

WATER USE EFFICIENCY OF FOXTAIL MILLET (*Panicum italicum* L.) UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS IN NORTHWEST REGIONS OF CHINA

EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA POR MIJO COLA DE ZORRA (*Panicum italicum* L.) EN CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN REGIONES DEL NOROESTE DE CHINA

Qu Yang^{1,2}, Zhou Yu¹, Chao guimei¹, Zhang Panpan³, Song hui^{4*}, Feng Baili¹

¹State Key Laboratory of Crop Stress Biology on Drought Regions, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 712100. ²Baoji Research Institute of Agricultural Science, Qishan, Shaanxi, China, 722400. ³National Side Crops and Miscellaneous Cereals Engineering Technology Research Center, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing, Heilongjiang, China, 163319. ⁴Anyang City Academy of Agricultural Sciences, Anyang, Henan, China, 455000 (7012766@163.com)

ABSTRACT

Climate change represents a vital challenge in foxtail millet (*Panicum italicum* L.) production for assuring development of foxtail millet and obtaining high yields in semi-arid and arid regions of China. The objective of this study was to show the impact of climate change on water use efficiency (WUE) of foxtail millet in dry-land areas of China. The study included yield of foxtail millet, soil water content, rainfall, and temperature data of three experimental sites between 1978 and 2007. All data was provided by the meteorological and agricultural administration centers of every location. The results showed that in Pingliang, Yulin, and Huhehot accumulated temperatures increased by 502, 541, and 857 °C; rainfall decreased by 75.0, 84.3, and 162.5 mm; WUE of foxtail millet increased by about 0.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ when accumulated temperature increased by 100 °C; rainfall decreased by 100 mm, which increased WUE of foxtail millet by about 1.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹. Coefficient of variation (CV) of accumulated temperature and CV of rainfall in Pingliang, Yulin, and Huhehot increased as latitudes of these locations moved up. Average WUE of foxtail millet in these locations increased when CV of accumulated temperature or CV of rainfall moved up. These results indicate that WUE of foxtail millet had an improvement due to climate warming and decreasing rainfall between 1978 and 2007.

Key words: Crop production, rain-fed areas, climate warming.

RESUMEN

El cambio climático representa un desafío vital en la producción de mijo cola de zorro (*Panicum italicum* L.), para asegurar su desarrollo y obtener rendimientos altos, en las regiones semiáridas y áridas de China. El objetivo de este estudio fue mostrar el impacto del cambio climático en la eficiencia en el uso del agua (EUA) de mijo cola de zorro en zonas de secano de China. El estudio incluyó el rendimiento de mijo cola de zorro, el contenido de agua del suelo, la precipitación y los datos de temperatura de tres sitios experimentales de 1978 a 2007. Los datos fueron proporcionados por los centros de administración meteorológicos y agrícolas de cada lugar. Los resultados mostraron que en Pingliang, Yulin y Huhehot las temperaturas acumuladas aumentaron en 502, 541 y 857 °C; la precipitación disminuyó 75.0, 84.3 y 162.5 mm, la EUA de mijo cola de zorro aumentó cerca de 0.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ cuando la temperatura acumulada aumentó 100 °C, la precipitación disminuyó 100 mm lo que aumentó cerca de 1.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ la EUA del mijo cola de zorro. El coeficiente de variación de la temperatura acumulada y de la precipitación en Pingliang, Yulin y Huhehot aumentó con la latitud de estos lugares. En estos lugares, la EUA promedio del mijo cola de zorro aumentó cuando el CV de la temperatura acumulada o de la precipitación acumulada incrementó. Estos resultados indican que el uso eficiente del agua del mijo mejoró debido al calentamiento global y la disminución de las lluvias de 1978 a 2007.

Palabras clave: Producción de cultivos, zonas de secano, calentamiento global.

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: April, 2015. Approved: March, 2016.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 50: 665-676. 2016.

INTRODUCTION

Water use efficiency (WUE) is an important factor of agricultural production in arid and semi-arid areas of China. Climate warming as an upward trend all over the world may pose an important challenge to WUE (Sommer *et al.*, 2013). Climate change affect crop growth and yield, especially accumulated temperature (sum of daily mean temperature) and daily mean temperature (Galán *et al.*, 2001). Temperature increase causes variation in growing period of crops, and may sometimes cause a change in the cropping system (Avolio *et al.*, 2008). Several crops, therefore, will become more suitable for cultivation further north or in higher altitude areas in the south (Olesen *et al.*, 2007; Moriondo *et al.*, 2010).

The phenology of crops, such as jointing, flowering, and maturity, may be affected by climate warming and may have an overall trend of earlier occurrence (Osborne *et al.*, 2000; Giannakopoulos *et al.*, 2009; Oteros *et al.*, 2013). The earlier occurrence of phenological phases due to the influence of climate warming resulted in a shorter time for biomass accumulation and lower crop yields (Olesen *et al.*, 2011). Rosenzweig *et al.* (1993) assessed the effects of climate change on global food production, and then Parry *et al.* (2004) estimated yield of main crops to drop by between 2.5 % and 10 % as compared with historic from 1990 conditions due to climate warming.

As far as WUE was concerned, crops transpiration and soil moisture loss were severe in arid and semi-arid areas due to climate warming (Tenhunen *et al.*, 2002). According to Lioubimtseva and Henebry (2009), WUE of crops was affected by low precipitation because of climate warming. Likewise, climate warming could drop effective evapo-transpiration of rain-fed olives due to reduction of precipitation and increase of evapo-transpiration demand (Lazar *et al.*, 2014). Further, climate warming could improve WUE of wheat, potato, and maize (Xiao *et al.*, 2013).

Foxtail millet (*Panicum italicum* L.), one important food source in rain-fed areas of China, is one of the oldest domesticated crops (Shen *et al.*, 2015). The effect of climate change on WUE of foxtail millet has not been recently assessed. Therefore, the objective of this study was to understand the impact of climate change on WUE of foxtail millet in rain-fed areas

INTRODUCCIÓN

La eficiencia en el uso del agua (EUA) es un factor importante en la producción agrícola en zonas áridas y semiáridas de China. La tendencia de aumento del calentamiento global puede representar un reto importante para la EUA (Sommer *et al.*, 2013). El cambio climático, en especial de la temperatura acumulada (suma de la temperatura media diaria) y la temperatura media diaria, afecta el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Galán *et al.*, 2001). El aumento de la temperatura causa variación en el periodo de crecimiento de los cultivos y causa cambio en el sistema de cultivo (Avolio *et al.*, 2008). Por esto, varios cultivos serán más adecuados más el norte o zonas a mayor altitud en el sur (Olesen *et al.*, 2007; Moriondo *et al.*, 2010).

