

*Reconstructing Western Australian climate history from
marine archives over the past 450 kyr*

Dissertation

In fulfillment of the requirements for the degree “Dr. rer. nat.”

Of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences

At Kiel University

Submitted by

Renjie Pei

Kiel, 2021

Referent: Prof. Dr. Wolfgang Kuhnt

Koreferent: Prof. Dr. Martin Frank

Tag der Disputation: 30.06.2021

Zum Druck genehmigt:

Der Dekan: Prof. Dr. Frank Kempken

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Reconstructing Western Australian climate history from marine archives over the past 450 kyr“, abgesehen von der Beratung durch meine akademischen Lehrer, in Inhalt und Form meine eigene Arbeit darstellt.

Ich habe diese Arbeit, ganz oder zum Teil, an keiner anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt. Teile dieser Arbeit wurden zur Veröffentlichung in Fachzeitschriften eingereicht oder sind in Vorbereitung eingereicht zu werden.

Diese Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entstanden.

Ich versichere weiterhin, dass mir bisher kein akademischer Grad entzogen worden ist.

Kiel, den 11.05.2021

The image shows a handwritten signature in black ink. The signature is written in a cursive style and consists of two parts: 'Renjie' followed by 'Pei'. The signature is positioned above a horizontal line.

Renjie Pei

Abstract

A meridional transect of high-resolution Holocene to late Pleistocene sediment archives along the Northwestern Australian Margin provides crucial information to explore the spectrum of natural climate variability and to untangle dynamic processes and feedbacks controlling climate evolution. This information is needed to constrain modeling experiments of past and future climate change, as modern greenhouse gases emission rates constantly increase. A multitude of proxy reconstructions at drill sites located in the eastern Indian Ocean along the Northwestern Australian Margin is presented in this thesis, with the main objectives of: (1) evaluating the phase relationship between orbital forcing and Australian monsoonal climate and (2) increasing our knowledge on the coupling between local climate variability in northwest Australia and global climate changes (Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and Indonesian Throughflow).

The variability in sediment discharge from northwestern Australia provides a powerful tool to monitor changes in the position and intensity of the Australian monsoonal rainbelt. Elemental composition of core-top samples retrieved during R/V Sonne cruise SO257 along the Northwestern Australian Margin closely match elemental signatures of major river catchments and sediment accumulation rates generally increase northward. We integrate high-resolution X-ray fluorescence (XRF) scanning elemental records, carbon and oxygen isotopes and Mg/Ca derived sea surface temperatures from Core SO257–18548 and International Ocean Discovery Program (IODP) Site U1482, situated southwest of the Scott Plateau at the southern edge of the present-day monsoonal belt, from Core SO257–18571, located within the dust-cyclone belt offshore Northwest Cape south of the Exmouth Plateau, and from Core MD01-2378 and IODP Site U1483, located within the Timor Sea in the easternmost Indian Ocean. The chronology of these sediment successions is based on ^{14}C dating over the last glacial

termination and on correlation of the benthic oxygen isotope record to the LR04 stack (Lisiecki and Raymo, 2005).

We use XRF scanner-derived estimates of terrigenous fluvial discharge and eolian dust combined with foraminiferal isotope and Mg/Ca-derived sea surface temperature data in a suite of sediment cores to reconstruct monsoonal climate evolution over the last four glacial cycles. This latitudinal transect includes the tropical monsoon region of northwestern Australia, and the arid zone where rainfall mainly occurs during landfall of tropical cyclones. Our results suggest that the intensity of Australian monsoon precipitation and the position of ITCZ were strongly affected by changes in Southern Hemisphere temperatures and the interhemispheric temperature gradient. Interglacial and suborbital Southern Hemisphere warm periods were associated with intensification and southward migration of the Australian monsoonal rain belt and heightened cyclone activity, whereas cold periods were characterized by weakened monsoon, extended aridity and intensified trade winds increasing dust fluxes. The intensity of summer monsoon rainfall during glacial terminations is strongly correlated to Antarctic ice core greenhouse gas (CO_2 and CH_4) concentrations and SST records off northwestern Australia. Distinct $p\text{CO}_2$ and methane maxima at the end of Terminations I-IV, in particular the characteristic methane-spike at the end of the last glacial termination (~10–7 ka), are paralleled by massive increases in monsoonal runoff from northwestern Australia. Comparison of our precipitation record with published precipitation records from the northern margin and meteorological center of the Indo-Pacific ITCZ shows that precipitation changed nearly in-phase between the hemispheres on the precession band, possibly linked to expansion and contraction in the latitudinal extent of the Indo-Pacific ITCZ. In contrast, interhemispheric precipitation was nearly in anti-phase on the obliquity band, likely due to latitudinal migration of the Indo-Pacific ITCZ. Our findings imply that tropical hydroclimate cycles were regulated by the orbital forcing but with significantly different response to changes of the ITCZ on

