulence Kinetic Energy
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WENO	Weighted Essentially Non-Oscillatory
WRF	Weather Research and Forecasting