La fenología de los cultivos, como espigamiento, floración y madurez, puede afectarse por el calentamiento global y tener una tendencia general de ocurrencia temprana (Osborne *et al.*, 2000; Giannakopoulos *et al.*, 2009; Oteros *et al.*, 2013). La ocurrencia temprana de las fases fenológicas debido a la influencia del calentamiento global resultó en menos tiempo para la acumulación de biomasa y rendimientos bajos de los cultivos (Olesen *et al.*, 2011). Rosenzweig *et al.* (1993) evaluaron los efectos del cambio climático en la producción mundial de alimentos, y luego Parry *et al.* (2004) estimaron la caída del rendimiento de los principales cultivos debido al calentamiento global, entre 2.5 % y 10 % comparando con el histórico en las condiciones de 1990.

Respecto a la EUA, la transpiración de los cultivos y la pérdida de humedad del suelo fueron graves en las zonas áridas y semiáridas debido al calentamiento global (Tenhunen *et al.*, 2002). Según Lioubimtseva y Henebry (2009), la EUA de los cultivos se afectó por la precipitación baja debida al calentamiento global. El calentamiento global podría disminuir la evapotranspiración efectiva de los olivos en secano debido a la reducción de la precipitación y el aumento de la evapotranspiración (Lazar *et al.*, 2014). Además, el calentamiento global podría mejorar la EUA de trigo, papa y maíz (Xiao *et al.*, 2013).

El mijo cola de zorro (*Panicum italicum* L.) es un alimento importante en las zonas de secano de China y es uno de los cultivos domesticados más antiguos (Shen *et al.*, 2015). El efecto del cambio climático en la EUA del mijo cola de zorro no se ha evaluado

and to suggest agricultural strategies for adapting to climate change, in China.

MATERIALS AND METHODS

Study area and data sources

Pingliang, Yulin, and Hubehot were selected as study meteorological stations in semi-arid and arid regions, which are located in 34° 54' N and 108°30' E, 37° 5' N and 107° 36' E, and 40° 51' N and 110° 46' E, respectively. Soil type in these locations is loessal with 30 m depth layer.

Rainfall, temperature, yield of foxtail millet, and soil moisture data for the semi-arid and arid areas of Yulin, Pingliang, and Hubehot between 1978 and 2007 were acquired from the Meteorological and Agricultural Administration Centers in every location.

Data analysis

The soil water content data in 0-100 cm soil profile during the sowing and harvesting stages for foxtail millet, between 1978 and 2007, were used to calculate crop evapotranspiration (ET_c). Evapotranspiration was determined using the formula (Zhang *et al.*, 2013b):

$$ET_c = P + SW_s - SW_h + I - D$$

where, P is the precipitation (mm) during the crop growth season; SW_s is soil water storage (mm) at sowing stage; SW_h is soil water storage (mm) at harvesting stage; I is the amount of irrigation (mm), which was negligible due to no irrigation in this study site; D is the amount of water lost due to deep drainage (mm), which was negligible due to 30 m deep water layer and less rainfall (Wang *et al.*, 2004).

SW in evapotranspiration formula was calculated using the formula as below:

$$SW = \sum (A_i \times T_i \times B_i / 10) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

where SW is soil water storage (mm); i is soil layer number; n is total number of soil layers, including five layers of 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm; A_i is soil dry bulk density in i layer (kg cm^{-3}); T_i is soil thickness in i layer (cm); B_i is soil water content (%).

WUE of foxtail millet was calculated as grain yield (GY) in kg ha^{-1} divided by ET_c :

recientemente. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue conocer el impacto del cambio climático en la EUA de mijo cola de zorro, en zonas de secano, y sugerir estrategias agrícolas para la adaptación al cambio climático en China.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y fuentes de datos

Pingliang, Yulin y Hubehot se seleccionaron como estaciones meteorológicas de estudio en las regiones semiáridas y áridas (34° 54' N y 108° 30' E, 37° 5' N y 107° 36' E y 40° 51' N y 110° 46' E, respectivamente). El tipo de suelo en estos lugares es una capa de loessal con 30 m de profundidad.

Los datos de precipitación, temperatura, rendimiento de mijo cola de zorro y humedad del suelo de las zonas áridas y semiáridas de Yulin, Pingliang y Hubehot de 1978 a 2007 se obtuvieron de los Centros de Administración de Meteorológica y Agricultura en cada lugar.

Análisis de los datos

Los datos del contenido de humedad, entre 0 y 100 cm del perfil del suelo, durante las etapas de siembra y cosecha de mijo cola de zorro, entre 1978 y 2007, se utilizaron para calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c). La ET_c se calculó con la fórmula (Zhang *et al.*, 2013b):

$$ET_c = P + SW_s - SW_h + I - D$$

donde P es la precipitación (mm) durante la temporada de crecimiento de los cultivos; SW_s es el agua almacenada en el suelo (mm) en la etapa de la siembra; SW_h es el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en la etapa de cosecha; I es la cantidad de riego (mm), que fue insignificante por la falta de irrigación en el sitio de estudio; D es la cantidad de agua perdida debido a la profundidad de drenaje (mm), que fue mínima debido a la capa de agua a 30 m de profundidad y menos precipitación (Wang *et al.*, 2004).

SW en la fórmula de evapotranspiración se calculó con la fórmula:

$$SW = \sum (A_i \times T_i \times B_i / 10) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

donde SW es el agua almacenada en el suelo (mm); i es el número de capa de suelo; n es el número total de capas de suelo, incluyendo cinco capas de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80 y 80 a 100 cm; A_i es la densidad aparente del suelo seco en la capa i (kg cm^{-3});

$$WUE = GY/ET_c$$

Data processing

All data were processed and plotted using Microsoft Excel 2007 software.

RESULTS AND DISCUSSION

Climate evaluation

The accumulated temperature from 1978 to 2007 shows a significant upward trend (Figure 1). Accumulated temperature of Pingliang, Yulin, and Huhehot increased by 502, 541, and 857 °C, respectively, and annual mean accumulated temperature increased by 16.7, 18.0, and 28.6 °C. Temperature rise is a sign of climate warming (Wei and Chen, 2009). Accumulated temperatures of these locations, therefore, have a significant climate warming trend during the period under study.

Climate warming has an important effect on rainfall (Piao *et al.*, 2010). Findings by García-Páez and Cruz-Medina (2009) suggest that water shortages in regions of Mexico may become worse by variability in rainfalls due to climate change. Rainfall

T_i es el espesor del suelo en la capa i (cm); B_i es el contenido de agua del suelo (%).

La EUA de mijo cola de zorro se calculó como el rendimiento de grano (RG) en kg ha⁻¹ dividido entre ET_c :

$$EUA = GY / ET_c$$

Análisis de los datos

Todos los datos se procesaron y graficaron con Microsoft Excel 2007.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del clima

La temperatura acumulada de 1978 a 2007 mostró una tendencia significativa de aumento (Figura 1). La temperatura acumulada en Pingliang, Yulin, y Huhehot aumentó 502, 541 y 857 °C, y la temperatura anual media acumulada aumentó 16.7, 18.0 y 28.6 °C. El aumento de la temperatura es una señal del calentamiento global (Wei y Chen, 2009). Por lo tanto, las temperaturas acumuladas de estos lugares tuvieron una tendencia significativa con el calentamiento global en el periodo estudiado.

