REGIONAL ANALYSIS AND SPATIOTEMPORAL BEHAVIOR OF SOIL MOISTURE IN PARTITIONING THE HEAT FLUXES: A THEORY BASED ON MODEL

ANIKET CHAKRAVORTY

DEARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2018

REGIONAL ANALYSIS AND SPATIOTEMPORAL BEHAVIOR OF SOIL MOISTURE IN PARTITIONING THE HEAT FLUXES: A THEORY BASED ON MODEL

by

Aniket Chakravorty

Department of Civil Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

Indian Institute of Technology Delhi

APRIL 2018

DEDICATED TO

My Family

&

My Teachers

Certificate

This is to certify that the dissertation entitled "**REGIONAL ANALYSIS AND SPATIOTEMPORAL BEHAVIOR OF SOIL MOISTURE IN PARTITIONING THE HEAT FLUXES: A THEORY BASED ON MODEL**" which is being submitted by **Mr. Aniket Chakravorty**, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in Civil Engineering, to the Indian Institute of Technology Delhi is a record of bonafide work carried out by him under our sustained guidance and supervision. The dissertation has reached the standard fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree. The results embodied in the dissertation have not been submitted to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

Prof. B. R. Chahar
Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi – 110016

Prof. O. P. Sharma
Professor
Centre for Atmospheric Sciences
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi – 110016

Dr. Dhanya C. T.
Assistant Professor
Department of Civil Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi - 110016

Acknowledgements

The successful completion of any work that we take up in life is never an individual effort. This thesis is no different. I would like to begin with thanking my supervisors, Prof. B. R. Chahar, Prof. O. P. Sharma, and Dr. Dhanya C. T. who have guided me throughout this work with not just valuable scientific suggestions and moral encouragement, but being patient with me when I am stuck at some technical issue and unable to produce results. Without their support and encouragement, to think big and push my intellectual boundaries, this work would not have been possible. I am thankful to Prof. B. R. Chahar and Prof. O. P. Sharma for introducing me to the world of land-atmosphere interactions. I am particularly thankful to Prof. O. P. Sharma for sharing his room with me, valuable suggestions during the course of my work and many coffee breaks. I would also like to thank Dr. Dhanya C. T. for encouraging me, pushing me to think big and giving a proper direction to my research. I would like to thank Dr. Dhanya C. T. for all the mock presentations as those helped a lot in improving my skill as a presenter and an orator. I consider myself to be very lucky to have found such great supervisors.

I would like to take this opportunity to thank the successive Head of Departments of Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi for providing me with a comfortable work place environment and late night working hours. I would also like to thank my SRC (Student Research Committee) members - Prof. Mukesh Khare, Prof. H. C. Upadhayaya, and Prof. Geetam Tiwari - for their valuable suggestions during the course of this work. I would also like to thank all the faculties and staff of Department of Civil Engineering, especially, N. R. Gehlot and Rajveer Aggarwal.

I am thankful to my family for being patient and for all their encouragement. I am thankful to my brother for being there when I needed him. I would like to thank my parents who inculcated in me the spark of inquisitiveness from the very childhood, which had a very important role to play in all the questions, that I asked myself while working on this thesis. I would like to thank my father for encouraging me to follow my heart.

At last but not the least, I am indebted to all my friends at IIT Delhi. I write IIT Delhi because naming all of them here would take up more space than is allotted. However, I would still like to write a few very important names who have become my family away from family. I would like to thank TK, Ram, Surendra for being the best of friends. I would also like to thank Anupriya, Pawan, Jatin, Satish, Himanshu Tyagi for all the laughter I can imagine in a lifetime and always being there to cheer me up. I am also very lucky to have met Himanshu Pratap Singh, Nikhil, Sushobhit, and Vinna during the course of my PhD. Both fruitful and unfruitful discussions that we had had helped a lot. I would especially like to thank Manjula for being the best of friends, more than one can ever hope to have. In the present day-and-age no research work is possible without Google, and no thesis is possible without Microsoft Word (definitely not mine), so I would like to thank both of them.

Finally, I would like to thank Ministry of Earth Sciences, Government of India for funding this research work and my scholarship. And it goes without saying this work would not have been possible without the vast computing resource made available by IIT Delhi.

