

การเพิ่มศักยภาพการผลิตพืชในพื้นที่ขาดแคลนน้ำ : ความท้าทาย และโอกาสของนักพืชศาสตร์

Crop productivity improvement in water limited environments : challenging and opportunity of crops scientist

พัชริน ส่องศรี^{1,*}

Patcharin Songsri^{1,*}

บทนำ

ปริมาณน้ำทั้งหมดบนโลกนี้ 97% เป็นน้ำเค็ม ที่อยู่ในทะเล 2.25% เป็นธารน้ำแข็งอยู่ตามขั้วโลก มีเพียงแค่ 0.75% เท่านั้นที่เป็นน้ำจืดตามแหล่งน้ำ ต่างๆ โดยพบว่ามีส่วนการใช้น้ำสำหรับการผลิตใน ภาคการเกษตรสูงถึง 70% ของน้ำจืดทั้งหมด ส่วนอีก 22% ใช้ในภาคอุตสาหกรรม และอีก 8% นำมาใช้เพื่อ อุปโภคและบริโภคในชุมชนเมือง (Prathapar, 2000)

ในปัจจุบันและอนาคตการเพิ่มการแข่งขัน การใช้น้ำในภาคอุตสาหกรรมและชุมชนเมืองมีมากขึ้น และได้ส่งผลทำให้วิกฤตการขาดแคลนน้ำใช้ในการ การเกษตรมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นด้วย (Turner, 2004) ซึ่งสภาวะขาดแคลนน้ำใช้ในการ การเกษตรที่เพิ่มขึ้นนั้นกลายเป็นปัจจัยจำกัดหลักในการ ผลิตทางการเกษตร (agricultural production) และ ความมั่นคงด้านอาหาร (food security) ในศตวรรษ ที่ 21 เนื่องจากในพื้นที่ขาดแคลนน้ำใช้ในการเกษตร นี้พืชจะให้ผลผลิตต่ำและคุณภาพผลิตผลลดลง อย่างมาก ดังนั้นการเพิ่มผลผลิตการใช้น้ำ (water

productivity) (Pereira et al., 2002; Kijne et al., 2003) นับเป็นโอกาสและความท้าทายครั้งสำคัญของ นักพืชศาสตร์ต่อการเพิ่มผลผลิตพืชต่อน้ำใช้ที่มีอยู่ อย่างจำกัด (more crop per drop)

แนวคิดเกี่ยวกับการพัฒนาพันธุ์พืชทนแล้งได้ ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตการให้ผลผลิตในพื้นที่ ใช้น้ำในทางการเกษตรมีจำกัด (water productivity or “more crop per drop”) การผสมผสานระหว่าง (i) การจัดการเขตกรรม ได้แก่ การจัดการให้น้ำ และ ดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ(Pereira et al., 2002; Passioura, 2006) และ (ii) การจัดการพืชโดย การปรับปรุงพันธุ์ให้ทนแล้งและมีประสิทธิภาพการ ใช้น้ำสูงนั้นจำเป็นที่จะช่วยนำไปสู่เป้าหมายในการเพิ่ม ผลิตภาพในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Turner, 2004; Passioura, 2006) การที่จะนำไปสู่ เป้าหมายดังกล่าวได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการ ศึกษาและงานวิจัยเชิงบูรณาการ (integrated) จาก นักพืชศาสตร์สาขาต่างๆ เช่น นักสรีรวิทยาพืช นักปรับปรุงพันธุ์พืช นักเทคโนโลยีชีวภาพ ในเชิง บูรณาการ รวมทั้งนำเทคโนโลยีจากนักวิจัยถ่ายทอด

¹ ศูนย์ปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

¹ Plant Breeding Research Center for Sustainable Agriculture, Department of Plant Science and Agricultural Resources, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

* Corresponding author e-mail: patcharinso@kku.ac.th

สู่การปฏิบัติจริงในแปลงเกษตรกรรมด้วย ดังนั้น การเรียบเรียงและตรวจเอกสารครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์แนวคิด รายงานการวิจัยและหาข้อสรุปว่า (i) พื้นที่ขาดแคลนน้ำสำหรับการเกษตรในโลกมีมากจนเป็นปัญหาที่สำคัญจริงหรือ? (ii) การที่จะเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพการใช้น้ำในพื้นที่ขาดแคลนน้ำสามารถทำได้จริงหรือ? (iii) ทิศทางการเพิ่มศักยภาพการผลิตและประสิทธิภาพการใช้น้ำในพื้นที่ขาดแคลนน้ำในอนาคตจะต้องทำอย่างไร

ตัวชี้วัด (indicator) ที่บ่งถึงการขาดแคลนน้ำ (water scarcity)

ปัญหาการขาดแคลนน้ำสำหรับการเกษตรนั้น ปรากฏให้เห็นว่าได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่แน่ใจว่าจะเป็นเรื่องยากที่เราจะตอบคำถามว่าการขาดแคลนนํานี้จริง ๆ ซึ่งเกิดมาจากน้ำมีไม่พอใช้ (a supply problem) หรือพอเพียงแต่ไม่สามารถนำมาใช้ได้เต็มที่ (a demand problem) ซึ่งในเอกสารนี้จะได้นำเสนอตัวชี้วัด (indicator) ต่างๆ และการประเมินพื้นที่การขาดแคลนน้ำในโลกโดยตัวชี้วัดต่างๆ เหล่านั้น เพื่อให้สามารถตอบคำถามนั้นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

