

DISS. ETH NO. 27780

Plant Water Relations in Response to Drought and Different Cropping Systems

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Qing Sun

M. Sc. in Agricultural Water-Soil Engineering
China Agricultural University

born on 29 December 1990

citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

Dr. Anna K. Gilgen, co-examiner

Prof. Dr. David Williams, co-examiner

Abstract

Agriculture is one of the main contributors to climate change and is also severely threatened by the consequences of the changing climate. To reduce the environmental pressure from agriculture, sustainable practices are urgently in need of evaluation and implementation. In croplands, organic farming and conservation tillage can reduce energy consumption, greenhouse gas emissions, and pollutant production as well as increase carbon sequestration, hence are considered more environmental-friendly and sustainable than conventional farming and intensive tillage. Moreover, organic farming and conservation tillage are shown to improve soil health such as physical structure, chemical conditions, and microbial functionalities. Therefore, these practices are also recommended as beneficial to mitigate climate change effects, such as crop drought stress. However, if organic farming and conservation tillage are truly climate-smart adaptations for cropping systems is still to be tested in different climate conditions.

Extreme weathers, increasing in frequency and severity due to climate change, are posing extra challenges on food security in addition to the growing population. Drought as a top threat causes intense damage in agroecosystems, especially in rainfed agriculture. Crop water relations are highly responsive to drought stress, and directly linked to growth and productivity. Therefore, understanding crop water relations in response to drought can provide insights on assessing cropping systems for future climate.

As introduced in Chapter 1, this thesis aims to bring insights on the effects of cropping systems and drought on plant water relations along the soil-plant-atmosphere continuum. This includes root water uptake patterns, stem xylem vulnerability and anatomy, leaf water status and physiological processes, phenology, growth, and yield. Combining different management practices, four cropping systems are studied: conventional intensive tillage, conventional no-tillage, organic intensive tillage, and organic reduced tillage. Simulated drought periods with portable shelters were carried out in Swiss rainfed cropland under temperate climate. During the 2018 growing season pea-barley mixture, an important fodder crop, was studied. Winter wheat, a globally important food source, was studied during 2019.

Root water uptake depths of crops provide important information on drought response and therefore may provide insight based on differential outcomes in cropping systems under drought. The foci in Chapter 2 are on root water uptake patterns of pea and barley grown in a mixture under the targeted

cropping systems and different water availabilities. The water uptake patterns of winter wheat are included in Chapter 4. Stable water isotopes were used to estimate the water uptake patterns of these three species with a Bayesian framework. In all cropping systems, when subjected to the experimental drought, both pea and barley shifted their water uptake patterns to shallower depths without niche differentiation, whereas winter wheat went for deeper water uptake. Moreover, due to the natural drought period in summer 2018, we also observed responses of pea and barley to this more moderate drought compared to our treatment, where only barley shifted up in water uptake depths, but pea did not.

Plant hydraulics greatly determines water transport, and it is shown to be affected by environments including soil conditions. The hydraulic traits of pea and barley in response to cropping systems as well as their links to growth and productivity are presented in Chapter 3. Xylem vulnerability to cavitation of both species was evaluated with the cavitron technique, and percentage loss of conductivity derived with xylem water potential *in situ* was used to assess the drought stress of these two species. Once again, different species showed inconsistent responses. Although grown in a mixture, cropping systems only affected the hydraulic traits of barley but not pea.

Crop growth and productivity are shaped by various physiological processes with great complexities among regulation and compensation responses. Integrating crop traits along the entire continuum into a trait space helps to draw a clear picture on changes responding to the environment and managements. Winter wheat traits about crop water relations are presented in Chapter 4. In the trait space, cropping systems only changed growth trait space, which differed between organic and conventional systems but not between conservation and intensive tillage systems. Meanwhile, the drought treatment dominated water trait space, irrelevant to cropping systems.

Other than the traits investigated on individual plant, visual changes in crop phenology can also help reveal cropping system effects. PhenoCams were used to track phenology of pea-barley mixture and winter wheat. Crop phenology was not affected by cropping systems for pea-barley mixture, but for winter wheat, showing differences consistent with the trait space (i.e., differed between organic and conventional systems). Because I contributed to data collection and analysis as well as revising the manuscript, this work is included in the Appendix.

