Thesis Title	Genotypic Variation in Responses to Aerobic and Anaerobic Condition in Rice	
Author	Ms. Nednapa Insalud	
Degree	Doctor of Philosophy (Agronomy)	
Thesis Advisory Committee	Prof. Dr. Benjavan Rerkasem	Chairperson
	Assoc. Prof. Dr. Sansanee Jamjod	Member
	Assoc. Prof. Dr. Richard W. Bell	Member

ABSTRACT

The rainfed rice system covers most of rice growing area in the world, but on average the yield is 50 % lower than in irrigated culture. Its water supply comes from rainfall, the timing and amount of which can not be controlled. Therefore, rainfed rice commonly encounters intermittent waterlogged and aerobic conditions in the root zone through the growth period. The fluctuation of water supply affects availability of oxygen and nutrients, especially phosphorus. Root acclimation to the changing water regimes may in turn result in changes in morphological features and physiological functions such as nutrient uptake efficiency. Therefore, understanding the mechanism of response to changing oxygen and nutrient availability, and how genotypes adapted to different water regimes, should form the basis for development of better adapted rice varieties and fertilization management strategies for the rainfed rice ecosystem. This thesis examined responses of upland and lowland rice cultivars to waterlogging and aerobic conditions, in a series of experiments in soil and nutrient

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

solution. In the first experiment two upland (Sew Mae Jan and Kae Noi) and two lowland (Chainat1 and KDML105) cultivars were studied in soil, comparing the effects of continuous waterlogging and freely drained soil and of transfers between these two soil conditions. Rice plants were harvested at 2 to 10 weeks and root and shoot length, root and shoot dry weight, total root volume, aerenchyma development and nutrient content in plants were assessed. Shoot and root growth of all cultivars were higher in continuous waterlogging than with well drained soil throughout. Exception was Kae Noi, which did not show any difference between waterlogged and well drained soil, but it had smaller growth than the other varieties in both soil conditions. Aerenchyma development of Sew Mae Jan and KDML10 were not different in two water soils conditions, while in waterlogged soil Kae Noi had more aerenchyma at 5 cm from the tip than other three cultivars. Nutrient contents were also generally higher in waterlogged soil. In the second soil experiment, shoot and root growth of three cultivars (Kae Noi, Chainat1 and KDML105) was greater when soils were continuously waterlogged than when exposed to well drained conditions between 2-3 weeks before return to waterlogging. The lack of standing water in any growth stage, especially in the first weeks, depressed rice growth. Overall, in soil, the adaptive responses of roots and shoots to waterlogging overlapped between upland and lowland cultivars.

The composition and oxygen supply of nutrient solution was investigated in order to simulate rice growth in waterlogged and aerobic soil conditions with precise control of oxygen and nutrient supply. Rice growth was determined in solution culture with different air bubbling time to investigate the optimal aeration. Suspension of agar (0.1 % w/v) and flushing of solution with N_2 were tested to

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

simulate depletion of oxygen in waterlogging. Iron (Fe) in different forms (Fe EDTA, $FeSO_4$ and $FeCl_2$) and concentrations (100, 150 and 200 μM) were evaluated to ensure adequate supply for rice growth in solution culture. It was found that rice growth in waterlogged soil was best simulated in aerated solution without interruption of air bubbling. While, rice grown in nutrient solution containing 0.1 % agar was similar to responses in waterlogged soil. Optimum supply of Fe was obtained with Fe EDTA at 100 μM. This was confirmed with several rice cultivars. Therefore, these methods were used to simulate rice response to aerobic (solution culture with air bubbling, termed aerated culture) and waterlogging (with agar, termed stagnant culture) conditions, respectively, in the next experiments.

The rice growth in waterlogged soil was better than in well drained soil, but the growth in aerated culture was better than in stagnant culture. These results suggested that stagnant solution restricts nutrient uptake efficiency possibly due to nutrient depletion zone around roots. While, stagnant culture simulated the oxygen supply of waterlogged soil to roots at least in the short term, it was apparently less effective in similating nutrient supply.