New Delhi *Aniket Chakravorty*

Abstract

The interaction between land and atmosphere is complex and non-linear in nature. The mode of this interaction between land and atmosphere is governed by fluxes. It depends on many controlling factors that are both dynamic and static in nature. The work carried out in this thesis tried to investigate the spatiotemporal behavior of soil moisture and turbulent heat fluxes, viz., latent and sensible heat fluxes, under the influence of these controlling factors and understand the role of soil moisture in the proportionate partitioning of the turbulent heat fluxes. To that end a land surface modeling infrastructure, viz., CESM-CLM version-4.5 (CLM4.5) in standalone mode, was used. Such an analysis required the modeling system to produce valid spatiotemporal behavior of land surface states. But the evaluation of a coarse resolution model simulation with finer resolution observation has its own set of challenges. This prompted the introduction of a new set of evaluation metrics that are based on temporal dynamics of the system. A satellite based soil moisture product was used as the observation system because of a paucity of *in-situ* measurements over India. Since, satellites are also known to have its own error characteristics, prior to the model evaluation, an evaluation of the satellite soil moisture products was also undertaken. Based on this, the thesis was divided into three broad objectives: 1. Evaluation of satellite observation systems, 2. Evaluation of the modeling infrastructure, and 3. Spatiotemporal evolution of land surface states. These three objectives form the three main chapters of this work, which are discussed in brief below.

Chapter 2 discusses the evaluation of available satellite soil moisture products over India for an overlapping time period from 2010 to 2013. Four available satellite products were evaluated with a soil moisture reanalysis product from Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications-Land (MERRA-L). Under the aegis of the European

Space Agency-Climate Change Initiative (ESA-CCI) program, three multi-decadal soil moisture datasets were generate by merging all available satellite soil moisture products, viz., all-active-merged product: CCI-A; all-passive-merged product: CCI-P; and all-active-passive-merged product: CCI-C. They were compared with ESA's Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) product. A two-stage evaluation strategy was employed here. First a preliminary time series and correlation analysis was carried out followed by a novel error estimation methodology called Triple Collocation. It was observed that over India the ascending swath of SMOS had higher error than the descending, which prompted the use of the descending swath for further analysis. From both the preliminary time series and correlation analysis and triple collocation analysis, it was observed that active satellites have a higher performance over India except for the western arid and semi-arid regions. This was followed by the CCI-C and then by CCI-P. SMOS showed comparatively high values of error than the rest of the products. However, as SMOS is an L-band sensor compared to ESA-CCI products that are retrieved from C-band sensors, it showed better performance over the dense vegetated regions of India. Based on this analysis, the ESA-CCI products were used for evaluating the modeled soil moisture over India.

Chapter 3 discusses the methodology and the subsequent results of the performance evaluation of CLM4.5 simulated soil moisture. Since, CLM4.5 is being run in a standalone mode with prescribed atmospheric forcings the impact of reanalysis precipitation on the model simulation was also investigated. Two reanalysis rainfall products were used, viz., CRU-NCEP and MERRA2. This inter-comparison analysis showed that the performance of CLM4.5 forced with MERRA2 was better than when it was forced with CRU-NCEP. Thus, the soil moisture simulation of CLM4.5 when forced with MERRA2 rainfall was used for the final performance evaluation of the modeled soil moisture. The performance evaluation methodology employed consists of temporal stability, auto-correlation function, and triple collocation analysis. Temporal stability and auto-correlation function analysis was used to check the congruency of spatiotemporal dynamics of soil moisture as observed by the model with respect to satellite and reanalysis. This analysis suggested that CLM4.5 is able to capture the spatial and temporal dynamics of observed soil moisture. However it showed high values of random error as estimated from triple collocation.