Our results show that cropping systems can affect certain hydraulic, physiological, and growth traits, as well as phenology of crops, which could link to yield traits. However, the responses and outcomes largely depend on species. These results emphasise that using different cropping systems to alleviate drought stress for plants might not be as effective as previously assumed, at least in temperate areas, hence compromising the expectation to counteract or compensate the aggravating drought threats under the changing climate.

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft ist einer der Hauptverursacher des Klimawandels und ist zudem stark von dessen Folgen bedroht. Um die Umweltbelastung durch die Landwirtschaft zu reduzieren, müssen dringend nachhaltige Praktiken evaluiert und umgesetzt werden. Im Ackerbau können die ökologische Landwirtschaft und konservierende Bodenbearbeitung den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Schadstoffproduktion reduzieren sowie die Kohlenstoffbindung erhöhen und gelten daher als umweltfreundlicher und nachhaltiger als die konventionelle Landwirtschaft und intensive Bodenbearbeitung. Darüber hinaus verbessern die ökologische Landwirtschaft und konservierende Bodenbearbeitung nachweislich die Bodengesundheit, wie zum Beispiel die physikalische Struktur, die chemischen Bedingungen und die mikrobiellen Funktionen. Daher werden diese Praktiken auch als Massnahmen für die Abschwächung der Auswirkungen des Klimawandels, wie zum Beispiel Trockenstress, empfohlen. Ob die ökologische Landwirtschaft und konservierende Bodenbearbeitung wirklich klimafreundliche Anpassungen für Anbausysteme sind, muss jedoch noch unter verschiedenen Klimabedingungen getestet werden.

Extreme Wetterereignisse, die durch den Klimawandel an Häufigkeit und Intensität zunehmen, stellen neben der wachsenden Bevölkerung zusätzliche Herausforderungen für die Ernährungssicherheit dar. Trockenheit als starke Bedrohung verursacht intensive Schäden in Agrarökosystemen, insbesondere wenn die Systeme nicht bewässert werden. Den Wasserhaushalt von Pflanzen reagiert stark auf Trockenstress und ist direkt mit Wachstum und Produktivität der Pflanzen verbunden. Daher kann das Verständnis des Wasserhaushalts von Nutzpflanzen als Reaktion auf Trockenheit Einblicke in die Bewertung von Anbausystemen für das zukünftige Klima liefern.

Diese Arbeit zielt darauf ab, Erkenntnisse über die Auswirkungen von Anbausystemen und Trockenheit auf den Wasserhaushalt von Pflanzen entlang des Kontinuums Boden-Pflanze-Atmosphäre zu gewinnen. Dies umfasst die Wasseraufnahmemuster der Wurzeln, die Anfälligkeit und Anatomie des Stamm-Xylems, den Wasserstatus der Blätter und physiologische Prozesse, Phänologie, Wachstum und Ertrag. Durch die Kombination verschiedener Managementpraktiken werden vier Anbausysteme untersucht: konventionelle intensive Bodenbearbeitung, konventionelle Direktsaat, organische intensive Bodenbearbeitung und organische reduzierte Bodenbearbeitung. Simulierte Trockenperioden mit transparenten Dächern wurden im Schweizer Regenfeldbau unter gemässigtem Klima durchgeführt. In der Vegetationsperiode 2018 wurde eine Erbsen-Gerste-

Mischung, eine wichtige Futterquelle für Nutztiere, untersucht. Winterweizen, eine weltweit wichtige Futterpflanze, wurde 2019 untersucht.