The Falkenmark water stress indicator

ได้มีการใช้ Falkenmark indicator or “water stress index” (Falkenmark et al., 1989) วัดระดับการขาดแคลนน้ำกันอย่างกว้างขวาง โดยได้กำหนดปริมาณน้ำ 1700 m³ ต่อ คน ต่อ ปี เป็นเกณฑ์การแบ่งความพอเพียงสำหรับน้ำใช้ในครัวเรือน การเกษตร อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม แต่ถ้าหากประเทศใดมีปริมาณน้ำใช้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้นนี้แล้วก็จะถูกจัดว่าขาดแคลนน้ำ โดยในกลุ่มที่ขาดแคลนน้ำนี้ได้จำแนกออกเป็น 2 ระดับคือ มีปริมาณน้ำใช้ต่ำกว่า 1000 m³ จัดอยู่ในระดับที่ขาดน้ำ หรือ experiences water scarcity แต่ถ้าหากมีปริมาณน้ำใช้ต่ำกว่า 500 m³ จัดว่าขาดน้ำอย่างแท้จริง หรือ absolute scarcity

จุดเด่นของตัวชี้วัดนี้คือ 1) ข้อมูลจากตัวชี้วัดนี้สามารถนำไปใช้ได้เลย และ 2) ความหมายของตัวชี้วัดได้อธิบายในตัวและง่ายต่อการเข้าใจ แต่ก็มีจุดด้อยคือ 1) ค่าเฉลี่ยของประเทศได้ซ่อนส่วนที่สำคัญในส่วนย่อย 2) ตัวชี้วัดนี้ไม่ได้บอกถึงการดัดแปลงของการใช้น้ำ และ 3) เกณฑ์ไม่ได้สะท้อนถึงความต่างที่สำคัญของความต้องการระหว่างประเทศ อันเกิดมาจากความแตกต่างทางวิถีชีวิตและสภาพภูมิอากาศ

The Water Resources Vulnerability Index

Raskin et al. (1997) ใช้ข้อมูลพื้นฐานทรัพยากรน้ำของ Shiklomanov แต่จะให้ความสำคัญของการประเมินการใช้น้ำ มากกว่า ความต้องการน้ำใช้ และนำเสนอระดับการขาดแคลนน้ำรายปีเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเป็นประโยชน์ของทรัพยากรแหล่งน้ำที่เรียกว่า “Water Resources Vulnerability Index” Alcamo et al. (1997, 2000) ได้นิยาม “criticality ratio” ว่าเป็นสัดส่วนระหว่างการใช้น้ำต่อปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้ทั้งหมด โดยตัวชี้วัดการขาดแคลนน้ำนี้ได้จำแนกระดับของการขาดแคลนน้ำโดยใช้ค่า criticality ratio ออกเป็น 2 ระดับได้แก่ 1) ระดับ Mild water scarce ระหว่าง 20-40% ของน้ำใช้ต่อปี และ 2) ระดับ Severely water scarce สูงกว่า 40% ของน้ำใช้ต่อปี แต่ก็ยังพบว่าข้อด้อยของตัวชี้วัดนี้คือ 1) ไม่คำนึงถึงว่าน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้มีเท่าไร 2) ไม่คำนึงถึงน้ำที่ถูกใช้ หรือ คายระเหย (evapotranspired) และปริมาณน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่มีเท่าไร และ 3) ไม่คำนึงถึงความสามารถของชุมชนต่อการจัดการกับความขาดแคลนน้ำ

Physical and economic scarcity indicators

The International Water Management Institute (IWMI) ได้วิเคราะห์การขาดแคลนน้ำในช่วง 2000-2025 โดยพิจารณาจากการนำกลับมาใช้ของทรัพยากรน้ำ ซึ่งได้วิเคราะห์ถึงความต้องการน้ำใช้จากการใช้แล้วหมดไป และน้ำที่สามารถเหลือและนำกลับมาใช้ในระบบอีกครั้ง โดยมีการจำแนกระดับของการขาดน้ำออกเป็น 1) *Physically water scarce* ประเทศที่ไม่สามารถที่จะนำใช้อย่างพอเพียงในปี 2025 ได้

และ 2) *Economically water scarce* ประเทศที่สามารถที่มีแหล่งน้ำสำรองเพียงพอ แต่ต้องมีการลงทุนอย่างมากเพื่อให้ได้น้ำใช้เพียงพอ แต่อย่างไรก็ดีตัวชี้วัดนี้พบว่ามิใช่อัดอวยตรงที่ มีความซับซ้อนและเข้าใจได้ยากไม่เหมือนกับตัวชี้วัดที่วัดเป็นหน่วยต่อคน

Water Poverty Index

Water Poverty Index จะบอกทั้งความเป็นประโยชน์ของน้ำทางกายภาพ ระดับความต้องการน้ำใช้ และการรักษาความมั่นคงทางนิเวศวิทยา โดยตัวชี้วัดนี้จะประเมินทรัพยากรน้ำจาก 5 องค์ประกอบ ได้แก่ ปริมาณ (water quantity) คุณภาพ (water quality) การเปลี่ยนแปลง (variability) ความสามารถในการจัดการน้ำใช้ (capacity for water management) และสภาพแวดล้อม (environmental aspects)

