

Dissertation ETH No. 25882

Precipitation and drought persistence in global climate models and observations

A thesis submitted to attain the degree of
Doctor of Sciences of ETH Zurich
Dr. sc. ETH Zurich

presented by
Heewon Moon

Master of Science in Engineering
Sungkyunkwan University
born on 22.11.1990
citizen of Republic of Korea

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne
Dr. Lukas Gudmundsson
Dr. Benoit P. Guillod
Prof. Dr. Hayley J. Fowler

2019

Abstract

Prolonged spells with too much or too little precipitation can lead to extreme events with severe socioeconomic and ecological impacts. Aside from the magnitude of precipitation anomalies, the persistence of such anomalies also strongly contributes to the extent of their impacts as persistence of precipitation can drive persistence in other variables on land such as soil moisture, water storage, and temperature. Observational evidence supports that there have been changes in the distribution of dry and wet spells at daily to interannual time scales during the 20th century in several regions around the globe, some indicating an increase in the frequency of extremely prolonged droughts or increase in the frequency of heavy rainfall. Thus, it is of high importance to evaluate the capability of current general circulation models (GCMs) to simulate precipitation persistence in the past and present climate as it contributes to the uncertainty of future projections of the climate extremes.

In Chapter 2 of this thesis, the persistence of droughts and wet spells at monthly and annual scales are assessed using parameters of the statistical Markov model in multiple global observations and GCMs. Drought is in this study defined as negative precipitation anomaly and the persistence is calculated as a probability of a dry month (year) to be followed by another dry month (year), and persistence of wet spells, indicated by a positive precipitation anomaly, is assessed in the same manner. The transition probabilities were used to statistically simulate dry and wet spell lengths distributions are shown to be a good approximation of the observed distributions. Results show that GCMs systematically underestimate the observed dry and wet persistence at both monthly and annual scales, which is consistent with models' underestimating the risk of extremely prolonged droughts identified in the previous studies. Furthermore, the analysis of variance of the model errors suggests that some regions would require more extended time series or consistent observational reference to validate such an underestimation.

In the second study presented in this thesis, the approach used for the first study is applied to precipitation persistence at the daily time scale. The transition probabilities (dry-to-dry and wet-to-wet probabilities) were found to be less representative of the daily dry and wet spell length distributions. The analysis focuses on the long-term mean and interannual variability of

the two indices. Models overestimate the wet persistence with a relatively homogeneous spatial bias pattern. In particular, models tend to overestimate dry persistence in the Amazon and Central Africa but also underestimate dry persistence in several regions such as southern Argentina, western North America, and the Tibetan Plateau. The model errors are statistically robust despite the considerable spread across different precipitation data products. Compared to the results in the previous chapter, model errors of precipitation persistence at the daily scale have the opposite sign as those at monthly and annual scales. However, the contradicting signs of the error can at least be partially explained by a general underestimation of the interannual variability of both daily dry and wet persistence in GCM.

Chapter 4 assesses soil moisture-precipitation feedbacks in a large ensemble of GCM simulations under temporal and spatial perspectives and in terms of heterogeneity at the sub-daily time scale. Three different metrics were used to assess the feedback in each perspective. Positive (negative) spatial feedback indicates that afternoon rainfall occurs more frequently over the wetter (drier) land surface than its surroundings. A positive (negative) temporal feedback indicates preference over temporally wetter (drier) conditions and positive (negative) heterogeneity feedback indicates preference over more spatially heterogeneous (homogeneous) soil moisture conditions. Results highlight a dominantly positive spatial feedback in the models as opposed to observations. The temporal and heterogeneity feedbacks are better simulated on average, although inter-model variability is largest for these metrics. Soil moisture-precipitation feedback is one of the main processes in the field of land-climate interactions that could affect precipitation persistence. In the discussion, the possible collective influence of the model error of the three soil moisture-precipitation feedbacks is analyzed. The chapter concludes that such influence may lead to more localized precipitation persistence, both dry and wet, in models than in observations, which corresponds to results from previous studies.

The results of this thesis highlight systematic errors of current GCMs in simulating precipitation persistence across different time scales. The opposite signs of the model error at longer (monthly and yearly) scales and shorter (daily) scale indicate that the persistence of precipitation may not propagate linearly across the time scales and different processes underlie those. The results also show how the uncertainty in soil moisture-precipitation feedback contributes to the error especially at a daily scale. Additionally, in the three studies, observational uncertainty of precipitation persistence was commonly found to be comparable to model uncertainty in several regions indicating its importance for robust model evaluation.

Zusammenfassung

Fällt über lange Zeit zu viel oder zu wenig Niederschlag, kann dies zu Extremereignissen mit drastischen sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen führen. Neben der Grösse der Niederschlagsanomalien trägt auch deren Persistenz zum Ausmass ihrer Auswirkungen bei, da die Niederschlagspersistenz die Persistenz anderer Landvariablen wie Bodenfeuchte, Bodenwasserspeicherung und Temperatur beeinflussen kann. Beobachtungen legen nahe, dass es während des 20. Jahrhunderts Veränderungen in der Verteilung von Trocken- und Niederschlagsperioden auf täglicher und interannueller Zeitskala in verschiedenen Regionen der Erde gab. Tendenziell gab es einen Anstieg in der Frequenz von sehr langen Trockenperioden aber auch von Starkniederschlägen. Deshalb ist die Evaluation gängiger globaler Klimamodelle (GCMs) hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Simulation von Niederschlagspersistenz in der Vergangenheit und im aktuellen Klima sehr wichtig, da diese zu Unsicherheiten in zukünftigen Projektionen von Klimaextremen beiträgt.