Wurzelwasseraufnahmetiefen von Nutzpflanzen liefern wichtige Informationen über die Reaktion auf Trockenheit und können daher Erkenntnisse über Anbausysteme unter Trockenheit liefern. Der Schwerpunkt in Kapitel 2 liegt auf den Wurzelwasseraufnahmemustern von Erbsen und Gerste, die in einer Mischung unter den vier ausgewählten Anbausystemen und unterschiedlichen Wasserverfügbarkeiten angebaut wurden. Die Wasseraufnahmemuster von Winterweizen sind in Kapitel 4 beschrieben. Stabile Wasserisotope wurden verwendet, um die Wasseraufnahmemuster dieser drei Arten mit Bayes'scher Statistik abzuschätzen. In allen Anbausystemen verlagerten unter der experimentellen Trockenheit Erbse und Gerste ihre Wasseraufnahmemuster ohne Nischendifferenzierung in geringere Tiefen, während Winterweizen Wasser aus grösseren Tiefe aufnahm. Darüber hinaus beobachteten wir aufgrund der natürlichen Dürreperiode im Sommer 2018 auch Reaktionen von Erbsen und Gerste auf diese moderatere Dürre im Vergleich zu unserer Behandlung, bei der nur Gerste ihre Wasseraufnahmetiefen nach oben verschob, Erbsen jedoch nicht.

Die Pflanzenhydraulik bestimmt in hohem Masse den Wassertransport, und es hat sich gezeigt, dass sie von Umweltbedingungen, einschliesslich der Bodenbedingungen, beeinflusst wird. Die hydraulischen Eigenschaften von Erbsen und Gerste als Reaktion auf die ausgewählten Anbausysteme sowie ihre Verbindungen zu Wachstum und Produktivität werden in Kapitel 3 vorgestellt. Die Anfälligkeit des Xylems für Kavitation wurde bei beiden Arten mit der Cavitron-Technik bewertet, und der prozentuale Verlust der Leitfähigkeit, der aus dem Xylem-Wasserpotenzial *in situ* abgeleitet wurde, wurde zur Bewertung des Trockenstresses dieser beiden Arten verwendet. Die verschiedenen Arten zeigten erneut unterschiedliche Reaktionen. Obwohl in einer Mischung angebaut, beeinflussten die Anbausysteme nur die hydraulischen Eigenschaften von Gerste, nicht aber die von Erbsen.

Das Wachstum und die Produktivität von Nutzpflanzen werden durch verschiedene physiologische Prozesse mit einer grossen Komplexität zwischen Regulierung und Kompensationsreaktionen beeinflusst. Die Integration von Pflanzenmerkmalen entlang des gesamten Kontinuums in einen Merkmalsraum hilft dabei, ein klares Bild von den Veränderungen in Abhängigkeit von Umwelteigenschaften und dem Management zu zeigen. Winterweizeneigenschaften zum Wasserhaushalt werden in Kapitel 4 vorgestellt. Im Merkmalsraum veränderten die Anbausysteme nur den Wachstumsmerkmalsraum, der sich zwischen biologischen und konventionellen Systemen unterschied, aber nicht zwischen konservierenden und intensiven Bodenbearbeitungssystemen.

Währenddessen dominierte die Trockenheitsbehandlung den Wassermerkmalsraum, unabhängig von den Anbausystemen.

Neben den Merkmalen, die an der einzelnen Pflanze untersucht wurden, können auch visuelle Veränderungen in der Phänologie der Pflanzen helfen, die Auswirkungen des Anbausystems aufzuzeigen. PhenoCams wurden verwendet, um die Phänologie von Erbsen-Gerste-Mischung und Winterweizen zu verfolgen. Die Phänologie der Pflanzen wurde bei der Erbsen-Gerste-Mischung nicht durch das Anbausystem beeinflusst, aber bei Winterweizen zeigten sich Unterschiede, die mit dem Merkmalsraum übereinstimmen (d.h. sie unterschieden sich zwischen ökologischen und konventionellen Anbausystemen). Da ich zur Datenerhebung und -analyse sowie zur Überarbeitung des Manuskripts beigetragen habe, ist diese Arbeit im Anhang enthalten.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass Anbausysteme bestimmte hydraulische, physiologische und wachstumsbezogene Merkmale sowie die Phänologie der Pflanzen beeinflussen können, die mit den Ertragsmerkmalen in Verbindung stehen können. Die Reaktionen und Ergebnisse hängen jedoch weitgehend von der Art ab. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Verwendung verschiedener Anbausysteme zur Linderung von Trockenstress für Pflanzen möglicherweise nicht so effektiv ist wie bisher angenommen - zumindest in gemäßigten Klimazonen.