ได้มีการประเมินสภาวะการขาดแคลนน้ำของเขตต่างๆในโลก พบว่าประเทศที่พัฒนาแล้ว (ยุโรป อเมริกาเหนือ ออสเตรเลีย และ ญี่ปุ่น) เมื่อไม่คำนึงถึงทางด้านสภาพแวดล้อมแล้วพบว่าประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำน้อยกว่าประเทศอื่นๆ ในเขตร้อน (arid) ที่มีการขาดแคลนน้ำทั้งทางกายภาพ (physical) และ การขาดแคลนน้ำอย่างชัดเจน (absolute water scarcity) จนมีผลกระทบต่อการผลิตอาหาร และน้ำใช้ เช่น ทางตอนเหนือของแอฟริกา และตะวันออกกลาง พื้นที่ส่วนมากของเอเชีย และแอฟริกา ได้ถูกชี้ขาดจากตัวชี้วัดต่างๆนั้น ได้มีความคิดเห็นที่หลายหลากกันออกไปเกี่ยวกับระดับความรุนแรงของการขาดแคลนน้ำในปี 2025 เขตเพาะปลูกในเอเชีย และพื้นที่ส่วนใหญ่ในแอฟริกา ได้เพิ่มความรุนแรงของการขาดแคลนน้ำที่ทำให้ยากกลายเป็นปัจจัยจำกัดการผลิตอาหาร ส่วนในละตินอเมริกา มีปัญหาเรื่องการขาดแคลนน้ำน้อย แต่จากการวิเคราะห์ของ The International Water Management Institute (IWMI) ถูกจัดว่าขาดแคลนน้ำในระดับเศรษฐกิจ (economically water scarce) เกาะเล็กแถบทะเลแคริบเบียน และแปซิฟิก มีการขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรงและมีแนวโน้มทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นบางส่วนของยุโรป อเมริกาเหนือ ออสเตรเลียตะวันออกเฉียงใต้ และอเมริกาใต้ เมื่อ

คำนึงถึงความจำเป็นในการใช้น้ำทางนิเวศวิทยา แล้วก็จะพบว่ามีการขาดแคลนน้ำ โดยเฉพาะในเขตการเกษตรชลประทาน และในเขตที่มีการแข่งขันในแหล่งน้ำ เช่น หลายๆ ส่วนในเอเชียเน้นได้เพิ่มความรุนแรงมากยิ่งขึ้น

จากตัวชี้วัดการขาดแคลนน้ำต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น ต่างมีข้อเด่นและข้อด้อยที่ต่างกัน จึงเป็นเรื่องยากที่จะชี้ชัดว่าตัวชี้วัดใดดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามทุกตัวชี้วัดก็ระบุชัดเจนเกี่ยวกับพื้นที่ขาดแคลนน้ำว่าทรัพยากรแหล่งน้ำได้กลายมาเป็นปัญหาหลักในการผลิตทางการเกษตร ซึ่งการแก้ไขปัญหาน้ำขาดแคลนทางการเกษตรนั้นจำเป็นต้องมุ่งเน้นการเพิ่มผลิตภาพการใช้น้ำ (water productivity หรือ more crop per drop) เพื่อเพิ่มผลิตภาพ (crop productivity improvement) ในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้อย่างยั่งยืน ซึ่งน่าจะเป็นโอกาสและความท้าทายครั้งสำคัญของนักพืชศาสตร์ที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวนี้

ความท้าทายและโอกาสของนักพืชศาสตร์ต่อการเพิ่มผลิตภาพในพื้นที่ขาดแคลนน้ำ

การจัดการการเกษตรกรรม และการชลประทาน

การจัดการดินเพื่อนำไปสู่การใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

การไถพรวน (tillage) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการกักเก็บน้ำในดิน และการระเหยน้ำจากดิน โดยการเพิ่มอัตราการไหลซึม (infiltration rate) มากกว่าการสูญเสียจากการระเหยทางผิวดิน (Hatfield et al., 2001) อย่างไรก็ตาม ได้มีข้อโต้แย้งจากอีกกลุ่มว่าการไม่ไถพรวน (no tillage) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ เนื่องจากลดการสูญเสียน้ำทางผิวดิน (Creswell et al. 1993)

Gibson et al. (1992) พบว่าการลดความถี่ในการไถจะช่วยทำให้เพิ่มการนำน้ำจากดินออกมาใช้ แต่การไม่ไถพรวนนั่นไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำข้อโต้แย้งต่างๆนั้น ยังไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนถึงความสัมพันธ์ระหว่างระบบการไถพรวนและประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช ทำให้เรื่องของ

การจัดการซากร่วมกับระบบการไถพรวนเข้ามามีบทบาทสำคัญในการอธิบาย และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ

การจัดการซากพืช (crop residue management)
การคลุมผิวดินด้วยเศษซากพืชมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพการใช้น้ำ โดยลดการคายระเหย ลดอุณหภูมิดิน Sauer et al. (1996) พบว่า การคลุมผิวดินด้วยเศษซากพืชจะลดการคายระเหย (evaporation) 34-50% และช่วยให้ความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินเพิ่มขึ้น การใช้ซากคลุมผิวดินจะทำให้อุณหภูมิดินต่ำกว่าดินที่ไถทิ้งไว้ (Wilhelm et al., 1989) เนื่องจากการจัดการซากพืชจะไปช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินซึ่งได้ส่งผลทำให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ดีจึงทำให้พืชมีประสิทธิภาพการใช้น้ำเพิ่มขึ้น

สถานะของธาตุอาหาร (soil nutrition status)
ในดินมีความสัมพันธ์ทางบวกกับประสิทธิภาพการใช้น้ำ (Hatfield et al., 2001) ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของดิน การไถพรวน แหล่งของไนโตรเจน พืชหมุนเวียน และปริมาณน้ำฝน การจัดการการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ เนื่องจากการเพิ่มองค์ประกอบผลผลิตของพืช นอกจากนี้แล้วการจัดการซากพืชที่ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำนั้น อาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจน (N dynamics) ในดิน Corak et al. (1991) พบว่าการเพิ่มปุ๋ยไนโตรเจนพร้อมกับซากต้น hairy vetch (*Vicia villosa* Roth.) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ

การให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสกับพืชแล้วช่วยทำให้พืชมีประสิทธิภาพการใช้น้ำเพิ่มขึ้นนั้น ได้มีการรายงานไว้เพียงบางพืชเท่านั้น เช่น Singh and Bhushan (1980) พบว่าการเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัสให้กับ chickpea ทำให้มีผลผลิต และประสิทธิภาพการใช้น้ำเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการใช้น้ำเพิ่มจาก 8.5 เป็น 12.2 กก. / เฮกแตร์ / มม. เมื่อให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0 และ 100 กก. ฟอสฟอรัส / เฮกแตร์ Payne et al. (1992, 1995) พบว่าในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ เมื่อเติมปุ๋ย

ฟอสฟอรัสจะทำให้ ผลผลิต และประสิทธิภาพการใช้น้ำของ pearl millet เพิ่มขึ้น

สถานะของธาตุอาหารในดินมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช เนื่องจากพืชมีการเพิ่มประสิทธิภาพของการเจริญเติบโต ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มปริมาณน้ำหนักแห้งพืชต่อปริมาณน้ำใช้นั่นเอง

การจัดการดิน (soil management practices)
ทำให้เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (holding capacity) การเพิ่มความสามารถของรากในการนำน้ำจากดิน หรือ ลดการสูญเสียน้ำจากการซึมลงลึกเกินชั้นที่มีรากหนาแน่น (root zone) จะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ และเพิ่มผลผลิต การจัดการและปรับปรุงดินที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ เช่น การไถพรวนที่เหมาะสม และการจัดการซากพืชจะมีผลต่ออัตราการคายระเหย (evapotranspiration) และการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน (soil organic matter) ทำให้ดินมีความสามารถการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินด้วยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุนั้นมีความแตกต่างกันในดินแต่ละชนิด (Hudson, 1994) อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดการดินต่างๆ ที่นำไปสู่การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของน้ำในชั้น root zone ก็จะทำให้เพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้น้ำ อันเนื่องมาจากสามารถนำน้ำและธาตุอาหารมาใช้ได้เพิ่มขึ้น (Hatfield et al., 2001) การผลิตทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพและมีความยั่งยืนยังคงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการเกษตร โดยเฉพาะเรื่องการใช้ในเขตร้อน และเขตร้อนกึ่งแห้งแล้ง (arid and semi-arid regions) เป็นสิ่งที่ถูกคำนึงเป็นลำดับต้นๆ

ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการจัดการดินในรูปแบบต่างๆ นั้นมีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการใช้น้ำ กล่าวคือสมมติว่าปลูกพืชในฤดูกาลเดียวกัน และมีปริมาณน้ำใช้ (water use) เท่ากันนั้น หากมีการจัดการดินที่ดีก็จะสามารถยกระดับของผลผลิตหรือมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นได้ หรือเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำขึ้นนั่นเอง ดัง Figure 1

ดังนั้น ความท้าทายของการพัฒนาการจัดการดินเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำต่อไปคือการวิจัยเพื่อนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับ ปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และธาตุอาหารในดิน ซึ่งความรู้ความเข้าใจนี้จะช่วยให้สามารถจัดการการเกษตรกรรมเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ดียิ่งขึ้น

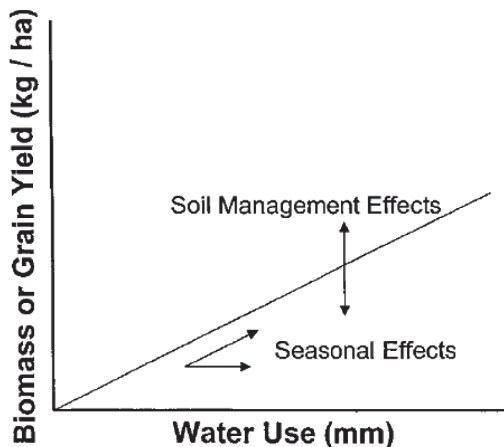


Figure 1 Changes in water use efficiency (WUE) as affected by seasonal and physical changes in soil and nutrient management. (Hatfield et al., 2001)

การจัดการการให้น้ำภายใต้สภาพที่น้ำขาดแคลน

ชนิดของระบบการให้น้ำ (types of irrigation systems)

การให้น้ำทางผิวดิน หรือการให้น้ำแบบไหลบ่า (surface irrigation) เป็นการให้น้ำที่อาศัยความลาดเอียงของพื้นที่เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งอาจเป็นการปล่อยตามร่องที่ถูกยกขึ้นเพื่อปลูกพืช หรือปล่อยราบบนพื้นที่ไม่ได้ยกร่อง การให้น้ำแบบนี้อาจจะใช้ต้นทุนต่ำแต่เนื่องจากความสม่ำเสมอต่ำและมีการสูญเสียน้ำจากการระเหยทางผิวดิน และไหลบ่า ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำที่พืชไม่สามารถใช้ได้ ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมกับพื้นที่ขาดแคลนนํ้า

การให้น้ำแบบสปริงเกลอร์ (sprinkler) การให้น้ำแบบนี้จะมีความสม่ำเสมอสูงกว่าการให้น้ำแบบทางผิวดิน ถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าก็ตาม ความสม่ำเสมอของการให้น้ำแบบสปริงเกลอร์นี้มักจะขึ้นอยู่กับแรงดันน้ำ และ ความเร็วของลม อย่างไรก็ตามการให้น้ำแบบนี้ก็อาจจะเกิดการสูญเสียน้ำจากการระเหยทางผิวดิน และไหลบ่าได้เหมือนกันถ้าหากมีการให้น้ำที่มากเกินไปเกินความต้องการของพืช และอัตราการไหลซึมของดิน