In Kapitel 2 dieser Doktorarbeit wird die Persistenz von Trocken- und Niederschlagsperioden auf monatlichen und jährlichen Skalen in verschiedenen globalen Beobachtungsdatensätzen und GCMs betrachtet und als statistische Markov-Kette modelliert. Dabei wird Trockenheit als negative Niederschlagsanomalie definiert und Persistenz als Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein trockener Monat (ein trockenenes Jahr) auf einen trockenen Monat (trockenes Jahr) folgt. Die Persistenz von Niederschlagsperioden, die durch eine positive Niederschlagsanomalie definiert wird, wird auf dieselbe Art berechnet. Übergangswahrscheinlichkeiten werden verwendet, um die Länge der Trocken- und Niederschlagsperioden statistisch zu simulieren. Die resultierenden Verteilungen erweisen sich als gute Näherung der beobachteten Verteilungen. Die Resultate zeigen, dass GCMs die Persistenz von beobachteten Trocken- und Niederschlagsperioden sowohl auf monatlicher als auch auf jährlicher Zeitskala systematisch unterschätzen, konsistent mit der aus früheren Studien bekannten Unterschätzung des Risikos von extrem langer Trockenheit durch GCMs. Die Varianzanalyse der Modellfehler legt nahe, dass für einige Regionen längere Zeitserien beziehungsweise konsistente Beobachtungsreferenzen nötig wären, um solche Unterschätzungen zu validieren.

In Kapitel 3 wird die Niederschlagspersistenz in verschiedenen globalen

Beobachtungsdatensätzen und Klimamodellen auf täglicher Skala unter Verwendung desselben Markov-Modells wie im vorherigen Kapitel untersucht. Die Übergangswahrscheinlichkeiten (trocken zu trocken und nass zu nass) erweisen sich als weniger repräsentativ für die Verteilung der Trocken- und Niederschlagsperioden. Die Analyse beschäftigt sich mit dem langzeitlichen Mittelwert und der interannuellen Variabilität dieser beiden Indizes. Die Klimamodelle überschätzen die Persistenz von Niederschlagsperioden mit einem ziemlich homogenen geographischen Muster. Die Persistenz von Trockenperioden hingegen, wird im Amazonasgebiet und Zentralafrika überschätzt und im Süden von Argentinien, dem westlichen Nordamerika und dem Hochland von Tibet unterschätzt. Die Modellfehler sind statistisch robust, sogar in Anbetracht der beträchtlichen Streuung der verschiedenen Niederschlagsdatenprodukte. Verglichen mit den Ergebnissen des vorhergehenden Kapitels zeigen die Modellfehler der Niederschlagspersistenz auf täglicher Skala ein entgegengesetztes Vorzeichen zu den monatlichen und jährlichen Skalen. Allerdings kann das sich widersprechende Vorzeichen der Fehler zumindest teilweise darauf zurückgeführt werden, dass GCMs die interannuelle Variabilität und Persistenz generell unterschätzen.

Kapitel 4 untersucht die Wechselwirkung zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag im Tagesverlauf in einem grossen Ensemble von GCM-Simulationen. Dabei werden die räumliche und zeitliche Perspektive sowie die räumliche Heterogenität betrachtet. Drei Metriken quantifizieren je eine dieser drei Wechselwirkungen. Eine positive (negative) räumliche Wechselwirkung bedeutet, dass Nachmittagsniederschlag öfter über Landoberflächen auftritt, die feuchter (trockener) sind als deren Umgebung. Eine positive (negative) zeitliche Wechselwirkung ist gegeben, wenn Regen eher zu Zeiten feuchter (trockener) Böden auftritt und eine positive (negative) Heterogenitätsmetrik quantifiziert die Präferenz von Niederschlag bei räumlich heterogener (homogener) Verteilung von Bodenfeuchte. Im Gegensatz zu den Beobachtungsdaten zeigen die Modelle eine mehrheitlich positive räumliche Wechselwirkung. Die Resultate für die zeitliche Wechselwirkung sowie die Heterogenitätsmetrik stimmen besser überein, allerdings ist die Streuung zwischen den Modellen bei diesen Metriken besonders gross. Die Wechselwirkung zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag ist einer der Prozesse im Bereich der Land-Klima-Interaktionen, welche die Niederschlagspersistenz beeinflussen können. Deshalb wird der mögliche gemeinsame Einfluss der drei Wechselwirkungen zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag in Modellen und Beobachtungen besprochen. Das Kapitel kommt zum Schluss, dass sie sowohl für Trocken- als auch für Niederschlagsperioden zu mehr Niederschlagspersistenz führen können, was den Ergebnissen früherer Studien entspricht.

Die Resultate dieser Doktorarbeit zeigen den systematischen Fehler aktueller GCMs bei der Simulation von Niederschlagspersistenz auf verschiedenen Zeitskalen auf. Die unterschiedlichen Vorzeichen des Modellfehlers auf langen (monatlichen und jährlichen) und kürzeren (täglichen) Zeitska-

len weisen darauf hin, dass die Niederschlagspersistenz sich nicht linear über die Zeitskalen fortpflanzt und, dass ihnen verschiedene Prozesse zugrunde liegen. Die Resultate zeigen auch, wie die Unsicherheit von Bodenfeuchte-Niederschlagswechselwirkungen zum Fehler beitragen, besonders auf täglicher Zeitskala. Darüber hinaus zeigen die drei Studien, dass die Unsicherheit der Niederschlagspersistenz der Beobachtungen in verschiedenen Regionen mit der Modellunsicherheit vergleichbar ist, was deren Wichtigkeit für robuste Niederschlagsevaluierungen in Modellen zeigt.