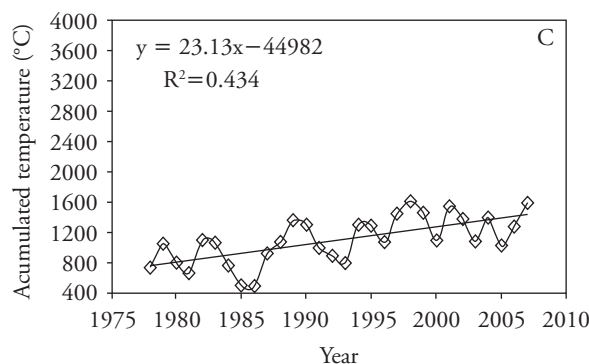
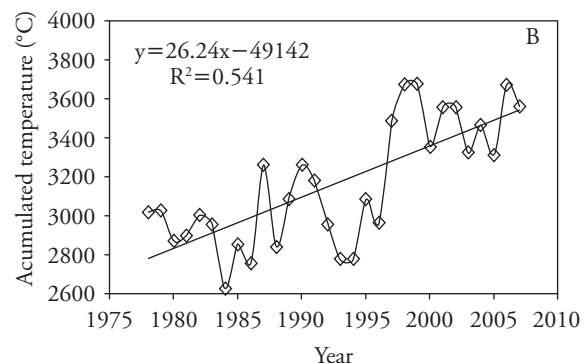
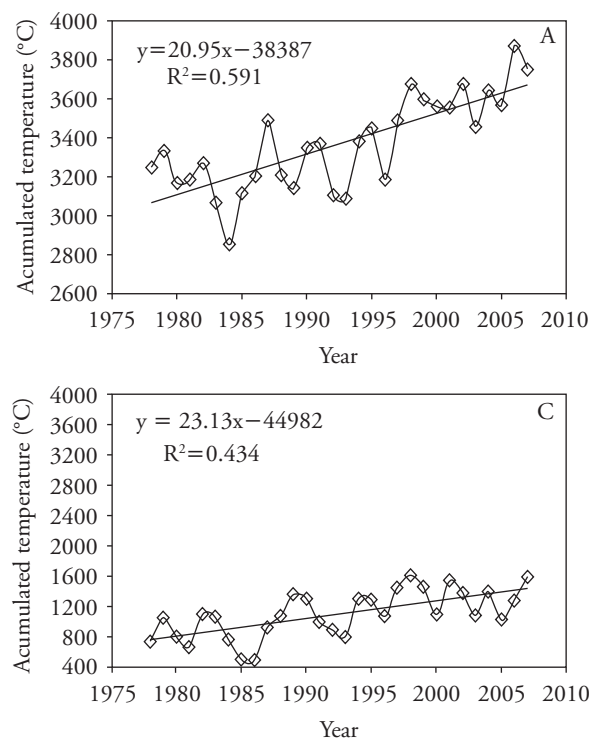


Figure 1. Accumulated temperature change from 1978 to 2007: (A) Pingliang, (B) Yulin, (C) Huhehot, China.

Figura 1. Cambio de la temperatura acumulada de 1978 a 2007: (A) Pingliang, (B) Yulin y (C) Huhehot, China.

on Pingliang, Yulin, and Huhehot showed a variation trend as the accumulated temperature rose (Figure 2), and rainfall on these locations decreased by 75.0, 84.3, and 162.5 mm. Annual mean rainfall of these locations dropped by 2.50, 2.81, and 5.42 mm in Pingliang, Yulin, and Huhehot. High accumulated temperature increase may result in serious rainfall losses, which might be harmful to agricultural production in semi-arid and arid regions (Wang, 2009).

WUE of foxtail millet and temperature

Temperature, as an important factor for agricultural production, has a necessary effect on WUE. Temperature rise has caused increase of plant WUE (Loader *et al.*, 1995). However, other reports also suggest that temperature rise decreased WUE of plant (Yepez *et al.*, 2007; Nicotra *et al.*, 2008). The relationship between WUE of foxtail millet and temperature change is presented in Figure 3. WUE of foxtail millet in Pingling, Yulin, and Huhehot increased when accumulated temperature of these locations increased by 100 °C between 1978 and 2007, and they increased by 0.2, 0.2, and 0.4 kg ha⁻¹

El calentamiento global tiene efecto importante en la precipitación (Piao *et al.*, 2010). Los hallazgos de García-Páez y Cruz-Medina (2009) indican que la escasez de agua en regiones de México puede empeorar por la variabilidad de las precipitaciones debido al cambio climático. Las precipitaciones en Pingliang, Yulin y Huhehot mostraron una tendencia de variación con aumento de la temperatura acumulada (Figura 2), y las precipitaciones en estos lugares disminuyeron 75.0, 84.3 y 162.5 mm. Las precipitaciones medias anuales se redujeron 2.50, 2.81 y 5.42 mm en Pingliang, Yulin y Huhehot. El aumento de la temperatura acumulada puede resultar en pérdidas graves de precipitación, que perjudicarían la producción agrícola en regiones semiáridas y áridas (Wang, 2009).

Eficiencia en el uso del agua de mijo cola de zorro y la temperatura

La temperatura, como un factor relevante para la producción agrícola, tiene un efecto necesario en EUA. El aumento de la temperatura ha incrementando EUA de la planta (Loader *et al.*, 1995). Otros estudios sugieren que el aumento de temperatura disminuye EUA de la planta (Yepez *et al.*, 2007; Nicotra