Responses of rice to limited P were determined by growing rice in stagnant and aerated cultures at low P (1.6 μM) and adequate P (200 μM) supply. After transfer to treatments for 2-6 weeks, rice grew best in aerated solution with adequate P supply. Rice in stagnant culture had shorter roots, more root numbers, with fewer tillers, and greater root porosity and aerenchyma formation than in aerated culture. Rice growth was decreased particularly in low P. Determination of short term responses of rice found that only 1-2 days in stagnant culture produced depression of radial oxygen loss (ROL) from roots. Decrease in ROL in stagnant solution culture

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

was followed by distinctive increases in autofluorescence of the exodermis attributed to phenolic compounds immersed in the cell wall. This layer was the putative barrier to radial oxygen loss from roots. The morphological responses of rice to depletion of oxygen supply occurred later the change in ROL and were evident after four days by increase in root elongation, root numbers and tiller numbers. The morphological changes became clearer at eight days, especially increases in aerenchyma formation and root porosity. Decreased ROL, the barrier formation, aerenchyma development and increased root porosity of rice in stagnant culture were associated with a depression in P uptake efficiency of rice root, measurable after two days. Hence the decrease in P uptake efficiency occurred in the same time frame as lowered ROL but preceeded changes in root morphology.

The genotypic variation of rice responses to limited P supply in stagnant and aerated cultures was investigated. Ten Thai rice cultivars, KDML105, Kae Noi, Chainat1, R258, Sew Mae Jan, RD6, Nam Sa Gui19, RD7, Leb Mue Nang111 and Prachinburi1, were grown in stagnant and aerated cultures for 6 weeks to compare the growth and responses to limited P supply. All ten cultivars similarly responded to solution conditions by increase in growth in aerated culture at high P supply but decrease in stagnant culture at low P supply. However, RD7 produced more root and tiller numbers, and higher root and shoot dry weight when grown at low P supply, while it was lower in root elongation and shoot length than other cultivars. By contrast at high P supply, growth of RD7 in aerated culture was also lower than others. The short-term responses of two improved rice cultivars (Chainat1 and RD7) over eight days indicated that RD7 had higher phosphorus uptake efficiency than Chainat1. Variation of responses to P in aerated and stagnant culture was confirmed

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

with three Australian rice cultivars (Langi, Amaroo and Kyeema) at four P levels (1.6, 8, 40 and 200). Growth of all three cultivars were better in aerated culture when solution phosphorus ≥ 8 μM. In summary, from three experiments, there is evidence of cultivar differences in P efficiency at low P in solution culture. In RD7, the apparent P efficiency was associated with greater P uptake efficiency. However, further work is needed to understand the range of cultivar variation in P efficiency under aerobic and anaerobic conditions, and the associated mechanisms.

In conclusion, this thesis has shown that rice roots are sensitive to sudden changes in oxygen supply. When transferred from aerobic to anaerobic conditions roots respond very rapidly, and within one day can lower ROL, however, this change appears to be associated with a decline in P uptake efficiency. Over the following several days, morphological adaption of roots occurs also with increased aerenchyma, porosity and root numbers. The longer term implications of morphological changes have not been examined. The transition from aerobic to anaerobic soil conditions appeared to be more severe for rice root growth than the change from anaerobic to aerobic conditions. Cultivar differences in adaptation to these transitions in soil water regime have not yet been explored. Solution culture, both aerated and stagnant conditions, were useful for examining rice root physiological and morphological responses to root-zone oxygen supply, however, further method development is needed to better simulate nutrient supply of waterlogged soils. Rapid changes in soil water regime can have significant effects on the functioning of rice roots and hence need to be studied in more detail to develop better nutrient management strategies and adapted cultivars for the rainfed rice ecosystems.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ความแตกต่างระหว่างพันธุ์ข้าวในการตอบสนองต่อสภาพออกซิเจนปกติและปลอดออกซิเจน

ผู้เขียน นางสาวเนตรนภา อินสลุด

ปริญญา วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (พืชไร่)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร. เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม ประธานกรรมการ

รศ.ดร. ศันสนีย์ จำจด กรรมการ

รศ.ดร. Richard W. Bell กรรมการ

บทคัดย่อ

ระบบการปลูกข้าวนาน้ำฝนครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นที่การปลูกข้าวทั้งหมดในโลก แต่ผลผลิตข้าวจากระบบนาน้ำฝนนี้ต่ำกว่าการปลูกข้าวในระบบชลประทานถึง 50 % เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณน้ำและช่วงเวลาการตกของฝนได้ ข้าวนาน้ำฝนมักตกอยู่ในสภาพน้ำขังสลับกับน้ำไม่ขังตลอดฤดูปลูก การเปลี่ยนแปลงของสภาพน้ำนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นธาตุอาหารหลัก ดังนั้นข้าวจึงได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยเฉพาะส่วนรากต้องปรับตัวต่อการแปรปรวนของระดับน้ำซึ่งแสดงออกด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานและกระบวนการทางสรีรวิทยา รวมทั้งประสิทธิภาพการดูดหาอาหารของราก ดังนั้นความเข้าใจถึงลักษณะการตอบสนองของข้าวในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนและธาตุอาหาร รวมทั้งความแตกต่างระหว่างพันธุ์ข้าว น่าจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปสู่การปรับปรุงพันธุ์ เพื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