การให้น้ำแบบน้ำหยด (drip irrigation) นับว่าเป็นเทคโนโลยีการให้น้ำที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อประหยัดน้ำใช้และมีความสม่ำเสมอในการให้น้ำสูง รวมทั้งลดการสูญเสียน้ำจากการระเหยทางผิวดินและไหลบ่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบน้ำหยดแบบใต้ดิน (subsurface drip irrigation) หรือมีการใช้พลาสติกคลุมแปลงเพื่อลดการสูญเสียน้ำจากการระเหยทางผิวดิน นอกจากนี้ ระบบน้ำหยดยังสามารถใช้รวมกับการให้สารเคมีไปพร้อมกับการให้น้ำ (chemigation) เช่น ปุ๋ย และ ยาฆ่าแมลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและสารเคมี เนื่องจากพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที และลดการสูญเสียออกจากระบบ

ในพื้นที่ที่น้ำเป็นปัจจัยจำกัดการผลิตพืช การประเมินปริมาณน้ำของพืช (Doorenbos and Kassam, 1986; Doorenbos and Pruitt, 1992) ให้พอดีกับความต้องการน้ำของพืช (crop water requirement) นับว่ามีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ การวางแผน หรือกำหนดขนาดพื้นที่ปลูกพืช และการเตรียมแหล่งน้ำสำหรับการปลูกพืชในแต่ละครั้งให้สอดคล้องกัน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพใช้น้ำสำหรับการเกษตรนั้นได้มีการพัฒนาผ่านเทคโนโลยีการให้น้ำอย่างไม่หยุดยั้ง เนื่องจากปัญหาการขาดน้ำยังคงเป็นปัจจัยจำกัดการผลิต โดยในพื้นที่ขาดแคลนนํ้า แนวทางการจัดการการให้น้ำเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดต่อหยดน้ำ ก็ยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญ

การปรับปรุงพันธุ์พืช และ เทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ

การปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ

การปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อให้มีความทนทานต่อความแห้งแล้ง และมีประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตพืชในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้อย่างยั่งยืน ที่ผ่านมากการปรับปรุงพันธุ์พืชให้ทนแล้งนั้นมักจะทดสอบและคัดเลือกสายพันธุ์ภายใต้สภาพแล้ง เช่น ภายใต้สภาพน้ำฝน โดยใช้ผลผลิตเป็นหลักซึ่งจะพบว่ามีความแปรปรวนในแต่ละปีที่ทำการทดลอง และมีความกำกวมหน้าค่อนข้างซ้ำ การใช้ลักษณะทางสรีรวิทยาที่มีความเสถียรภาพ (stability) สูง และสามารถประเมินได้ง่ายจึงถูกนำมาใช้คัดเลือกในการปรับปรุงพันธุ์พืชแบบปกติ (conventional breeding)

ลักษณะทางสรีรวิทยาของพืชพันธุ์ใหม่สำหรับพื้นที่ขาดแคลนน้ำ

ลักษณะทางสรีรวิทยาได้ถูกนำมาใช้คัดเลือกพันธุ์ให้มีประสิทธิภาพการใช้น้ำสูง เนื่องจาก (i) ลักษณะทางสรีรวิทยานั้นมีความหลากหลายทางพันธุกรรม (genetic variability) (ii) มีความก้าวหน้าเร็วกว่าเนื่องจากค่าความสามารถในการถ่ายทอดพันธุกรรม (heritability) สูงกว่าลักษณะการให้ผลผลิต (iii) สามารถคัดเลือกได้หลายรอบ (more generations) ต่อปี และคุ้มค่าต่อการลงทุนมากกว่าการคัดเลือกลักษณะผลผลิต และ (iv) สามารถนำไปสัมพันธ์กับการใช้เครื่องหมายโมเลกุล (marker-assisted selection) และรวมยีน (genes pyramiding) ที่ควบคุมลักษณะที่จะนำไปสู่การให้ผลผลิตสูงในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้

ตัวอย่างของลักษณะทางสรีรวิทยาที่ประสบความสำเร็จต่อการใช้คัดเลือกพันธุ์ทนแล้ง (Richards, 2004) เช่น (i) ยืดช่วงอายุ (extended duration) การเจริญเติบโตในข้าวสาลี ซึ่งจะทำให้มีการเจริญเติบโตของรากเพิ่มขึ้น และเพิ่มความสามารถในการนำน้ำขึ้นมาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ (ii) เพิ่มความต้านทานการของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ราก (increased axial resistance) ในข้าวสาลี เป็นกลยุทธ์ที่จะช่วยให้สามารถประหยัดน้ำใช้จนถึงระยะเต็มเต็มเมล็ด ซึ่งเป็นช่วงที่สำคัญต่อการให้ผลผลิต (Richards and Passioura, 1989; Richards, 2004) (iii) ความสัมพันธ์ระหว่างการออกไหมและละอองเกสรตัวผู้ (anthesis-silking interval) ในข้าวโพด เพราะการกระทบแล้งทำให้การออกไหมข้าวโพดยืดออกไปจนไม่สามารถเกิดการผสม และติดเมล็ดได้ตามปกติ ดังนั้นหากพันธุ์ที่ไม่ได้รับผลการทบนั้นจะทำให้สามารถรักษาระดับผลผลิตได้แม้จะกระทบแล้ง (iv) การตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixation) ในถั่วเหลือง กิจกรรมการตรึงไนโตรเจนมักจะมีมากขึ้นต่อความขาดน้ำ ดังนั้นพันธุ์ที่รักษาระดับการตรึงไนโตรเจนได้ จึงทำให้ยังคงมีการเจริญเติบโตเป็นปกติ (v) ประสิทธิภาพการคายระเหย (transpiration efficiency; TE) หรือประสิทธิภาพการใช้น้ำในข้าวสาลี เป็นความสามารถของการสร้างมวลชีวภาพต่อหน่วยน้ำใช้ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (vi) Osmotic adjustment ในข้าวสาลี เพื่อปรับค่าศักย์ของน้ำในต้นพืชให้เหมาะสมต่อการเพิ่มขีดความสามารถที่จะนำน้ำเข้ามาใช้ในต้นพืชได้มากขึ้นเมื่อมีน้ำในดินมีจำกัด (vii) Stay-green ในข้าวฟ่าง การรักษาความเขียวให้คงอยู่นั้น มีความเกี่ยวข้องกับการรักษาระดับไนโตรเจน และการลดการหลุดร่วงของใบเมื่อพืชขาดน้ำ (viii) การเจริญเติบโตที่รวดเร็วเพื่อลดการสูญเสียทางผิวดิน (soil evaporation) เพื่อลดปริมาณน้ำที่ไม่ได้ในกระบวนการสร้างมวลชีวภาพที่จะสูญเสียไปเพื่อเพิ่มการคายน้ำ (transpiration) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ (ix) ลด หรือ ยับยั้งการแตกกอ (tiller inhibition) ในข้าวสาลี เพื่อลดส่วนที่ไม่จำเป็นต่อการสร้างผลผลิตเมล็ด และเน้นให้แบ่งสรรปันส่วนไปยังส่วนที่ให้ผลผลิตโดยตรง (x) การสะสมคาร์โบไฮเดรตในลำต้นสำหรับเติมเต็มเมล็ด (carbohydrate storage in stems for grain filling) ถือว่าเป็นส่วนของอาหารสำรองที่สำคัญต่อการเติมเต็มเมล็ดโดยเฉพาะในสภาวะที่น้ำมีจำกัด เพราะการสร้างใหม่ถือว่าเป็นข้อจำกัดในช่วงที่พืชขาดน้ำ

การปรับปรุงพันธุ์โดยเทคโนโลยีชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ

การปรับปรุงพันธุ์โดยเทคโนโลยีชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ ซึ่งได้มีการใช้เครื่องหมายโมเลกุล (molecular markers) ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในพืช (Table 1) จะช่วยย่นระยะเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพของการปรับปรุงพันธุ์พืชให้ทนต่อความแห้งแล้งเนื่องจากลักษณะการทนแล้งนั้น ประกอบไปด้วยหลายลักษณะที่ซับซ้อน (complex traits) และปฏิกริยาสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมอย่างมาก ซึ่งในการปรับปรุงพันธุ์แบบวิธีปกติ (conventional breeding) นั้นเป็นการประเมินและทดสอบพันธุ์จากลักษณะที่ปรากฏ (phenotype) ที่ประกอบไปด้วยการควบคุมของพันธุกรรม และการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม จึงทำให้การคัดเลือกอาจต้องใช้เวลานาน เนื่องจากอาจต้องทดสอบหลายสภาพแวดล้อม เช่น หลายสถานที่ หลายฤดูปลูก เป็นต้น แต่ในทางกลับกัน การปรับปรุง

พันธุ์โดยเทคโนโลยีชีวภาพ (molecular breeding) เป็นการคัดเลือกพันธุ์โดยมุ่งเน้นไปที่ระดับ ดีเอ็นเอ ซึ่งเป็นสารพันธุกรรมที่ควบคุมลักษณะต่างๆ ซึ่งหากเราทราบตำแหน่งลำดับเบสในสายดีเอ็นเอที่ไปควบคุมลักษณะที่ต้องการแล้ว ก็สามารถใช้เป็นเครื่องหมายโมเลกุลในการคัดเลือก (marker-assisted selection; MAS) ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว เพราะได้ตัดปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่เป็นปัญหาต่อการคัดเลือก และทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและความผิดพลาดในการคัดเลือกขึ้นได้

มีการใช้เครื่องหมายโมเลกุลที่ได้ศึกษาไว้เพื่อคัดเลือกลักษณะอื่นแล้ว มาประยุกต์ใช้กับการคัดเลือกพันธุ์พืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ เช่น การใช้เครื่องหมายโมเลกุลของลักษณะ cereal cyst nematode และ acid soil tolerance เพื่อใช้คัดเลือกพันธุ์ทางอ้อมให้มีระบบรากขนาดใหญ่ เป็นต้น ดังใน Table 1

Table 1 Use in breeding programs of markers that may influence water productivity.

Trait	Significance
Resistance to cereal cyst nematode (CCN)	Competent root system
Boron tolerance	Competent root system
Root lesion nematode	Competent root system
Anthesis-silking interval (ASI)	Enables overlap of anthesis and silking in water-limited maize
Rht1, Rht2, dwarfing genes	Select against to avoid short coleoptiles
Rht8 dwarfing genes	Dwarfs shoot but not coleoptiles
Tin, tiller inhibiting gene	Inhibition excess production of tillers in wheat

Source: Passioura (2006)

สำหรับการตัดต่อยีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ ก็พบว่ามีการศึกษาและรายงานพืชหลายชนิด เช่น ข้าว ถั่วเหลือง ส้ม มะเขือเทศ และ ข้าวสาลี ดังแสดงไว้ใน Table 2 อย่างไรก็ตาม การตัดต่อยีนหรือพืชตัดแต่งพันธุกรรม (GM crops) ยังคงมีการโต้แย้งกันเกี่ยวกับความเสี่ยงของพืชตัดแต่งพันธุกรรมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

จึงอาจทำให้การปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำโดยวิธีการการตัดต่อยีนนี้ยังคงเป็นแค่เพียงงานทดลองในห้องปฏิบัติการ ส่วนการนำไปใช้จริงในระดับแปลงเกษตรกรนั้นยังคงต้องรอข้อสรุปที่แน่ชัดของทั้งสองฝ่ายต่อไป

Table 2 Gene transformation for increase water use efficiency.

Genes	Gene Action	Species	Phenotype	Reference
Adc	Polyamine synthesis	Rice	Drought resistance	Capell et al., 2004
SNAC1	Stomatal activity	Rice	Drought and salt tolerance	Hu et al., 2006
WXP1	Epicuticular wax accumulation	Alfalfa	Drought resistance in maintained leaf water status and delayed wilting	Zhang et al., 2005
HVA1	Group 3 LEA protein gene	Wheat	Improved plant water status and yield under field drought conditions	Bahieldin et al., 2005
P5CS	Pyrroline carboxylate synthase (proline synthesis) (tomato)	Soybean	Drought resistance, high RWC, high proline	De Ronde et al., 2004
PPO	Polyphenol oxidases suppression	Tomato	Drought resistance	Thipyapong et al., 2004
P5CS	Pyrroline carboxylate synthase(proline synthesis) (tomato)	Citrus	Osmotic adjustment and drought resistance	Molinari et al., 2004

ข้อสรุปการปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและผลผลิตในอนาคต

1. การปรับปรุงพันธุ์โดยอาศัยความชำนาญ (empirical breeding) ยังคงมีความสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตและการเพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้น้ำ
2. ปัญหาเรื่องโรค และ การเป็นพิษของธาตุอาหาร (nutrient toxicities) อาจจะมีผลกระทบต่อการผลิตพืชลดลง
3. การให้ความสำคัญกับลักษณะหลัก (key traits) ที่ใช้คัดเลือกจะช่วยให้การเพิ่มผลผลิตได้เร็วขึ้น
4. เทคโนโลยีเครื่องหมายโมเลกุล (marker technologies) จะช่วยให้การเพิ่มผลผลิตประสบผลสำเร็จยิ่งขึ้น
5. เทคโนโลยีการตัดต่อยีน (transgenic technologies) จะเข้ามามีบทบาทต่อเพิ่มผลผลิตและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

สรุป

จากตัวชี้วัดการขาดแคลนน้ำต่างๆ ได้ชี้ชัดเจนว่าทรัพยากรแหล่งน้ำได้กลายมาเป็นปัญหาหลักในการผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะ เอเชีย และ แอฟริกา ซึ่งในพื้นที่นั้นจำเป็นต้องได้รับการปรับเปลี่ยนวิถีการใช้น้ำให้สอดคล้องกับสถานการณ์ที่น้ำมีจำกัด การแก้ไขปัญหาขาดแคลนทางการเกษตรจะต้องมุ่งเน้นการเพิ่มผลิตภาพการใช้น้ำ (water productivity หรือ more crop per drop) เพื่อเพิ่มผลิตภาพ (crop productivity improvement) ในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้อย่างยั่งยืน

การเพิ่มศักยภาพการผลิตสามารถทำได้โดย (i) จัดการเขตกรรม และ การให้น้ำ ที่มีการสูญเสียจากส่วนที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (การระเหยทางผิวดิน, การไหลบ่า และ การซึมลงลึกเกินที่รากจะนำมาใช้ได้) และ (ii) การปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ โดยทั้งสองส่วนนี้ต้องมีการผสมผสานกันในเชิงบูรณาการเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งจะกลายมาเป็นความท้าทายและโอกาสสำหรับนักพืชศาสตร์ในการเพิ่มศักยภาพการผลิตพืชในพื้นที่ขาดแคลนน้ำ

ทิศทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในพื้นที่ขาดแคลนน้ำในอนาคต งานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในพื้นที่ขาดแคลนน้ำยังคงมีความจำเป็น และมีความท้าทายสำหรับนักพืชศาสตร์ ความท้าทายของการพัฒนาการจัดการดินเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำต่อไป เช่น การศึกษาปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และธาตุอาหารในดิน ซึ่งจะช่วยให้สามารถจัดการการเกษตรเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำได้ดียิ่งขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพใช้น้ำสำหรับการเกษตรนั้นได้มีการพัฒนาผ่านเทคโนโลยีการให้น้ำอย่างไม่หยุดยั้งเนื่องจากปัญหาการขาดน้ำยังคงเป็นปัจจัยจำกัดการผลิต งานปรับปรุงพันธุ์โดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพจะเข้ามามีบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อการคัดเลือกพันธุ์ที่จะเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเทคนิค Marker-Assisted Selection ดังนั้น การจัดการเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดต่อหยดน้ำ ยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญ และ จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาต่อยอดจากเดิมเพื่อให้การเพิ่มศักยภาพการผลิตในพื้นที่ขาดแคลนน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.สุติพงศ์ อวรรคแสง, อ.ดร.บรรยง ทุมแสน และ รศ. ดร. จรุง พงษ์มธุมน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันมีคุณค่ายิ่งอันเป็นประโยชน์ต่อการรวบรวมเอกสารในครั้งนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar, and S. Siebert. 1997. Global change and global scenarios of water use and availability: an application of water GAP 1.0. University of Kassel, CESR, Kassel, Germany.
- Alcamo, J., T. Henrichs, and T. Rosch. 2000. World water in 2025: global modeling and scenario analysis. In: Rijsberman, F.R. (Ed.), .World Water Scenarios Analyses. World Water Council, Marseille, France.
- Bahieldin, A., H.T. Mahfouz, H.F. Elissa, O.M. Saleh, A.M. Ramadan, I.A. Ahmed, W.E. Dyer, H.A. El-Itriby, and M.A. Madkour. 2005. Field evaluation of transgenic wheat plants stably expressing the HVA1 gene for drought tolerance. *Physiol. Plant.* 123: 421-427.
- Capell, T., L. Bassie, and P. Christou. 2004. Modulation of the polyamine biosynthetic pathway in transgenic rice confers tolerance to drought stress. *PNAS* 101: 9909-9914.
- Corak, S.J., W.W. Frye, and M.S. Smith. 1991. Legume mulch and nitrogen fertilizer effects on soil water and corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1395-1400.
- Cresswell, H.P., D.J. Painter, and K.C. Cameron. 1993. Tillage and water content effects on surface soil hydraulic properties and short- wave albedo. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 816-824.
- De Ronde, J.A., R.N. Laurie, T. Caetano, M.M. Greyling, and I. Kerepesi. 2004. Comparative study between transgenic and non-transgenic soybean lines proved transgenic lines to be more drought tolerant. *Euphytica*. 138: 123-132.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1986. Groundnut. In: Yield response to water FAO irrigation and drainage paper No: 33. FAO, Rome, pp. 97-100.
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1992. Calculation of crop water requirements. In: Guideline for predicting crop water requirement FAO irrigation and drainage paper No: 24. FAO, Rome, pp. 1-65.
- Falkenmark, M., J. Lundquist, and C. Widstrand. 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. *Nat. Resour. Forum.* 13: 258-267.
- Gibson, G., B.J. Radford, and R.G.H. Nielsen. 1992. Fallow management, soil water, plant-available soil nitrogen and grain sorghum production in south west Queensland. *Aust. J. Exp. Agric.* 32: 473-482.
- Hatfield, J.L., T.J. Sauer, and J.H. Prueger. 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. *Agron. J.* 93: 271-280.
- Hu, H., M. Dai, J. Yao, B. Xiao, X. Li, Q. Zhang, and L. Xiong. 2006. Overexpressing a NAM, ATAF, and CUC (NAC) transcription factor enhances drought resistance and salt tolerance in rice. *PNAS* 103: 12987-12992.
- Hudson, B.D.. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Conserv.* 49: 189-194.

- Kijne, J.W., R. Barker, and D.J. Molden. (Eds.). 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CABI, Wallingford, UK.
- Molinari, H.B.C., C.J. Marur, J.C.B. Filho, A. K. Kobayashi, M. Pileggi, R. P. L. Junior, L.F.P. Pereira, and L.G.E. Vieira. 2004. Osmotic adjustment in transgenic citrus rootstock *Carrizo citrange* (*Citrus sinensis* Osb. x *Poncirus trifoliata* L. Raf.) overproducing praline. *Plant Sci.* 167: 1375-1381.
- Passioura, J.. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management, *Agric. Water Manage.* 80: 176-196.
- Pereira, L.S., T. Oweis, and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manag.* 57: 175-206.
- Prathapar, S.A.. 2000. Water shortages in the 21st century. In: H. Cadman, (Ed), *The Food and Environment Tightrope*. Australian Centre for International Agricultural Research, ACT, Canberra (2000), pp. 125-133.
- Raskin, P., P. Gleick, P. Kirshen, G. Pontius, and K. Strzepek. 1997. *Water futures: assessment of long-range patterns and prospects*. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.
- Richards, R.A., 2004. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. T. Fischer (Ed). In: 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia, 26 September – 1 October 2004.
- Richards, R.A., and Passioura, J.B., 1989. A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots of wheat and its effect on grain yield in rainfed environments. *Aust. J. Agric. Res.* 40, 943-950.
- Sauer, T.J., J.L. Hatfield, and J.H. Prueger. 1996. Corn residue age and placement effects on evaporation and soil thermal regime. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1558-1564.
- Singh, G., and L.S. Bhushan. 1980. Water use, water use efficiency, and yield of dryland chickpea as influenced by P fertilization, stored soil water, and crop season rainfall. *Agric. Water Manage.* 2: 299-305.
- Thipyapong, P., J. Melkonian, D.W. Wolfe, and J.C. Steffens. 2004. Suppression of polyphenol oxidases increases stress tolerance in tomato. *Plant Sci.* 167: 693-703.
- Turner, N.C.. 2004. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. *Ann. Appl. Biol.* 144: 139-147.
- Zhang J.Y., C. D. Broeckling, E.B. Blancaflor, M.K. Sledge, L.W. Sumner, and Z.Y. Wang. 2005. Overexpression of WXP1, a putative *Medicago truncatula* AP2 domain-containing transcription factor gene, increases cuticular wax accumulation and enhances drought tolerance in transgenic alfalfa (*Medicago sativa*). *Plant J.* 42: 689-707.
- Zhu, B.C., J. Su, M.C. Chan, D.P.S. Verma, Y.L. Fan, and R. Wu. 1998. Overexpression of a Delta (1)-pyrroline-5-carboxylate synthetase gene and analysis of tolerance to water- and salt-stress in transgenic rice. *Plant Sci.* 139: 41-48.