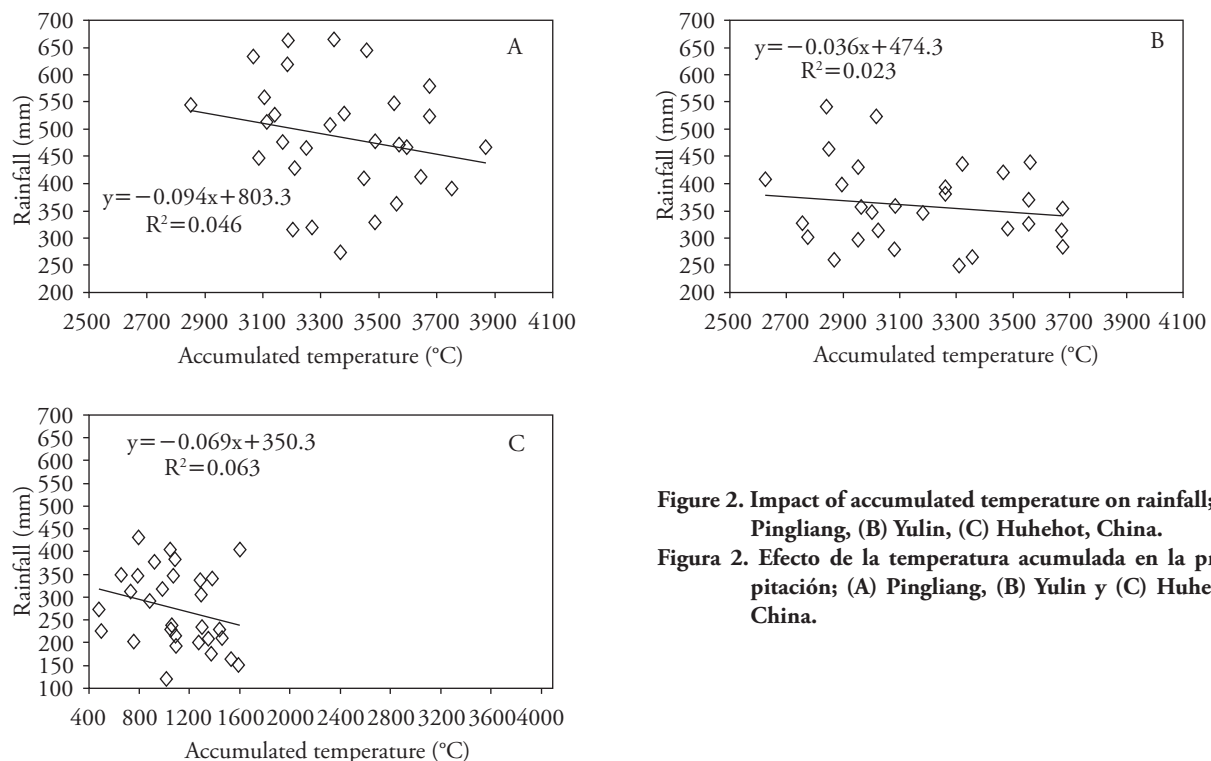


Figure 2. Impact of accumulated temperature on rainfall; (A) Pingliang, (B) Yulin, (C) Huhehot, China.

Figura 2. Efecto de la temperatura acumulada en la precipitación; (A) Pingliang, (B) Yulin y (C) Huhehot, China.

mm^{-1} (Figure 3). These results were similar to those reported by Xiao *et al* (2013), who found WUE of wheat increased when temperature increased. As far as reasons of increasing WUE under temperature warming was concerned, Schleser (1990) and Loader *et al* (1995) reported that WUE increased when temperature rose under the optimal temperature for photosynthesis, or else it decreased above optimal temperature for photosynthesis (Yepez *et al.*, 2007; Nicotra *et al.*, 2008). In our study, WUE of foxtail millet increased as accumulated temperature rose; suggesting that temperature rise between 1978 and 2007 was under the optimal temperature of photosynthesis in foxtail millet, which may cause photosynthetic capacity of foxtail millet to increase and lastly resulting in high WUE. These results are supported by the finding of Duquesnay *et al* (1998), who indicated that effects of temperature rise on WUE of beech were positive in the long term. Increasing WUE under warming temperature, suggests that water vapor capacity increased (Philip and Biney, 2002); therefore, WUE of the plant increased as a response to adjust for drought (Figure 3) (Zou *et al.*, 2010). WUE of foxtail millet increased about $0.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ when accumulated temperature increased

et al., 2008). La relación entre EUA de mijo cola de zorro y el cambio de la temperatura se presenta en la Figura 3. La EUA de mijo cola de zorro en Pingling, Yulin y Huhehot aumentó con el incremento de 100°C de la temperatura acumulada en estos lugares, de 1978 a 2007, y su aumento fue 0.2 , 0.2 y $0.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figura 3). Estos resultados fueron similares a los reportados por Xiao *et al.* (2013), quienes muestran que EUA de trigo aumentó con el calentamiento global. Respecto al incremento de EUA debido al aumento de la temperatura, Schleser (1990) y Loader *et al.* (1995) indican que EUA aumentó cuando la temperatura se elevó por debajo de la temperatura óptima para la fotosíntesis, o al contrario, disminuyó por encima de la temperatura óptima para la fotosíntesis (Yepez *et al.*, 2007; Nicotra *et al.*, 2008). En nuestro estudio, EUA de mijo cola de zorro aumentó con el incremento de la temperatura acumulada, lo cual sugiere que el aumento de temperatura fue menor a la temperatura óptima para la fotosíntesis de mijo cola de zorro y pudo causar aumento en la capacidad fotosintética de mijo cola de zorro, lo que resultó en EUA mayor. Estos resultados son apoyados con el hallazgo de Duquesnay *et al.* (1998), quienes indican que los efectos del aumento de la

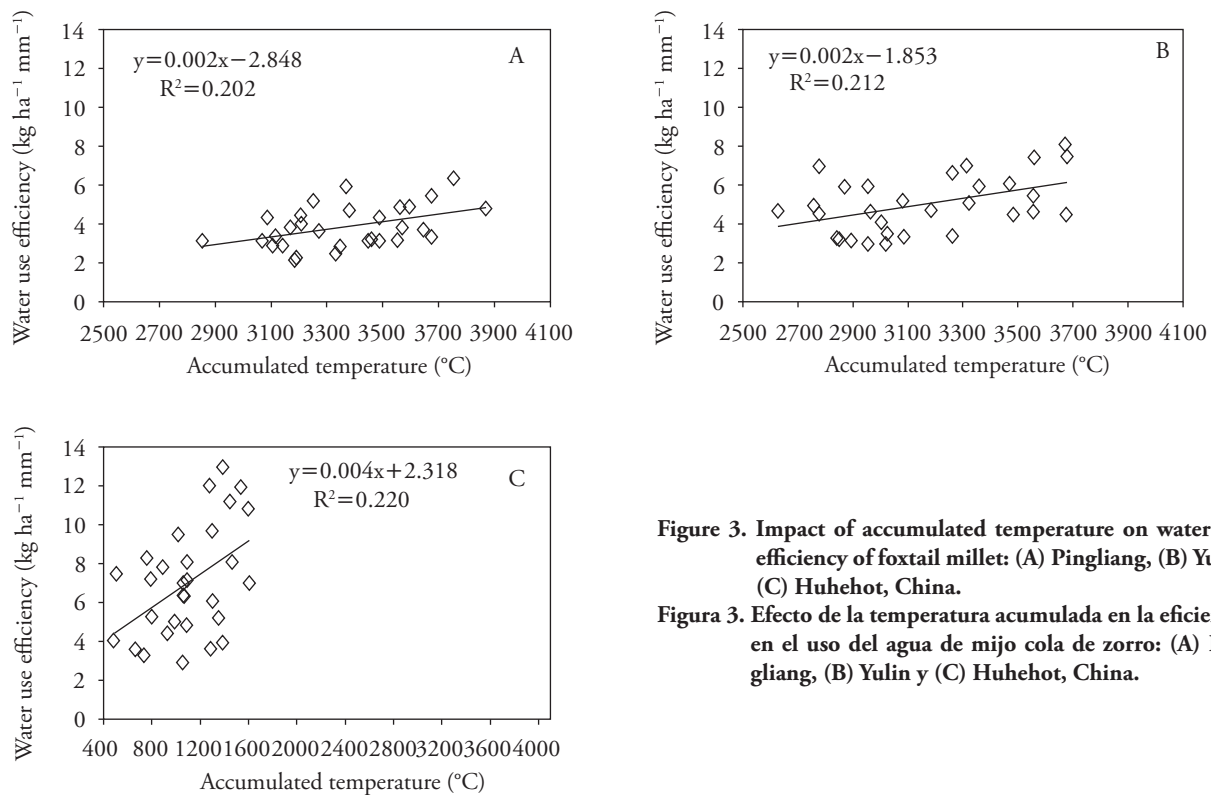


Figure 3. Impact of accumulated temperature on water use efficiency of foxtail millet: (A) Pingliang, (B) Yulin, (C) Huhehot, China.