พัฒนาพันธุ์ข้าวให้มีความทนทานต่อสภาพน้ำที่แปรปรวน และการพัฒนาการจัดการปุ๋ยในการทำนาในระบบนาน้ำฝนต่อไป

ในการศึกษานี้จึงได้ตรวจสอบการตอบสนองของข้าวพันธุ์ต่างๆ ต่อสภาพน้ำขังและไม่ขังในดินและในสารละลายอาหารที่จำลองสภาพน้ำขังและไม่ขังที่สามารถควบคุมระดับออกซิเจนและธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบพันธุ์ข้าวไร่ สองพันธุ์ คือ ซิวแม่จัน และแกน้อย พันธุ์ข้าวนาสวนสองพันธุ์ คือ ชัยนาท1 และขาวดอกมะลิ105 ในสภาพดินน้ำขังตลอดการทดลอง สภาพดินระบายน้ำดี และสภาพดินที่มีการขังน้ำสลับกับไม่ขังน้ำ ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่อายุ 2 ถึง 10 สัปดาห์ โดยวัดความยาวราก ความสูงต้น น้ำหนักแห้งราก น้ำหนักแห้งต้น ปริมาตรรากรวม การพัฒนาโพรงอากาศในราก และปริมาณธาตุอาหารในต้นข้าว ในสภาพดินที่ขังน้ำตลอดทั้งต้นและรากของข้าวทุกพันธุ์เจริญเติบโตดีกว่าในสภาพดินระบายน้ำดี ยกเว้นพันธุ์แกน้อย สำหรับการพัฒนาโพรงอากาศในรากของซิวแม่จัน และขาวดอกมะลิ105 ไม่แตกต่างกันทั้งในสองสภาพน้ำ ในขณะที่แกน้อยพัฒนาโพรงอากาศที่ 5 เซนติเมตรจากปลายรากมากกว่าพันธุ์อื่นๆเมื่อปลูกในดินน้ำขัง โดยทั่วไปต้นข้าวในน้ำขังสะสมธาตุอาหารได้ในปริมาณมากกว่าน้ำไม่ขัง สำหรับในสภาพดินที่มีการขังน้ำสลับกับไม่ขังน้ำ รากและต้นเจริญได้ดีไม่เท่าในสภาพดินน้ำขังเมื่อมีน้ำไม่ขังในระยะใดระยะหนึ่ง โดยเฉพาะสัปดาห์แรกๆ ข้าวมีการเจริญเติบโตต่ำกว่าที่ขังน้ำตลอดเวลา ความแตกต่างระหว่างพันธุ์ข้าวในการปรับตัวของรากและต้น ต่อสภาพดินน้ำขังและน้ำไม่ขังมิได้สัมพันธ์กับการเป็นข้าวไร่และข้าวนาสวนแต่อย่างใด

เพื่อจำลองสภาพดินน้ำขังซึ่งเป็นสภาพปลอดออกซิเจน และสภาพดินระบายน้ำดีซึ่งเป็นสภาพออกซิเจนปกติ ให้สามารถควบคุมปริมาณออกซิเจนและธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการปลูกข้าวในสารละลายธาตุอาหาร โดยนำข้าวมาปลูกเปรียบเทียบการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เจริญเติบโตในสารละลายที่ให้ออกซิเจนปริมาณและระยะเวลาต่างกัน เพื่อทดสอบหาสภาพที่เหมาะสมสำหรับการจำลองสภาพดินระบายน้ำดี การผสมวุ้น 0.1 % (น้ำหนัก/ปริมาตร) และการให้ก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการจำลองสภาพดินน้ำขัง รวมทั้งเปรียบเทียบการให้เหล็กในรูปสารประกอบต่างๆ (Fe EDTA $FeSO_4$ และ $FeCl_2$) และความเข้มข้น (100 150 และ 200 μM) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร พบว่าข้าวเจริญเติบโตดีที่สุดเมื่อปลูกในสารละลายที่ให้ออกซิเจนโดยการพ่นฟองอากาศตลอดเวลา และข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่ผสมวุ้นมีการตอบสนองใกล้เคียงกับการปลูกในสภาพน้ำขังมากกว่าการใส่ก๊าซไนโตรเจนลงในสารละลาย นอกจากนี้ข้าวเจริญเติบโตดีเมื่อได้รับธาตุเหล็กในรูป Fe EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 100 μM ซึ่งข้าวหลายพันธุ์เจริญเติบโตดีเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงนำระบบนี้ไปใช้การศึกษาการตอบสนองต่อสภาพออกซิเจนปกติจำลองสภาพดินระบายน้ำ และสภาพปลอดออกซิเจนจำลองสภาพน้ำขัง