Chapter 4 demonstrates the behavior of spatiotemporal evolution of soil moisture and the turbulent heat fluxes over India. This is achieved by decomposing them into time-invariant, space-invariant time-variant and space-variant time-variant components. These relate to the control of dynamic and static factors on the behavior of land surface states. Thus, the three decomposed components are able to give the contribution of each controlling factor on the spatiotemporal variability of land surface states. It was observed that over India at a coarser resolution of 0.9°×1.25°, latent heat flux has a stronger response to soil moisture variability than sensible heat. It was also observed that both latent heat flux and soil moisture are dominated by static controls like soil type, topography, etc. However, sensible heat is dominated by the dynamic controls, like atmospheric condition, land surface temperature, etc. One of the intensions of this work was also to check the viability of a multi-variate land data assimilation system. And based on the results, it can be concluded that for a spatiotemporally variable region like India, a multi-variate data assimilation system is the right way forward. This thesis ends with a few suggestions as to the direction in which the work done in this thesis can be taken.

सामान्य सारांश

भूमि और वातावरण के बीच बातचीत जटिल और गैर-रैखिक प्रकृति में है। भूमि और वायुमंडल के बीच इस बातचीत का तरीका प्रवाह द्वारा शासित है। यह कई नियंत्रण कारकों पर निर्भर करता है जो प्रकृति में गतिशील और स्थैतिक दोनों हैं। इस थीसिस में किए गए काम ने मिट्टी की नमी और अशांत गर्मी प्रवाहकत्था, अर्थात, सुगम और समझदार गर्मी प्रवाहकत्ताओं के आकाशीय व्यवहार की जांच करने की कोशिश की, इन नियंत्रक कारकों के प्रभाव में और मिट्टी की नमी की भूमिका को समझने के लिए आनुपातिक विभाजन अशांत गर्मी प्रवाहकत्त्व इसके लिए एक भूमि सतह मॉडलिंग बुनियादी ढांचे, जैसे सीईएसएम- सीएलएम वी एरियन-4.5 (सीएलएम 4.5) स्टैंडअलोन मोड में इस्तेमाल किया गया था। इस तरह के एक विश्लेषण के लिए मॉडलिंग सिस्टम भूमि भूमि राज्यों के वैध spatiotemporal व्यवहार का उत्पादन करने की आवश्यकता है। लेकिन बेहतर रिज़ॉल्यूशन अवलोकन के साथ एक मोटे रिज़ॉल्यूशन मॉडल सिमुलेशन का मूल्यांकन चुनौतियों का अपना सेट है। इसने सिस्टम के लौकिक गतिशीलता पर आधारित मूल्यांकन मानकों के एक नए सेट की शुरुआत की। एक उपग्रह आधारित मिट्टी की नमी उत्पाद *इन-सीटू* की कमी की वजह से अवलोकन प्रणाली के रूप में इस्तेमाल किया गया था भारत पर माप चूंकि, मॉडल मूल्यांकन से पहले उपग्रहों की अपनी त्रुटि विशेषताओं के लिए भी जाना जाता है, उपग्रह मिट्टी नमी उत्पादों का मूल्यांकन भी किया गया था। इस पर आधारित, थीसिस को तीन व्यापक उद्देश्यों में विभाजित किया गया था: 1. उपग्रह अवलोकन प्रणाली का मूल्यांकन, 2. मॉडलिंग ढांचे का मूल्यांकन, और 3. भूमि सतह को प्रभावित करने वाली वस्तुएँ के Spatiotemporal विकास। ये तीन उद्देश्य इस काम के तीन मुख्य अध्याय हैं, जिन पर नीचे संक्षेप में चर्चा की गई है।

अध्याय 2, भारत से 2010 से 2013 तक एक अतिव्यापी समय अवधि के लिए उपलब्ध उपग्रह मिट्टी की नमी उत्पादों के मूल्यांकन की चर्चा करता है। चार उपलब्ध उपग्रह उत्पादों का मूल्यांकन मिट्टी की नमी रेनालिसिस उत्पाद के साथ आधुनिक युग पुनरावृत्त -विश्लेषण के लिए किया गया था, अनुसंधान और अनुप्रयोग के लिए विश्लेषण एस- लैंड (मेरा एल)। यूरोपीय स्पेस एजेंसी- चैलेंज चेंज इनिशिएटिव (ईएसए-सीसीआई) कार्यक्रम के तत्वावधान में , तीन बहु-दशमांश मिट्टी की नमी डेटासेट सभी उपलब्ध उपग्रह मिट्टी के नमी उत्पादों, जैसे, सभी सक्रिय-मर्ज किए गए उत्पादों को मिलाकर जेनरेट होते हैं: सीसीआई-ए ; सभी निष्क्रिय-विलय उत्पाद: सीसीआई-पी; और सभी सक्रिय-निष्क्रिय-विलय उत्पाद: सीसीआई-सी। उनकी तुलना ईएसए की मृदा नमी महासागर लवणता (एसएमओएस) पीआरoduct के साथ की गई थी। दो- चरण मूल्यांकन रणनीति यहां कार्यरत थी। पहले एक प्रारंभिक समय श्रृंखला और सहसंबंध विश्लेषण के बाद ट्रिपल कोलोशन नामक एक उपन्यास त्रुटि अनुमान पद्धति के बाद किया गया। यह देखा गया था कि भारत भर में एसएमओएस के आरोही स्वस्थ में उतरने की तुलना में अधिक त्रुटि थी, जिसने आगे के विश्लेषण के लिए अवरोही स्वैथ के उपयोग को प्रेरित किया। प्रारंभिक समय दोनों से श्रृंखला और सहसंबंध विश्लेषण और ट्रिपल कोलोकेशन विश्लेषण, यह देखा गया था कि पश्चिमी शुष्क और अर्द्ध शुष्क क्षेत्रों को छोड़कर सक्रिय उपग्रहों का भारत पर उच्च प्रदर्शन होता है। इसके बाद सीसीआई-सी और फिर सीसीआई-पी द्वारा किया गया। एसएमओएस ने बाकी उत्पादों की तुलना में त्रुटि के अपेक्षाकृत उच्च मूल्य दिखाए। हालांकि, चूंकि एसएमओएस ई-सीएसआई उत्पादों की तुलना में एल-बैंड सेंसर है जो सी-बैंड सेंसर से पुनर्प्राप्त किया जाता है, यह भारत के घने वनस्पति क्षेत्रों पर बेहतर प्रदर्शन दिखाता है। इस विश्लेषण के आधार पर, ईएसए-सीसीआई उत्पादों का इस्तेमाल भारत पर मॉडलिंग मिट्टी नमी का मूल्यांकन करने के लिए किया गया था।

अध्याय 3 पद्धति और सीएलएम 4.5 अनुरूपित मिट्टी नमी के प्रदर्शन मूल्यांकन के बाद के परिणामों पर चर्चा करता है। चूंकि, सीएलएम 4.5 को निर्धारित वायुमंडलीय फोर्किंग के साथ स्टैंडअलोन मोड में चलाया जा रहा है, मॉडल सिमुलेशन पर रीनालिसिस वर्षा के प्रभाव की भी जांच की गई थी। दो

पुनर्नवीनीकरण वर्षा उत्पादों का उपयोग किया गया, जैसे सीआरयू-एनसीईपी और मेरा 2। इस अंतर - तुलना विश्लेषण से पता चला कि एमईआरआरए 2 के साथ मजबूर सीएलएम 4.5 का प्रदर्शन बेहतर था। इस प्रकार, एमएलआरए 2 वर्षा के साथ मजबूर होने पर सीएलएम 4.5 की मिट्टी नमी सिमुलेशन का इस्तेमाल मॉडलिंग मिट्टी नमी के अंतिम प्रदर्शन मूल्यांकन के लिए किया गया था। नियोजित निष्पादन मूल्यांकन पद्धति में अस्थायी स्थिरता, ऑटो-सहसंबंध समारोह और ट्रिपल कोलेशन विश्लेषण शामिल हैं। सैद्धांतिक स्थिरता और ऑटो-सहसंबंध फ़ंक्शन विश्लेषण का उपयोग उपग्रह और रीनालिसिस के संबंध में मॉडल द्वारा मनाए गए अनुसार मिट्टी की नमी के स्पीतिओमपोराल गतिशीलता की अनुकूलता को देखने के लिए किया गया था। इस विश्लेषण ने सुझाव दिया है कि CLM4.5 मनाया मिट्टी की नमी की स्थानिक और लौकिक गतिशीलता को हासिल करने में सक्षम है। हालांकि यह ट्रिपल कॉलोकेशन से अनुमानित यादृच्छिक त्रुटि के उच्च मूल्य दिखाता है।

अध्याय 4 मृदा नमी के मकड़ी के विकास और भारत में उथल-पुथल गर्मी के प्रवाह के व्यवहार को दर्शाता है। यह उन्हें समय-परिवर्तनीय, अंतरिक्ष-परिवर्तनीय समय-संस्करण और अंतरिक्ष-भिन्नता समय-संस्करण घटकों में विघटित करके हासिल किया जाता है। ये भूमि सतह राज्यों के व्यवहार पर गतिशील और स्थैतिक कारकों के नियंत्रण से संबंधित हैं। इस प्रकार, तीन विघटित घटकों भूमि सतह राज्यों के spatiotemporal परिवर्तनशीलता पर प्रत्येक नियंत्रक कारक का योगदान देने में सक्षम हैं। यह देखा गया कि भारत में 0.9 डिग्री सेल्सियस 1.25 डिग्री के एक कोरसर रिज़ॉल्यूशन पर, गर्मी की गर्मी की तुलना में अव्यक्त गर्मी प्रवाह में मिट्टी नमी परिवर्तनीयता के लिए एक मजबूत प्रतिक्रिया है। यह भी पाया गया कि दोनों गर्भ धारण और मिट्टी की नमी स्थिर नियंत्रणों से प्रभावित होती है जैसे कि मिट्टी के प्रकार, स्थलाकृति, आदि। हालांकि, समझदार गर्मी पर गतिशील नियंत्रण, वायुमंडलीय स्थिति, भूमि सतह के तापमान, आदि का प्रभाव होता है। इस काम का एक बहु-विविध भूमि डेटा आकलन प्रणाली की व्यवहार्यता की जांच भी करना था। और परिणामों के आधार पर, यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि भारत जैसे एक स्थानिक रूप से परिवर्तनीय क्षेत्र के लिए, एक बहु-विविध डेटा आकलन प्रणाली सही

तरीका है। यह थीसिस कुछ सुझावों के साथ समाप्त होता है जिस दिशा में इस थीसिस में किए गए काम को लिया जा सकता है।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

SM	*Soil Moisture*
SHF	*Sensible Heat Flux*
LHF	*Latent Heat Flux*
DA	*Data Assimilation*
LST	*Land Surface Temperature*
CLM45	*Community Earth System Model version-1.2.0-Commuity Land Model version-4.5*
ESA-CCI	*European Space Agency's – Climate Change Initiative*
CCI-A/CCI-ACT	*A merged product of all active C-band satellite soil moisture products*
CCI-P/CCI-PAS	*A merged product of all passive C-band satellite soil moisture products*
CCI-C/CCI-COMBINED	*A merged product of all active and all passive C-band satellite soil moisture products.*
TC	*Triple Collocation*
$RMSE_{TC}$	*Root Mean Square Error estimated using Triple Collocation*
MLR	*Multiple Linear Regression*
LSM	*Land Surface Model*
CRUNCEP	*Climate Research Unit-National Centers for Environmental Prediction*
MERRA2	*Modern Era Retrospective-analysis for Research and Application version-2*
MERRA-L	*Modern Era Retrospective-analysis for Research and Application-Land*
CLM-CRUNCEP	*CLM45 forced with CRUNCEP rainfall forcing*
CLM-M2	*CLM45 forced with MERRA2 rainfall forcing*
MRD	*Mean Relative Difference*

SDRD	*Standard Deviation of Relative Difference*
RD	*Relative Difference*
TS	*Temporal Stability*
ACF	*Auto-Correlation Function*
THF	*Turbulent Heat Flux*
SSM	*Satellite Soil Moisture*
SMOS	*Soil Moisture Ocean Salinity*
IMD	*India Meteorological Department*
$fRMSE_{TC}$	*fractional-RMSE using Triple Collocation*
RFI	*Radio Frequency Interference*
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
LDAS	*Land Data Assimilation System*
IC	*Initial Condition*
CPC	*Climate Prediction Center*
CMAP	*CPC merged Analysis Precipitation*