Figura 3. Efecto de la temperatura acumulada en la eficiencia en el uso del agua de mijo cola de zorro: (A) Pingliang, (B) Yulin y (C) Huhehot, China.

by 100 °C between 1978 and 2007. This indicates that an increase in WUE of foxtail millet may be the manifestation of an adaptation to arid and semi-arid environments, which is supported by the finding of Zou *et al* (2010) in *Haloxylon ammodendron*.

Water use efficiency of foxtail millet and rainfall change

Farquhar *et al.* (1982) suggest that many factors, such as precipitation rise, stomatal conductance and high transpiration rates, result in low WUE of plants in humid and semi-humid areas. These factors, particularly rainfall, played an important role in WUE of plant (Xie *et al.*, 2016). In our study, WUE of foxtail millet decreased when rainfall increased (Figure 4). In other words, rainfall decreased 100 mm between 1978 and 2007, whereas WUE of foxtail millet increased about 1.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Figure 4). Increasing rainfall may improve crops yield (He *et al.*, 2013). However, rainfall rise limited increment of ¹³C content in plant leaves, which caused WUE of plants to decrease (Farquhar *et al.*, 1982; Diefendorf *et al.*, 2010). Therefore, increasing rainfall may result

temperatura en EUA de haya fueron positivos a plazo largo. El aumento de EUA en condiciones de calentamiento global indica que la capacidad de vapor de agua aumentó (Philip y Biney, 2002); por lo tanto, EUA de la planta aumentó en respuesta al ajustarse a la sequía (Figura 3) (Zou *et al.*, 2010). La EUA de mijo cola de zorro aumentó alrededor de 0.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ con el incremento de la temperatura acumulada de 100 °C de 1978 a 2007. Esto indica que un aumento en EUA de mijo cola de zorro puede ser la manifestación de una adaptación a ambientes áridos y semiáridos, lo que está apoyado por el hallazgo de Zou *et al.* (2010) en *Haloxylon ammodendron*.

Eficiencia en el uso del agua de mijo cola de zorro y el cambio de la precipitación

Farquhar *et al.* (1982) sugieren que muchos factores, como el aumento en precipitación, conductancia estomática y tasas de transpiración altas, resultan en disminución de EUA de las plantas en zonas húmedas y semihúmedas. Estos factores, particular las precipitaciones, tienen una función importante en EUA de la planta (Xie *et al.*, 2016). En nuestro estudio,

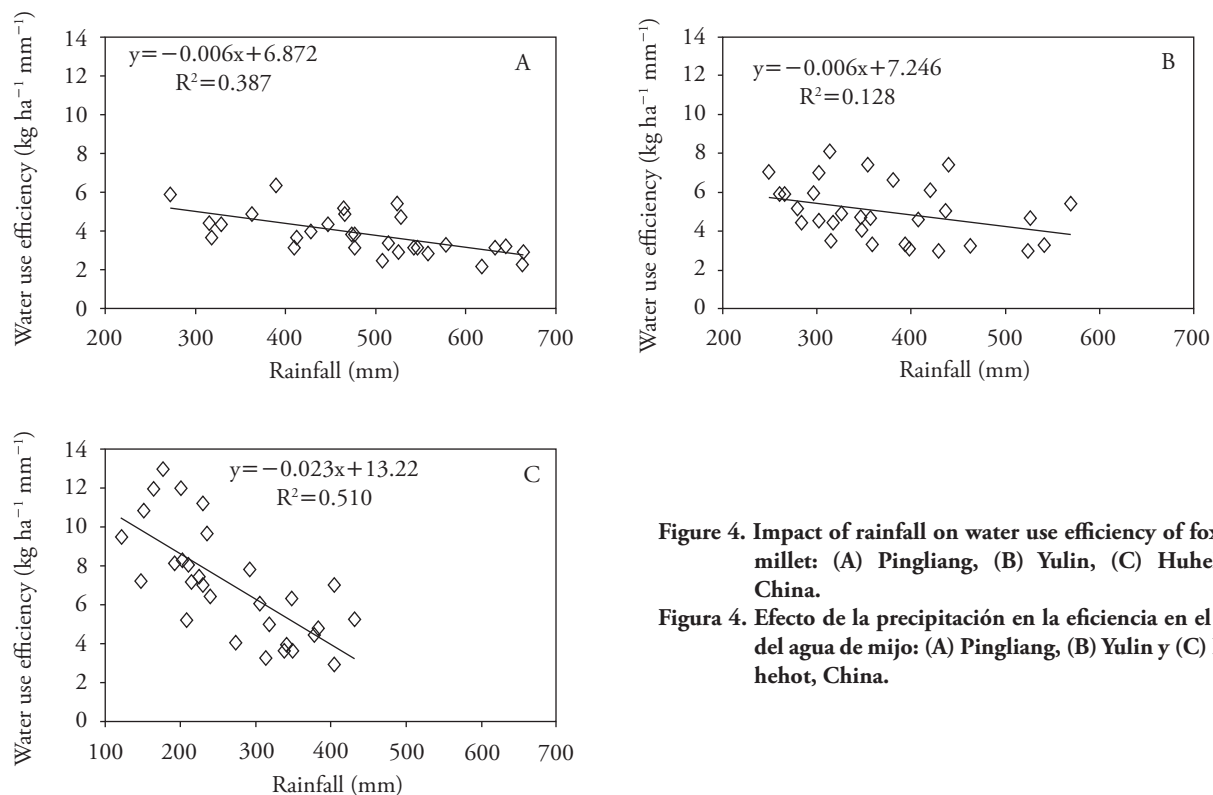


Figure 4. Impact of rainfall on water use efficiency of foxtail millet: (A) Pingliang, (B) Yulin, (C) Huhehot, China.

Figura 4. Efecto de la precipitación en la eficiencia en el uso del agua de mijo: (A) Pingliang, (B) Yulin y (C) Huhehot, China.

in WUE of foxtail millet to decrease. Oppositely, temperature warming led to decreasing rainfall between 1978 and 2007, and drought frequency and duration were enhanced. These factors played a positive effect on increasing WUE of foxtail millet. These results agree with the finding of Ogaya and Penuelas (2003), who found that crops in arid and semi-arid environments, had a higher WUE compared with that of humid environments.

A study by Chen *et al.* (2003) show that WUE of desert plants had a significantly negative correlation with annual precipitation. Ogaya and Penuelas (2003) report a high WUE of plants under drought conditions. In our study, WUE of foxtail millet was higher as rainfall decreased, suggesting that WUE it improved in drought environments. In the long term, drought caused plants to change to adapt to drought, such as low stomatal conductance and transpiration rate, and high ^{13}C content in plant leaves. Variation of these factors directly resulted in high WUE (Yang *et al.* 2007; Prentice *et al.* 2011). Foxtail millet was planted since long ago and may have increased its WUE to adapt to arid environments in the Northwest of China.

Temperature variation and rain-fed farming

Global warming is a fact all over the world (Agnes *et al.*, 2016). Temperature has changed and influenced crop production significantly (He *et al.*, 2015). Agriculture is one of the most climate dependent economic sectors (Hansen, 2002), especially in rain-fed regions. In our study, Huhehot, a high latitude region (N 40° 51'), had high CV of accumulated temperature and rainfall (Figure 5). This indicated that temperature warming and decreasing rainfall were severely altered in arid and semi-arid regions of high latitudes in China, coinciding with findings from Ding (2007).

Average WUE of foxtail millet between 1978 and 2007 increased when CV of accumulated temperature and rainfall moved up (Figure 6). These results suggest that temperature warming and decreasing rainfall were important factors in enhancing WUE of foxtail millet. Although temperature rise may increase WUE of crops, this is a negative adaptation under water-stress conditions. There are suggested negative impacts on crop yield due to climate warming in arid and semi-arid areas (Knox *et al.*, 2012; Muller,

EUA del mijo cola de zorro disminuyó cuando la precipitación aumentó (Figura 4). Es decir la precipitación disminuyó 100 mm de 1978 a 2007, mientras que EUA de mijo cola de zorro aumentó alrededor de $1.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figura 4). El aumento de la precipitación puede mejorar el rendimiento de los cultivos (He *et al.*, 2013). Sin embargo, el aumento de la precipitación limitó el incremento del contenido de ^{13}C en hojas de la planta, lo cual causó reducción en EUA de las plantas (Farquhar *et al.*, 1982; Diefendorf *et al.*, 2010). Por lo tanto, el aumento de la precipitación puede reducir la EUA en mijo cola de zorro. Al contrario, el incremento de temperatura condujo a la reducción de las lluvias de 1978 a 2007, y la frecuencia y duración de las sequías aumentó. Estos factores tuvieron un efecto positivo en el aumento de EUA en mijo cola de zorro. Estos resultados coinciden con los de Ogaya y Penuelas (2003), quienes muestran que los cultivos en ambientes áridos y semiáridos tuvieron EUA mayor en comparación con la de ambientes húmedos.

Un estudio de Chen *et al.* (2003) muestra que EUA de las plantas del desierto tuvo correlación negativa y significativa con la precipitación anual. Ogaya y Penuelas (2003) reportan una EUA alta de las plantas en condiciones de sequía. En nuestro estudio, EUA de mijo cola de zorro fue mayor al disminuir la precipitación, lo cual sugiere que mejoró en ambientes con sequía. A largo plazo, la sequía causó que las plantas se adaptaran a la sequía, como conductancia estomática y tasa de transpiración bajas, y contenido mayor de ^{13}C en las hojas de las plantas. La variación de estos factores tuvo efecto directo en EUA mayor (Yang *et al.*, 2007; Prentice *et al.*, 2011). El mijo cola de zorro se ha cultivado desde hace mucho tiempo y puedo haber aumentado su EUA para adaptarse a los ambientes áridos del noroeste de China.

Variación de la temperatura y la agricultura de secano

El calentamiento global es un hecho en el mundo (Agnes *et al.*, 2016). La temperatura ha cambiado y afectado significativamente la producción de los cultivos (He *et al.*, 2015). La agricultura es uno de los sectores económicos que dependen más del clima (Hansen, 2002), en especial en las regiones de secano. En nuestro estudio, Huhehot, una región con latitud alta (N 40° 51'), tuvo CV alto en la temperatura

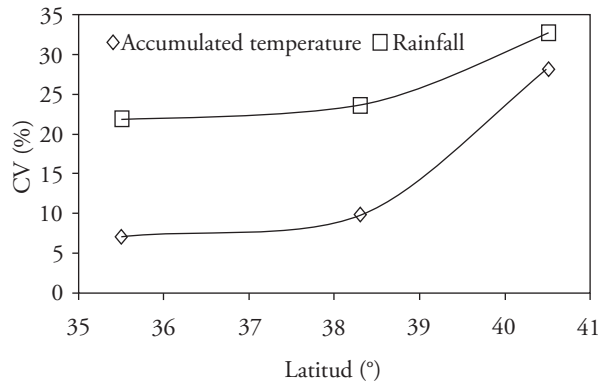


Figure 5. Relationship between coefficient of variation (CV) and latitudes of study areas (Pingliang, Yulin, and Huhehot, China).

Figura 5. Relación entre el coeficiente de variación (CV) y las latitudes de las áreas de estudio (Pingliang, Yulin y Huhehot, China).

2013; Nkulumo *et al.*, 2014). If temperature rise and precipitation decrease to a point that cannot meet crops need, food security is at risk in arid and semi-arid regions (Zhang *et al.*, 2013a).

How limited rainfall can be used more efficiency? How to save rainfall? What to plant? How to plant? These are important questions that need to be answered to adapt to the agricultural challenge posed by recent temperature warming in arid and semi-arid areas of China. Adjusting plantation structure among different crops and increasing plant areas of crops with high WUE to protect from drought,

acumulada y la precipitaciones (Figura 5). Esto indica que el calentamiento global y la reducción de la precipitación tuvieron una alteración severa en regiones áridas y semiáridas de latitudes altas en China, lo cual coincide con los hallazgos de Ding (2007).

La EUA promedio de mijo cola de zorro de 1978 a 2007 aumentó cuando el CV de la temperatura acumulada y de la precipitación fue más alto (Figura 6). Estos resultados sugieren que el calentamiento global y la disminución de la precipitación fueron factores importantes en la mejoría de EUA de mijo cola de zorro. Aunque el aumento de temperatura puede incrementar EUA de los cultivos, esta es una adaptación negativa en condiciones de estrés hídrico. Hay impactos negativos en el rendimiento del cultivo debido al calentamiento global en las zonas áridas y semiáridas (Knox *et al.*, 2012; Muller, 2013; Nkulumo *et al.*, 2014). Si la temperatura se eleva y la precipitación disminuye hasta un punto que no satisfagan las necesidades de los cultivos, la seguridad alimentaria en regiones áridas y semiáridas está en riesgo (Zhang *et al.*, 2013a).