ข้าวที่ปลูกในสภาพดินน้ำขังเจริญเติบโตดีกว่าในสภาพดินระบายน้ำดี ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลายออกซิเจนปกติเจริญเติบโตดีกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายปลอดออกซิเจน จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า สภาพปลอดออกซิเจนจำกัดประสิทธิภาพการดูดหาอาหารของข้าว อาจเป็นไปได้ว่าอาจเนื่องจากธาตุอาหารหมดไปจากบริเวณราก ในขณะที่สารละลายปลอดออกซิเจนสามารถจำลองสภาพออกซิเจนสำหรับรากข้าวที่ปลูกในดินน้ำขังซึ่งอย่างน้อยก็ในระยะสั้น แต่เห็นได้ว่าสภาพนี้มีประสิทธิภาพต่ำในการจำลองสภาพธาตุอาหาร

ทำการศึกษาการตอบสนองของข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัสในสภาพปลอดออกซิเจนและสภาพออกซิเจนปกติ โดยนำข้าวมาปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในระดับต่ำ (1.6 μM P) และเพียงพอ (200 μM P) ทั้งในสภาพปลอดออกซิเจนและสภาพออกซิเจน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ปกติ เมื่อย้ายข้าวสู่กรรมวิธีต่างๆ นาน 2-6 สัปดาห์ พบว่าข้าวเจริญเติบโตดีทั้งรากและต้นเมื่อปลูกในสภาพออกซิเจนปกติและได้รับฟอสฟอรัสเพียงพอ ตรงกันข้ามข้าวที่ปลูกในสภาพปลอดออกซิเจนรากสั้น แต่มีปริมาณรากมาก แตกกอน้อย รากมีความพรุนและสร้างโพรงอากาศมาก โดยเฉพาะเมื่อขาดฟอสฟอรัสและขาดออกซิเจนด้วยข้าวเจริญเติบโตได้น้อยกว่าในสภาพอื่น เมื่อได้ศึกษาตอบสนองของข้าวเมื่อปลูกในสภาพขาดฟอสฟอรัสทั้งในสภาพปลอดออกซิเจนและออกซิเจนปกติในระยะสั้น พบว่าเพียง 1-2 วันลักษณะทางสรีระของข้าวตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อสภาพปลอดออกซิเจนโดยลดการสูญเสียออกซิเจนจากรากสู่สารละลาย (Radial oxygen loss) นอกจากนี้การขาดฟอสฟอรัสยังส่งเสริมการสูญหายของออกซิเจนออกจากรากข้าวที่ปลูกในสภาพออกซิเจนปกติแต่ในอัตราที่ต่ำกว่าในสภาพขาดออกซิเจน เมื่อทำการตัดขวางรากและพิจารณาภายใต้กล้อง Fluorescence พบการเรืองแสงของสารจำพวก Phenolic compound ที่สะสมในผนังเซลล์ที่ Exodermal layer และช่วยลดการสูญหายของออกซิเจนจากรากนี้เนื่องจากการสร้างผนังกั้น (Barrier to radial oxygen loss) ของรากข้าว สำหรับการตอบสนองทางสัณฐานของข้าวเริ่มปรากฏในวันที่ 4 โดยการเพิ่มขึ้นของความยาวราก จำนวนราก จำนวนหน่อ และปรากฏชัดเจนมากขึ้นในวันที่ 8 โดยเฉพาะการสร้างโพรงอากาศ (Aerenchyma) และความพรุนราก (Root porosity) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดหาอาหารของรากข้าวโดยเฉพาะการสร้างผนังกั้นของราก การสร้างโพรงอากาศ และความพรุนของรากข้าวที่ปลูกในสภาพปลอดออกซิเจนและขาดฟอสฟอรัสทำให้ประสิทธิภาพการดูดหาอาหารของรากลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถวัดได้หลังจากย้ายลงกรรมวิธีเพียง 2 วัน ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดหาฟอสฟอรัสลดลงเกิดขึ้นเวลาเดียวกับการลดลงของการสูญหายของออกซิเจนจากรากแต่เกิดก่อนการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานของราก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดลองนี้ยังได้ศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างพันธุ์ข้าวต่อการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสในสภาพปลอดออกซิเจน และสภาพออกซิเจนปกติ โดยนำพันธุ์ข้าวไทย 10 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ105 แกน้อย ชัยนาท1 R258 ชิวแม่จัน กข6 น้ำสะกุย19 กข7 เล็บมือนาง111 และ ปราจีนบุรี1 ปลูกในสภาพต่างๆเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสและออกซิเจนนาน 6 สัปดาห์ พบว่าข้าวทั้ง 10 พันธุ์ตอบสนองในแต่ละสภาพคล้ายคลึงกัน โดยเจริญเติบโตดีในสภาพออกซิเจนปกติและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายสูง แต่เจริญเติบโตน้อยสภาพปลอดออกซิเจนและขาดฟอสฟอรัส อย่างไรก็ตาม กข7 เป็นพันธุ์ที่มีจำนวนราก การแตกกอ และน้ำหนักแห้งรากและต้นมากกว่าพันธุ์อื่นในสภาพขาดฟอสฟอรัส แต่เมื่อพิจารณาความยาวรากและความสูงต้นน้อยกว่าพันธุ์อื่น และเมื่อเทียบกับสภาพออกซิเจนและได้รับฟอสฟอรัสเพียงพอ กข7 เจริญได้น้อยกว่าพันธุ์อื่นเช่นกัน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการตอบสนองของข้าวพันธุ์ ชัยนาท1 และ กข7 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ปรับปรุงเช่นเดียวกันต่อสภาพปลอดออกซิเจนและขาดฟอสฟอรัสในระยะสั้น พบว่า กข7 มีประสิทธิภาพในการดูดหาอาหารดีกว่าชัยนาท1 ความแปรปรวนในการตอบสนองต่อฟอสฟอรัสในสภาพมีออกซิเจนปกติ และสภาพปลอดออกซิเจนถูกศึกษาในข้าวพันธุ์ออสเตรเลีย 3 พันธุ์ (Langi Amaroo และ Kyeema) ที่ฟอสฟอรัส 4 ระดับ (1.6 8 40 และ 200 μMP) พบว่าโดยทั่วไปข้าวทั้งสามพันธุ์เจริญเติบโตดีในสภาพออกซิเจนปกติและได้รับฟอสฟอรัสพอเพียงตั้งแต่ 8 μM ขึ้นไป จากทั้ง 3 การทดลอง มีหลักฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของพันธุ์ด้านประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสเมื่อปลูกในสารละลายซึ่งขาดฟอสฟอรัส พันธุ์ RD7 เป็นพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการดูดหาฟอสฟอรัส แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาวิจัยในอนาคตจำเป็นต้องเข้าใจถึงขอบเขตความแปรปรวน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ของพันธุ์ข้าวในด้านประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสภายใต้สภาพมีออกซิเจนปกติและสภาพปลอดออกซิเจน และกลไกที่เกี่ยวข้อง

