Chapter 2: Solar Power and Photosynthesis Are the Basis of Life on Earth

ภาพรวมของบท

พลังงานแสงอาทิตย์และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลก พืช สาหร่าย และแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถใช้พลังงานแสงเปลี่ยนสารอนินทรีย์ เช่น CO_2 น้ำ ไนเตรต และซัลเฟต ให้เป็นสารอินทรีย์และชีวมวล สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น สัตว์ จึงพึ่งพาสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารและแหล่งพลังงาน

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. **ปฏิกิริยาแสง**
   ใช้พลังงานโฟตอนแยกน้ำ ได้ออกซิเจน อิเล็กตรอน และโปรตอน พร้อมสร้าง **NADPH และ ATP**
2. **ปฏิกิริยามืด**
   ใช้ **NADPH และ ATP** ในการตรึง CO_2 เพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต

ดังนั้น วัฏจักร CO_2–O_2 ของโลกจึงเชื่อมโยงระหว่างสิ่งมีชีวิตสังเคราะห์แสงกับสิ่งมีชีวิตที่ใช้ออกซิเจน

---

1. กำเนิดของการสังเคราะห์ด้วยแสง

โลกเกิดขึ้นประมาณ **4.6 พันล้านปี** และหลักฐานชีวิตแรก ๆ มีอายุประมาณ **3.5 พันล้านปี** ในยุคแรกบรรยากาศโลกยังไม่มีออกซิเจน มีสารอย่าง CO_2, CH_4, NH_3, HCN และน้ำ

แนวคิดของ **Oparin** เสนอว่าสารอินทรีย์อาจเกิดขึ้นเองจากสารอนินทรีย์ในบรรยากาศดึกดำบรรพ์ โดยได้รับพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลต ฟ้าผ่า หรือความร้อนจากภูเขาไฟ ต่อมา **Miller และ Urey** ทดลองจำลองบรรยากาศดึกดำบรรพ์และพบว่าสามารถเกิดกรดอะมิโนและกรดอินทรีย์หลายชนิดได้

สิ่งมีชีวิตแรกน่าจะเป็น **สิ่งมีชีวิตไม่ใช้ออกซิเจน** และอาจสร้างพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี เช่น chemolithotrophic metabolism ก่อนที่สิ่งมีชีวิตจะวิวัฒนาการจนสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ได้ การเกิดสิ่งมีชีวิตสังเคราะห์แสงจึงเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญของวิวัฒนาการโลก

---

2. พลังงานของแสงขึ้นกับความยาวคลื่น

แสงมีสมบัติเป็นทั้ง **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** และ **อนุภาคหรือโฟตอน** พลังงานของโฟตอนแปรผกผันกับความยาวคลื่น

$E = h\nu = h \cdot c / \lambda$

แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่น สีม่วงหรือสีน้ำเงิน จะมีพลังงานสูงกว่าแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า

ช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นและพืชใช้สังเคราะห์ด้วยแสงอยู่ประมาณ **400–700 nm** ส่วนแบคทีเรียสังเคราะห์แสงบางชนิดสามารถใช้แสงอินฟราเรดได้

ตัวอย่างพลังงานของแสง:

ความยาวคลื่น	**สีของแสง**	**พลังงานโดยประมาณ**
400 nm	ม่วง	298 kJ/mol photons
440 nm	น้ำเงิน	271 kJ/mol photons
500 nm	เขียวแกมน้ำเงิน	238 kJ/mol photons
600 nm	เหลือง	199 kJ/mol photons
700 nm	แดง	170 kJ/mol photons

สรุปคือ **แสงสีม่วงมีพลังงานสูงกว่าแสงสีแดงเกือบสองเท่า**

---

3. คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุหลักของการสังเคราะห์ด้วยแสง