¿Cómo puede utilizarse eficientemente la precipitación limitada? ¿Cómo ahorrar la precipitación? ¿Qué hay que plantar? ¿Cómo plantar? Estas son preguntas importantes que necesitan contestarse para adaptar la agricultura al reto del calentamiento global reciente en las zonas áridas y semiáridas de China. Ajustar la estructura de plantación entre los diferentes cultivos y aumentar las áreas de cultivos con EUA alta, para protegerlos de la sequía, como mijo cola de zorro, mijo y sorgo, son necesarios para aumentar la

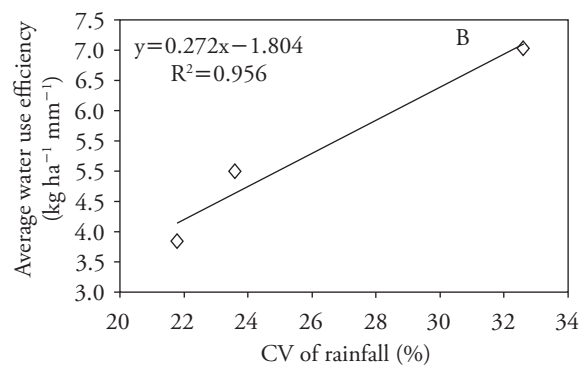
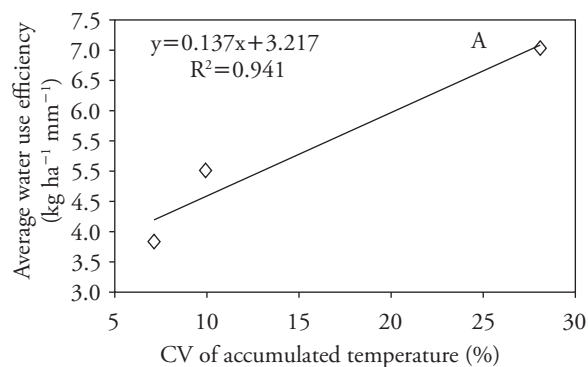


Figure 6. Impact of coefficient of variation on average water use efficiency of foxtail millet; A: accumulated temperature, B: rainfall.

Figura 6. Efecto del coeficiente de variación en la eficiencia en el uso del agua promedio de mijo cola de zorro; A: temperatura acumulada, B: precipitación.

such as foxtail millet, proso millet, and sorghum, are necessary for increasing food security. Moreover, farming techniques that have a high effect on conserving rainfall and increasing yield of crops in arid and semi-arid areas, such as conservation tillage (Amir *et al.*, 2012), plastic-film mulching (Wang *et al.*, 2004), rainfall harvesting system based on special soil tillage (Qu *et al.*, 2012), and limited and supplement irrigation (Christian *et al.*, 2010), should be adopted by farmers and spread for food production in arid and semi-arid areas of China.

CONCLUSIONS

Temperature warming and decreasing precipitation have caused severe droughts in arid and semi-arid regions in China. However, these conditions have resulted in high WUE of foxtail millet to adapt arid environment between 1978 and 2007. To mitigate the influences of global warming on crop production in arid and semi-arid regions strategies such as improving crop distribution, increasing plant areas of foxtail millet with high WUE, and the adoption of drought-resistant farming techniques should be used in the northwest regions of China.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Special Fund of Nature Science in China (Project No. 31371529), Plan of Technology Support (Project No. 2014BAD07B03), and National Millet Crops Research and Development System (Project No. CARS-07-12.5-A9).

LITERATURE CITED

- Agnes, T. P., R. Munmun, K. Virender, and G. Mahesh. 2016. Quantifying changes to the global warming potential of rice wheat systems with the adoption of conservation agriculture in northwestern India. *Agric. Ecosyst. Environ.* 219: 125-137.
- Amir, L., F. Theodor, D. Role, L. Rabah, M. Rachid, B. Gottlieb, J. Emilio, S. Gonzalez, and S. Rachid. 2012. Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. *Field Crop Res.* 132: 7-17.
- Avolio, E., L. Pasqualoni, S. Federico, M. Fornaciari, T. Bonofiglio, F. Orlandi, C. Belleci, and B. Romano. 2008. Correlation between large-scale atmospheric fields and the olive pollen season in Central Italy. *Int. J. Biometeorol.* 52: 787-796.

seguridad alimentaria. Además, las técnicas de cultivo que tienen un efecto alto para conservar la precipitación y aumentar el rendimiento de los cultivos en zonas áridas y semiáridas, como labranza de conservación (Amir *et al.*, 2012), acolchado de película plástica (Wang *et al.*, 2004), sistema de recolección de precipitación basado en la labranza especial del suelo (Qu *et al.*, 2012), y riego limitado y de suplemento (Christian *et al.*, 2010), deben adoptarlas los agricultores y ampliar la producción de alimentos en las zonas áridas y semiáridas de China.

CONCLUSIONES

El calentamiento global y la reducción de la precipitación han causado sequías graves en regiones áridas y semiáridas en China. Sin embargo, estas condiciones han resultado en alta EUA de mijo cola de zorro para adaptarse a ambientes árido de 1978 a 2007. Para mitigar los efectos del calentamiento global en la producción agrícola de las regiones áridas y semiáridas las estrategias, como mejoramiento de la distribución de los cultivos, aumento de áreas de cultivo con mijo cola de zorro con EUA alta, y la adopción de técnicas de cultivo para la resistencia a la sequía, deben utilizarse en las regiones del noroeste de China.

—Fin de la versión en Español—

—*—

- Chen, T., M.X. Yang, and H. Y. Feng. 2003. Spatial distribution of stable carbon isotope compositions of plant leaves in the north of the Tibetan Plateau. *J. Glaciol. Geocryol.* 25: 83-87.
- Christian, R. J., B. Adriano, P. Finn, P. Georgious, and C. Kostas. 2010. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signaling in potatoes and tomatoes. *Agric. Water Manage.* 98: 403-413.
- Diefendorf, A. F., K. E. Mueller, and S. Wing. 2010. Global patterns in leaf ^{13}C discrimination and implications for studies of past and future climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 107: 5738-5743.
- Ding, Y. H. 2007. Detection, cause and projection of climate change over China: an over review of recent progress. *Adv. Atmos. Sci.* 24: 954-971.
- Duquesnay, A., N. Breda, and M. Stievenard. 1998. Changes of tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ and WUE of beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France during the past century. *Plant Cell Environ.* 21: 565-572.

- Farquhar, G. D., M. H. O'Leary, and J. A. Berry. 1982. On the relationship between carbon isotope discrimination and the inter-cellular carbon-dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol.* 9:121-137.
- Galán, C., H. García-Mozo, P. Carinanos, P. Alcazar, and E. Domínguez-Vilches. 2001. The role of temperature in the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in southwestern Spain. *Int. J. Biometeorol.* 45: 8-12.
- García-Pérez, and Cruz-Medina. 2009. Variability of rainfall in the North Pacific region of México. *Agrociencia* 43: 1-9.
- Giannakopoulos, C., P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou, and C. M. Goodess. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming. *Global Planet Change* 68: 209-224.
- Hansen, J. W. 2002. Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues approaches, challenges. *Agric. Syst.* 74: 309-330.
- He, L., S. Asseng, G. Zhao, D. Wu, and X. Y. Yang. 2015. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agric. Forest Meteorol.* 200: 135-143.
- He, Y., Y.S. Wei, R. DePauw, B.D. Qian, and R. Lemke. 2013. Spring wheat yield in the semi-arid Canadian prairies: Effects of precipitation timing and soil texture over recent 30 years. *Field Crop Res.* 149: 329-337.
- Knox, J., T. Hess, A. Daccache, and T. Wheeler. 2012. Climate change impacts on crop productivity in Africa and Latin America. *Field Crop Res.* 149: 329-337.
- Lazar, T., T. Mladen, S. P. Luis, P. Claudia, and L. Piero. 2014. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agric. Water Manage.* 144: 54-68.
- Lioubimtseva, E., and G. M. Henebry. 2009. Climate and environmental change in arid Central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations. *J. Arid Environ.* 73: 963-977.
- Loader, N., V. Switsur, and E. Field. 1995. High-resolution stable isotope analysis of tree rings: Implications of 'microden-droclimatology' for palaeo-environmental research. *Holocene* 5: 457-460.
- Moriondo, M., M. Bindi, Z.W. Kundzewicz, M. Szwed, and A. Wreford. 2010. Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability. *Mitig. Adapt. Strat. Gl.* 15: 657-679.
- Muller, C. 2013. African lessons on climate change risks for agriculture. *Annu. Rev. Nutr.* 33: 395-411.
- Nicotra, A. B., M. J. Cosgrove, and A. Cowling. 2008. Leaf shape linked to photosynthetic rates and temperature optima in South African *Pelargonium* species. *Oecologia* 154: 625-635.
- Nkulumo, Z., C. Olivier, H. Sepo, and T. Mark. 2014. Local impacts of climate change and agronomic practices on dry land crops in Southern Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197: 1-10.
- Ogaya, R. and J. Penuelas. 2003. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: Photosynthetic response to experimental drought conditions. *Environ Exp. Bot.* 50: 137-148.
- Olesen, J. E., M. Trnka, K. C. Kersebaum, A. O. Skjelvag, B. Seguin, and F. Micale. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *Eur. J. Agron.* 34: 96-112.
- Olesen, J. E., T. R. Carter, C. H. Diaz-Ambrona, S. Fronzek, and M. T. Sykes. 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Clim. Change* 81(S1): 123-143.
- Osborne, C. P., I. Chuine, D. Viner, and F. I. Woodward. 2000. Olive phenology as a sensitive indicator of future climatic warming in the Mediterranean. *Plant Cell Environ.* 23: 701-720.
- Oteros, J., H. García-Mozo, L. Vázquez, A. Mestre, E. Domínguez-Vilches, and C. Galán. 2013. Modelling olive phenological response to weather and topography. *Agric. Ecosyst. Environ.* 179: 62-68.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fischer. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Change.* 14: 53-67.
- Philip, G. B., and C. A. Biney. 2002. Management of freshwater bodies in Ghana. *Water Int.* 27:476-484.
- Piao, S. L., P. Ciais, Y. Huang, Z. Shen, and S. Peng. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467: 43-51.
- Prentice, I.C., T.T. Meng, and H., Wang. 2011. Evidence of a universal scaling relationship for leaf CO₂ drawdown along an aridity gradient. *New Phytol.* 190:169-180.
- Qu, Y., W. Su, and P. P. Zhang. 2012. Effects of different water harvesting on soil water, growth and yield of the proso millet (*Panicum miliaceum* L.) in a semi-arid region of northwest China. *J. Agric. Sci.* 4: 106-113.
- Rosenzweig, C., M. L. Parry, G. Fischer, and K. Frohberg. 1993. Climate Change and World Food Supply. Research Report No. 3. University of Oxford, Environmental Change Unit, Oxford. pp: 104-106.
- Schleser, G. H. 1990. Investigations of the $\delta^{13}C$ pattern in leaves of *Fagus sylvatica* L. *J. Exp. Bot.* 41: 565-572.
- Shen, R., S.P. Yang, G. H. Zhao, Q. Shen, and X. M. Diao. 2015. Identification of carotenoids in foxtail millet (*Setaria italica*) and the effects of cooking methods on carotenoid content. *J Cereal Sci.* 61: 86-93.
- Sommer, R., M. Glazirina, T. Yuldashev, A. Otarov, and M. Ibraeva. 2013. Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 178: 78-99.
- Tenhunen, J., O. Roupsard, and S. Rambal. 2002. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biol.* 8: 999-1017.
- Wang, C. R., H. X. Tian, and S. X. Li. 2004. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for water-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat. *Agric. Sci. China.* 37: 208-214.
- Wang, J. X. 2009. The impact of climate change on China's agriculture. *Agric. Econ.* 40: 323-337.
- Wei, K., and W. Chen. 2009. Climatology and trends of high temperature extremes across China in summer. *Terr. Atmos. Ocean Sci.* 2: 153-158.
- Xiao, G., F. Zheng, Z. Qin, and Y. Yao. 2013. Impact of climate change on WUE by wheat, potato, and corn in semi-arid areas of China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181: 108-114.
- Xie, J., J. Chen, G. Sun, T. S. Zha, and B. Yang. 2016. Ten-year variability in ecosystem WUE in an oak-dominated

- temperate forest under a warming climate. *Agric. Forest. Meteorol.* 218-219: 209-217.
- Yang, L. M., M. Han, and G. S. Zhou. 2007. The changes of water-use efficiency and stomadensity of *Leymus chinensis* along Northeast China Transect. *Acta Ecologica Sinica* 27: 16-24.
- Yepetz, E.A., R. L. Scott, and W. L. Cable. 2007. Intraseasonal variation in water and car-bon dioxide flux components in a semiarid riparian woodland. *Ecosystems* 10: 1100-1115.
- Zhang, G.L., J. W. Dong, C. P. Zhou, and X. L. Xu. 2013a. Increasing cropping intensity in response to climate warming in Tibetan Plateau, China. *Field Crop Res.* 142: 36-46.
- Zhang, Y. C., Y. J. Shen, X. L. Xu, and H. Y. Sun. 2013b. Characteristics of the water- energy- carbon fluxes of irrigation pear (*Pyrus bretschnerideri* Rehd) orchards in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 128: 140-148.
- Zou, T., Y. Li, and H. Xu. 2010. Responses to precipitation treatment for *Haloxylon ammodendron* growing on contrasting textured soils. *Ecol Res.* 25: 185-194.