precession and obliquity bands. In Chapter 2, the additional oxygen isotopes and Mg/Ca based temperature of planktonic foraminifers data from core top samples collected during R/V Sonne Cruise SO257 in May 2017 present a steep Southward increase in planktonic $\delta^{18}\text{O}$, associated with a decrease in SST, which indicates that the southwestern front of the Indo-Pacific Warm Pool is located between 23 and 24°S during austral fall. In Chapter 3 benthic and planktonic carbon isotopes integrated with XRF scanner derived barium, Log(iodine/calcium) and bromine enable us to determine that productivity fluctuations over the last 450 kyr were strongly influenced by Australian summer monsoon variability offshore northwestern Australia (23 and 19 kyr) and were also modulated by glacial-interglacial variability (100 kyr) associated with the intensity of trade winds and sea level–related variations in the intensity of the Indonesian Throughflow (100 kyr).

Zusammenfassung

Ein meridionaler Transekt hochauflösender holozäner bis spätpleistozäner Sedimentarchive entlang des westaustralischen Kontinentalrandes liefert wichtige Informationen, um das Spektrum der natürlichen Klimavariabilität zu erkunden und dynamische Prozesse und Rückkopplungen zu entwirren, die die Klimaentwicklung steuern. Diese Informationen werden außerdem nützlich sein, um Modellierungsexperimente des vergangenen und zukünftigen Klimawandels, wenn die Treibhausgasemissionsraten ständig steigen, zu unterstützen. In dieser Arbeit wird eine Vielzahl von Proxy-Rekonstruktionen an Bohrstellen im östlichen Indischen Ozean entlang des westlichen australischen Kontinentalrandes vorgestellt, mit den Hauptzielen: (1) Bewertung der Phasenbeziehung zwischen Orbitaltrieb und australischem Monsunklima und (2) Beitrag zum Verständnis der Kopplung zwischen der lokalen nordwestaustralischen Klimavariabilität und globalen Klimaveränderungen (Intertropische Konvergenzzone (ITCZ) und indonesischer Durchstrom).

Die Variabilität des fluviatilen Sedimenteintrags aus dem Nordwesten Australiens bietet ein leistungsstarkes Instrument zur Rekonstruktion von Änderungen der Position und Intensität des australischen Monsunregengürtels. Die Elementzusammensetzung der Sedimentoberflächen-Proben, die während der R / V Sonne-Expedition SO257 entlang des nördlichen und westlichen australischen Randes entnommen wurden, stimmt eng mit den Elementarsignaturen der wichtigsten Flusseinzugsgebiete überein, und die Sedimentakkumulationsraten nehmen im Allgemeinen nach Norden hin zu. Wir integrieren hochauflösende Röntgenfluoreszenz (XRF)-Scanner-Elementaufzeichnungen, Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope und von Mg / Ca abgeleitete Meeresoberflächentemperaturen (SST) aus dem Sedimentkern SO257–18548 und IODP (International Ocean Discovery Program)-Bohrung U1482 südwestlich des Scott-Plateaus am südlichen Rand des heutigen Monsungürtels, von Core SO257–18571, innerhalb des Staubsturmregens vor dem

Nordwestkap südlich des Exmouth-Plateaus, und von Core MD01-2378 und IODP-Bohrung U1483, in der nordöstlichen Timor Sea. Die Chronologie dieser Sedimentfolgen basiert auf der ^{14}C -Datierung über die letzte glaziale Termination und auf der Korrelation des benthischen Sauerstoffisotopendatensatzes mit dem globalen LR04-Stack.

Wir verwenden vom RFA-Scanner abgeleitete Schätzungen des terrigenen Flusseintrags und äolischen Staubes in Kombination mit an oberflächennah lebenden planktonischen Foraminiferen gemessenen Sauerstoffisotopen- und Mg/Ca-Daten rekonstruierten SST, um in einer Reihe von Sedimentkernen die Monsunklimaentwicklung über die letzten vier Glazialzyklen zu rekonstruieren. Der durch die drei Kernlokationen abgedeckte Transekt umfasst die tropische Monsunregion im Nordwesten Australiens und die südlich anschließende aride Zone, in der Niederschläge fast ausschließlich während des Landfalls tropischer Wirbelstürme (Zyklone) auftreten. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass die Intensität des australischen Monsunniederschlags und die Position des ITCZ stark von Änderungen der Temperaturen der südlichen Hemisphäre und des interhemisphärischen Temperaturgradienten beeinflusst wurden. Interglaziale und suborbitale Warmperioden der südlichen Hemisphäre waren mit einer Intensivierung und Verschiebung des australischen Monsunregengürtels nach Süden sowie einer erhöhten Zyklonaktivität verbunden, während Kälteperioden durch abgeschwächten Monsun, verlängerte Trockenperioden und verstärkte Passatwinde gekennzeichnet waren, die den Staubfluss erhöhten. Die Intensität der sommerlichen Monsunregenfälle während der glazialen Terminationen korreliert stark mit den Treibhausgaskonzentrationen (CO_2 und CH_4) in den antarktischen Eiskernen und den Meeresoberflächentemperaturen vor Westaustralien. Deutliche $p\text{CO}_2$ - und Methan-Maxima am Ende der Terminationen I-IV, insbesondere die charakteristische Methanspitze am Ende der letzten Termination ($\sim 10\text{-}7$ ka), gehen mit einem massiven Anstieg des monsunalen Sedimenteintrags aus Nordwestaustralien einher. Ein Vergleich unserer Niederschlags-

Rekonstruktionen mit veröffentlichten Rekonstruktionen vom nördlichen Rand und vom meteorologischen Zentrum der indopazifischen ITCZ zeigt, dass sich die Niederschläge in den beiden Hemisphären auf dem Präzessionsband (23 kyr) nahezu gleichphasig verändert haben, möglicherweise im Zusammenhang mit einer Expansion und Kontraktion in der Breitenausdehnung der indopazifischen ITCZ. Im Gegensatz dazu war der interhemisphärische Niederschlag auf dem Obliquitätsband (41 kyr) nahezu gegenphasig war. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass tropische Hydroklimazyklen durch den Orbitalantrieb reguliert wurden, jedoch mit einer unterschiedlichen Reaktion der ITCZ auf die Variabilität der Präzession und Schiefe der Erdachse. In Kapitel 2 zeigen in einem N-S Transekt von Oberflächen-Sedimentproben der R/V Sonne-Expedition SO257 im Mai 2017 die Sauerstoffisotope und die auf Mg/Ca planktischer Foraminiferen basierenden Meeresoberflächentemperaturen einen steilen Anstieg des planktischen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte südlich von 23°S auf, der mit einer Abnahme der Meeresoberflächentemperatur (SST) verbunden ist. Dies weist darauf hin, dass sich die südwestliche Front des Indopazifischen Warmpools im australischen Herbst heute zwischen 23° und 24° S befindet. Der Gradient zwischen planktischen und benthischen Kohlenstoffisotopwerten, zusammen mit Schwankungen im Barium, Jod und Brom-Gehalt der Sedimente aus XRF-Scannerdaten ermöglichen es uns, die Variabilität der Oberflächenproduktivität über die letzten 450 kyr zu rekonstruieren. Diese zeigt eine starke Variabilität im Bereich des Präzessionsbandes (23 und 19 kyr) und ist zusätzlich durch glaziale-interglaziale Variabilität kontrolliert. Diese Phasenbeziehungen lassen darauf schließen, dass die Produktivität vor der Küste Nordwestaustraliens stark von der Intensität des australischen Wintermonsuns (Passatwinde) und der Intensität des Indonesischen Durchstroms beeinflusst wurde.