พืชใช้ **chlorophyll** เป็นรงควัตถุหลักในการดูดกลืนแสง โดยดูดกลืนแสงได้ดีในช่วง

- ต่ำกว่า 480 nm เช่น น้ำเงิน–ม่วง
- 550–700 nm เช่น แดง

แต่ดูดกลืนแสงสีเขียวช่วงประมาณ **480–550 nm** ได้น้อย แสงสีเขียวจึงสะท้อนออกมา ทำให้ใบพืชดูเป็นสีเขียว

คลอโรฟิลล์มีโครงสร้างเป็นวง **tetrapyrrole หรือ porphyrin ring** มี Mg^{2+} อยู่ตรงกลาง และมีหาง **phytol** ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ฝังตัวในเยื่อหุ้มได้ดี

Chlorophyll a และ Chlorophyll b

- **Chlorophyll a** เป็นรงควัตถุหลักใน reaction center
- **Chlorophyll b** ช่วยขยายช่วงการดูดกลืนแสง โดยรับแสงบางช่วงที่ chlorophyll a รับได้น้อย แล้วถ่ายทอดพลังงานไปยัง chlorophyll a
- ในพืช อัตราส่วน chlorophyll a : chlorophyll b ประมาณ **3 : 1**

แบคทีเรียสีม่วงมี **bacteriochlorophyll a** ซึ่งคล้าย chlorophyll a แต่มีการเปลี่ยนแปลงบางตำแหน่ง ทำให้สามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้

---

4. การดูดกลืนแสงทำให้คลอโรฟิลล์ถูกกระตุ้น

เมื่อ chlorophyll ดูดกลืนโฟตอน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นขึ้นสู่ระดับพลังงานสูงกว่า เรียกว่า **excited state**

สถานะกระตุ้นสำคัญมี 2 แบบ:

1. **First singlet state**
   มีอายุสั้นมาก แต่ยังสามารถนำพลังงานไปใช้ในปฏิกิริยาเคมีได้
2. **Second singlet state**
   มีพลังงานสูงกว่าแต่ไม่เสถียร พลังงานมักลดลงเป็น first singlet โดยสูญเสียเป็นความร้อน

เมื่อ chlorophyll กลับสู่สถานะพื้น สามารถเกิดได้หลายทาง เช่น

- ใช้พลังงานเพื่อทำงานทางเคมี เช่น ส่งอิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน
- ปล่อยแสงออกมาเป็น **fluorescence**
- สูญเสียพลังงานเป็นความร้อน
- เกิด **triplet state** ซึ่งอาจทำให้เกิด reactive oxygen species หรือ ROS
- ถ่ายทอดพลังงานไปยังโมเลกุลรงควัตถุข้างเคียง

---

5. ระบบเสาอากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสง

โอกาสที่โฟตอนจะตกกระทบตรง reaction center โดยตรงมีน้อย พืชจึงต้องมีระบบ **antenna complex** หรือระบบเสาอากาศ เพื่อรวบรวมพลังงานแสงจากหลายความยาวคลื่น แล้วส่งต่อไปยัง reaction center

ในพืช reaction center หนึ่งมี chlorophyll ที่เกี่ยวข้องประมาณ **300 โมเลกุล** โดยส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ใน reaction center แต่เป็นส่วนของเสาอากาศรับแสง

ระบบเสาอากาศประกอบด้วย

- chlorophyll a
- chlorophyll b
- carotenoids เช่น β-carotene
- xanthophylls เช่น lutein, violaxanthin

carotenoids มีบทบาทสำคัญ 2 ประการ คือ

1. ช่วยดูดกลืนแสงในช่วงที่ chlorophyll ดูดกลืนได้น้อย
2. ป้องกันการเกิด triplet chlorophyll และ ROS ที่เป็นอันตรายต่อเซลล์

---

6. การถ่ายทอดพลังงานใน antenna complex

พลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนจะถูกส่งต่อระหว่าง chromophore ใกล้เคียงในรูปของ **exciton** ไม่ใช่การส่งอิเล็กตรอนโดยตรง

การถ่ายทอด exciton เกิดเร็วมาก เช่น ระหว่าง chlorophyll สองโมเลกุลใช้เวลาประมาณ **0.1 picosecond** ซึ่งเร็วกว่า charge separation ใน reaction center ดังนั้น reaction center จึงทำหน้าที่เหมือน **กับดักพลังงาน** ที่รับพลังงานจาก antenna แล้วเปลี่ยนเป็นการแยกประจุเพื่อเริ่มปฏิกิริยาแสง

พืชมี reaction center หลัก 2 ระบบ คือ

- **Photosystem II หรือ PSII** ดูดกลืนสูงสุดที่ประมาณ 680 nm
- **Photosystem I หรือ PSI** ดูดกลืนสูงสุดที่ประมาณ 700 nm

---

7. Light Harvesting Complex II หรือ LHCII

บทนี้ใช้ **antenna ของ Photosystem II** เป็นตัวอย่างสำคัญ

ระบบ antenna ของพืชแบ่งเป็น

1. **Outer antenna**
   ประกอบด้วย light harvesting complexes หรือ LHCs ทำหน้าที่รับแสง
2. **Inner antenna หรือ core complex**
   อยู่ใกล้ reaction center ทำหน้าที่ส่ง exciton ไปยัง reaction center

LHCII เป็นโปรตีนสำคัญในเยื่อไทลาคอยด์ และเป็นหนึ่งในโปรตีนเยื่อหุ้มที่พบมากที่สุดในคลอโรพลาสต์ แต่ละ LHCII monomer ประกอบด้วย

- peptide 232 กรดอะมิโน
- chlorophyll a 8 โมเลกุล
- chlorophyll b 6 โมเลกุล
- lutein 2 โมเลกุล

- violaxanthin 1 โมเลกุล
- neoxanthin 1 โมเลกุล

chlorophyll b มักอยู่บริเวณขอบของ complex ส่วน chlorophyll a อยู่ใกล้ศูนย์กลาง ทำให้พลังงานไหลจากขอบเข้าสู่แกนกลางและ reaction center ได้อย่างมีทิศทาง

---

8. Phycobilisome ในไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายสีแดง

ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายสีแดงมีระบบ antenna พิเศษเรียกว่า **phycobilisome** ซึ่งช่วยให้สังเคราะห์ด้วยแสงได้ดีในบริเวณที่แสงน้อย เช่น น้ำลึก

phycobilisome ประกอบด้วยโปรตีนที่จับกับ chromophore ชนิด **phycobilin** ซึ่งเป็น open-chain tetrapyrrole คล้ายกับโครงสร้างของ chlorophyll

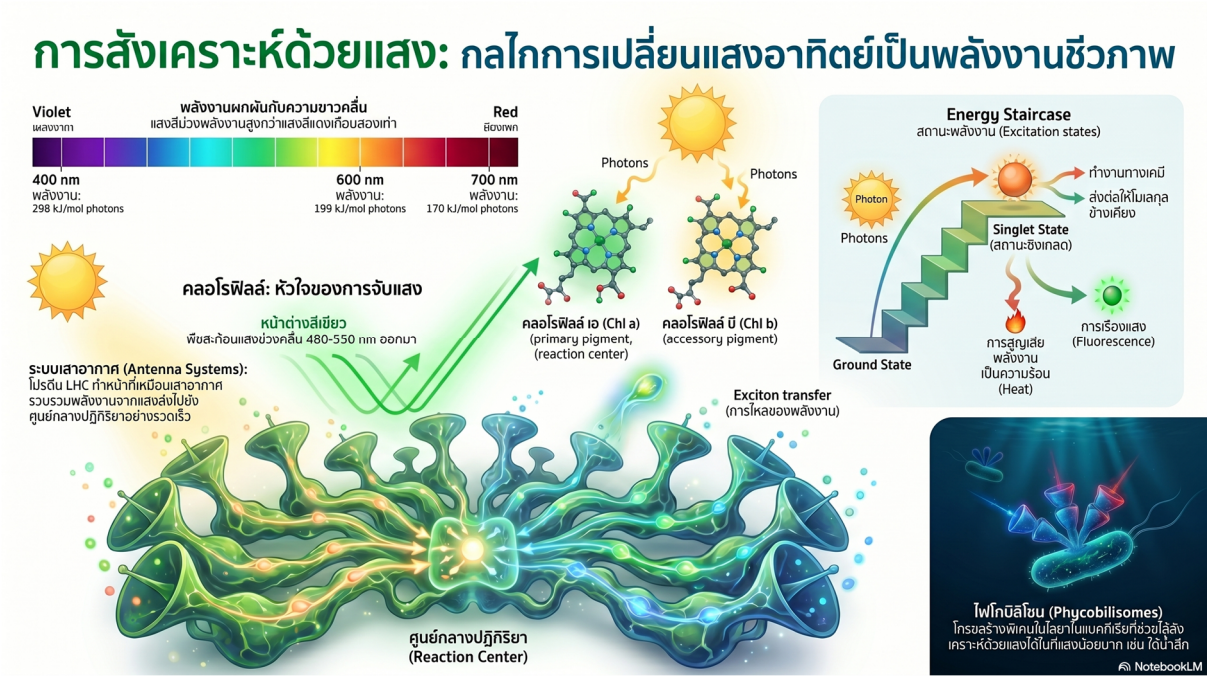
องค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- **phycoerythrin** รับแสงความยาวคลื่นสั้นกว่า
- **phycocyanin** รับแสงช่วงกลาง
- **allophycocyanin** อยู่บริเวณแกนกลางและส่งพลังงานไปยัง reaction center

ระบบนี้ดูดกลืน **แสงสีเขียว** ได้ดี ซึ่งเป็นแสงที่ chlorophyll ดูดกลืนได้น้อย จึงช่วยให้ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายสีแดงอยู่รอดในสภาพแสงน้อยหรือในน้ำลึกได้

สรุปใจความสำคัญ

บทนี้เน้นว่า **การสังเคราะห์ด้วยแสงคือกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี** ซึ่งเป็นฐานของชีวมวล ออกซิเจน และอาหารของสิ่งมีชีวิตบนโลก พืชใช้ chlorophyll เป็นรงควัตถุหลัก แต่ต้องอาศัย accessory pigments และ antenna complexes เพื่อรับแสงให้ครอบคลุมและมีประสิทธิภาพ พลังงานจากแสงจะถูกส่งผ่านเป็น exciton ไปยัง reaction center แล้วเริ่มกระบวนการแยกประจุใน photosystem ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้าง ATP, NADPH และคาร์โบไฮเดรตในที่สุด



Improving photosynthesis in agricultural environments

บทความนี้ทบทวนแนวทาง “เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง” เพื่อเพิ่มผลผลิตพืช โดยเน้นข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) เป็นหลัก ข้อสรุปสำคัญคือ การเพิ่มการสังเคราะห์ด้วยแสงอย่างเดียวอาจไม่ทำให้ผลผลิตเพิ่มเสมอไป เพราะผลผลิตในแปลงเกษตรจริงถูกจำกัดร่วมกันโดย **น้ำ ไนโตรเจน และสมดุลระหว่างแหล่งสร้างอาหารกับแหล่งใช้/สะสมอาหาร** หรือ source–sink balance

1. ประเด็นหลักของบทความ

ผู้เขียนชี้ว่า หลังยุค Green Revolution ผลผลิตเพิ่มขึ้นมากจากต้นเตี้ยลง การล้มลดลง และมี **harvest index** สูงขึ้น แต่เมื่อ harvest index ใกล้ถึงขีดจำกัดแล้ว จึงเกิดความสนใจที่จะเพิ่มผลผลิตผ่านการปรับปรุงการสังเคราะห์ด้วยแสง

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบต่อหน่วยพื้นที่ไม่ได้แปลว่าจะเพิ่มผลผลิตเสมอ เพราะพืชอาจขาดน้ำหรือไนโตรเจน หรือไม่มี “sink” เช่น เมล็ด ที่มีกำลังดูดใช้คาร์บอนมากพอ ผลคือคาร์บอนที่สร้างเพิ่มอาจไม่ถูกเปลี่ยนเป็นผลผลิตเมล็ดอย่างมีประสิทธิภาพ

2. แนวคิด Source–Sink สำคัญกว่าการเพิ่มใบให้สังเคราะห์แสงมากขึ้นอย่างเดียว

ในภาพที่ 1 ของบทความ ผู้เขียนเสนอว่า ก่อนออกดอกหรือ **pre-anthesis** พืชควรมี source แข็งแรง เพื่อสร้างจำนวนดอก/เมล็ดให้มาก ส่วนหลังออกดอกหรือ **post-anthesis** ต้องมี sink แข็งแรง เพื่อดึงน้ำตาลไปสะสมเป็นแป้งและโปรตีนในเมล็ด

กล่าวง่าย ๆ คือ

ก่อนออกดอก: ต้องสร้างศักยภาพของเมล็ด
หลังออกดอก: ต้องเติมเมล็ดให้เต็มด้วยแป้งและโปรตีน
ผลผลิตสูง: ต้องทำให้ source และ sink ทำงานสอดคล้องกัน

บทความจึงไม่สนับสนุนแนวคิดว่า “เพิ่ม photosynthesis = เพิ่ม yield” แบบตรงไปตรงมา แต่เสนอว่าต้องเพิ่มการไหลของคาร์บอนจากใบไปสู่เมล็ดให้ดีขึ้น

3. การปรับปรุงพันธุ์และ RUE

บทความให้ความสำคัญกับ **Radiation Use Efficiency หรือ RUE** คือประสิทธิภาพที่พืชเปลี่ยนพลังงานแสงที่รับได้ให้เป็นชีวมวล การปรับปรุง RUE อาจได้ผลดีกว่าการเพิ่มเอนไซม์หรือกระบวนการเดี่ยว ๆ เพราะ RUE สะท้อนการทำงานระดับทรงพุ่ม เช่น

- ใบตั้งขึ้น ทำให้แสงกระจายในทรงพุ่มดีขึ้น
- ใบเขียวนานขึ้น หรือ stay-green
- เพิ่มพื้นที่ใบที่ยังสังเคราะห์แสงได้
- ใช้ hyperspectral imaging ช่วยคัดเลือกพันธุ์
- ใช้พันธุกรรมจาก landrace และญาติป่าของข้าวสาลี เพื่อเพิ่มความหลากหลายทางพันธุกรรม

ผู้เขียนมองว่า การปรับปรุงพันธุ์ที่รวมลักษณะ **source แข็งแรง + sink แข็งแรง** เป็นแนวทางที่มีโอกาสสำเร็จสูง

4. GM/GE เพื่อเพิ่ม photosynthesis ยังมีข้อจำกัด

บทความทบทวนงานดัดแปลงพันธุกรรมหรือ **GM** ที่มุ่งเพิ่มการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่น เพิ่ม Rubisco เพิ่ม photorespiratory bypass หรือปรับ transcription factor บางชนิด พบว่าหลายงานให้ผลน่าสนใจ แต่ยังมีข้อจำกัดมาก โดยเฉพาะการทดสอบภาคสนามจริง

ตารางที่ 1 ของบทความแสดงว่า งาน GM หลายกรณีให้ผลเพิ่ม photosynthesis และ yield แต่บางงานทดสอบเพียงปีเดียว ใช้เพียงพันธุ์เดียว หรืออยู่ในสภาพแวดล้อมที่น้ำไม่จำกัด เช่น นาข้าว ดังนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่าประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรทั่วไปได้อย่างมั่นคง

กรณี Rubisco ผู้เขียนระบุว่ายังมีข้อถกเถียงว่า Rubisco “ยังปรับปรุงได้มาก” หรือ “เกือบเหมาะสมแล้ว” และการเพิ่ม Rubisco อาจเพิ่ม photosynthesis แต่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตเมล็ด โดยเฉพาะในสภาพที่น้ำหรือไนโตรเจนจำกัด

5. T6P เป็นแนวทางที่น่าสนใจมาก

จุดเด่นของบทความคือการเสนอ **Trehalose 6-phosphate หรือ T6P** เป็นตัวควบคุมสำคัญของสมดุล source–sink

T6P ทำหน้าที่เป็นสัญญาณของ sucrose และเกี่ยวข้องกับการยับยั้ง SnRK1 ทำให้กระตุ้นการใช้คาร์บอนเพื่อการเจริญ การสร้างแป้ง และการสร้างโปรตีนในเมล็ด

ในภาพที่ 2 บทความอธิบายว่า T6P ช่วยกระตุ้นเส้นทางจาก sucrose ไปสู่

- starch เช่น amylose และ amylopectin
- protein ผ่านการใช้ไนโตรเจนและกรดอะมิโน

ผลคือ sink ในเมล็ดแข็งแรงขึ้น เมล็ดดึงน้ำตาลจากใบมากขึ้น และกระตุ้นให้ใบธงสังเคราะห์ด้วยแสงต่อไปได้ดีขึ้น

6. การใช้สารเคมี T6P precursor อาจเพิ่มผลผลิตได้

บทความกล่าวถึงเทคโนโลยีการใช้สารตั้งต้นของ T6P ที่สามารถเข้าสู่พืชและปลดปล่อย T6P เมื่อได้รับแสง เมื่อนำไปพ่นช่วงต้นของ grain filling ประมาณ 10 วันหลังดอกบาน พบว่าสามารถเพิ่ม photosynthesis และผลผลิตได้มากกว่า 10% ในบางการทดลอง

ข้อดีสำคัญคือเป็นการกระตุ้นช่วงเวลาสั้น ๆ ระหว่างการเติมเมล็ด จึงอาจลดปัญหาการสูญเสียน้ำจากการเปิดปากใบมากเกินไปเมื่อเทียบกับการเพิ่ม photosynthesis ตลอดวงจรชีวิตพืช

7. ทรัพยากรพันธุกรรมใหม่ยังมีบทบาทสำคัญ

บทความชี้ว่าข้าวสาลีพันธุ์สมัยใหม่มีความหลากหลายทางพันธุกรรมจำกัด โดยเฉพาะใน D genome จึงควรนำ landrace และญาติป่ามาใช้เพิ่มความหลากหลาย เช่น การใช้ *Aegilops tauschii* เพื่อสร้าง synthetic wheat ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความทนร้อน ทนแล้ง ชีวมวล และศักยภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

8. ข้อสรุปของบทความ

ผู้เขียนสรุปว่า แนวทางที่มีโอกาสดีที่สุดในขณะนี้ไม่ใช่การเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเฉพาะจุด แต่คือการจัดการระบบทั้งต้นพืชให้คาร์บอนที่สร้างจากใบไหลไปสู่เมล็ดได้มากที่สุด โดยต้องคำนึงถึงน้ำ ไนโตรเจน และสมดุล source–sink

แนวทางที่น่าสนใจที่สุด ได้แก่

1. ปรับปรุงพันธุ์เพื่อเพิ่ม RUE และเพิ่ม source–sink พร้อมกัน
2. ใช้ germplasm ใหม่จาก landrace และญาติป่า
3. ใช้ T6P หรือสารเคมีที่ควบคุม source–sink ในช่วง grain filling
4. ทดสอบ GM/GE ในแปลงจริงหลายปี หลายพันธุ์ และหลายสภาพแวดล้อมก่อนสรุปผล

สรุปสั้นที่สุด

บทความนี้เสนอว่า **การเพิ่มผลผลิตพืชด้วย photosynthesis ต้องไม่มองแค่ใบสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น แต่ต้องทำให้คาร์บอน น้ำ และไนโตรเจนถูกจัดสรรไปยังเมล็ดอย่างมีประสิทธิภาพ** โดยเฉพาะผ่านการปรับสมดุล **source–sink** และการใช้สัญญาณน้ำตาล **T6P** ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับเพิ่มผลผลิตอย่างยั่งยืน.