โดยสรุปแล้วการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ารากข้าวไวต่อออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน โดยหลังย้ายข้าวจากสภาพมีออกซิเจนปกติไปยังสภาพปลอดออกซิเจนเพียง 1 วัน รากข้าวตอบสนองอย่างรวดเร็ว โดยลดการสูญหายของออกซิเจนจากราก อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏนี้เกี่ยวข้องกับการลดลงของประสิทธิภาพการดูดหาฟอสฟอรัส การปรับตัวด้านสัณฐานของรากข้าวเริ่มปรากฏในหลายวันถัดมาโดยการเพิ่มขึ้นของโพรงอากาศ ความพรุนราก และจำนวนราก สำหรับผลระยะยาวของการเปลี่ยนแปลงด้านสัณฐานยังมิได้ทำการศึกษา การย้ายปลูกข้าวจากสภาพดินที่มีออกซิเจนปกติไปยังสภาพปลอดออกซิเจนปรากฏผลรุนแรงต่อการเจริญของรากข้าวมากกว่าการย้ายปลูกจากสภาพปลอดออกซิเจนไปยังสภาพมีออกซิเจนปกติ ความแตกต่างของพันธุ์ข้าวในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพน้ำในดินยังมิได้สำรวจ ด้านการพัฒนาระบบการปลูกข้าวในสารละลายธาตุอาหาร ทั้งสภาพมีออกซิเจนปกติและสภาพปลอดออกซิเจนเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบการตอบสนองด้านสรีระและสัณฐานของรากข้าวต่อสภาพออกซิเจนบริเวณราก อย่างไรก็ตามวิธีการปลูกข้าวในสารละลายนี้ยังต้องพัฒนาต่อไปเพื่อจำลองสภาพธาตุอาหารในดินน้ำขัง ระดับน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วส่งผลต่อการทำงานของรากข้าวอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาการพัฒนาวิธีการจัดการด้านธาตุอาหารและพัฒนาพันธุ์ข้าวเพื่อปลูกในนาน้ำฝนต่อไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved