

เครือข่ายสัญญาณที่ควบคุมการเจริญและการพัฒนาการของพืช: จาก ฮอร์โมนพืชสู่การปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อม

บทคัดย่อ

พืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถเคลื่อนที่หลบหนีจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ จึงต้องอาศัยระบบรับรู้และส่งสัญญาณภายในเซลล์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อปรับการเจริญเติบโต เมแทบอลิซึม และพัฒนาการให้สอดคล้องกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น แสง น้ำ อุณหภูมิ ความเค็ม การเข้าทำลายของเชื้อโรค และช่วงเวลากลางวัน-กลางคืน สัญญาณสำคัญประกอบด้วยฮอร์โมนพืช หรือไฟโตฮอร์โมน สารส่งสัญญาณภายในเซลล์ และตัวรับแสงหลายชนิด การทำงานของสัญญาณเหล่านี้ไม่ได้เกิดขึ้นแยกจากกัน แต่เชื่อมโยงเป็นเครือข่ายซับซ้อน บทความนี้อธิบายหลักการรับและถ่ายทอดสัญญาณ บทบาทของฮอร์โมนพืช ชนิดสำคัญ ตลอดจนการรับรู้แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อให้เห็นภาพรวมว่าพืชควบคุมการสร้างอวัยวะ การงอก การออกดอก การสุกของผล การพักตัว และการตอบสนองต่อความเครียดได้อย่างไร

คำสำคัญ: ฮอร์โมนพืช, การถ่ายทอดสัญญาณ, ออกซิน, จิบเบอเรลลิน, กรดแอบไซซิก, เอทิลีน, ไฟโตโครม, การปรับตัวของพืช

บทนำ

แม้ว่าพืชจะไม่มีระบบประสาทหรือต่อมไร้ท่อแบบสัตว์ แต่เซลล์ เนื้อเยื่อ และอวัยวะต่าง ๆ ของพืชสามารถสื่อสารกันได้อย่างเป็นระบบ สารสัญญาณอาจสร้างขึ้นในบริเวณหนึ่งแล้วออกฤทธิ์ต่อเซลล์ใกล้เคียง หรือถูกลำเลียงผ่านไซเล็มและโฟลเอ็มไปยังอวัยวะที่อยู่ห่างออกไป สารสัญญาณที่ควบคุมการเจริญและการพัฒนาการเรียกว่า **ไฟโตฮอร์โมน** หรือ **ฮอร์โมนพืช**

นอกจากฮอร์โมนแล้ว พืชยังมีตัวรับแสงที่ทำหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพ ความเข้ม และระยะเวลาของแสง เช่น ไฟโตโครมซึ่งรับรู้แสงสีแดงและแสงสีแดงไกล กริปโตโครมและโฟโตโทรปินซึ่งรับรู้แสงสีน้ำเงิน และ UVR8 ซึ่งรับรู้รังสี UV-B ข้อมูลจากฮอร์โมน แสง ธาตุอาหาร น้ำ และความเครียดจะถูกประมวลผลร่วมกัน ทำให้พืชเลือกตอบสนองอย่างเหมาะสมกับสถานการณ์

1. หลักการรับและถ่ายทอดสัญญาณในพืช

กระบวนการส่งสัญญาณเริ่มจาก **ตัวรับหรือรีเซพเตอร์** ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถจับกับสัญญาณชนิดใดชนิดหนึ่งได้อย่างจำเพาะ สัญญาณเริ่มต้นอาจเป็นฮอร์โมน เปปไทด์ สารจากเชื้อโรค หรือโฟตอนของแสง เมื่อสัญญาณจับกับตัวรับ รูปร่างสามมิติของตัวรับจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้โปรตีนหรือเอนไซม์ที่อยู่ถัดไปถูกกระตุ้นหรือยับยั้ง

ลำดับเหตุการณ์โดยทั่วไปอธิบายได้ดังนี้

สัญญาณภายนอก → ตัวรับ → สารส่งสัญญาณภายในเซลล์ → โปรตีนไคเนสหรือโปรตีนฟอสฟาเทส → ปัจจัยควบคุมการถอดรหัส → การแสดงออกของยีน → การตอบสนองของพืช

ตัวรับบางชนิดอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์ เช่น receptor-like kinase หรือ RLK ตัวรับชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนรับสัญญาณที่อยู่นอกเซลล์ ส่วนที่พาดผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และส่วนโปรตีนไคเนสที่อยู่ในไซโทพลาซึม เมื่อจับกับสัญญาณ ตัวรับมักรวมตัวกันเป็นคู่แล้วเกิดการเติมหมู่ฟอสเฟตให้แก่กัน จากนั้นจึงส่งต่อสัญญาณไปยังโปรตีนเป้าหมาย ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 19.1 ของเอกสารต้นฉบับ

ตัวรับอีกกลุ่มหนึ่งอยู่ในไซโทพลาซึมหรือนิวเคลียส ตัวอย่างเช่น TIR1 ซึ่งรับรู้สัญญาณออกซิน GID1 ซึ่งรับจิบเบอเรลลิน PYR ซึ่งรับกรดแอบไซซิก และ COI1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัญญาณจัสโมเนต

1.1 สารส่งสัญญาณลำดับที่สอง

ตัวรับไม่ได้ควบคุมการแสดงออกของยีนโดยตรงเสมอไป แต่กระตุ้นให้เกิด สารส่งสัญญาณลำดับที่สอง ซึ่งทำหน้าที่ขยายและกระจายสัญญาณภายในเซลล์ สารที่สำคัญ ได้แก่

- แคลเซียมไอออนหรือ Ca^{2+}
- โปรตอนและการเปลี่ยนแปลงค่า pH
- IP_3 และ IP_6
- กรดฟอสฟาติก
- อนุมูลออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา
- ไนตริกออกไซด์
- cGMP
- การเติมและการกำจัดหมู่ฟอสเฟตจากโปรตีน

ภายใต้ภาวะปกติ ความเข้มข้นของ Ca^{2+} อิสระในไซโทพลาซึมจะต่ำมาก แต่เมื่อพืชได้รับสัญญาณ เช่น ความแห้งแล้ง ความเค็ม ความเย็น หรือกรดแอบไซซิก ช่องแคลเซียมจะเปิดชั่วคราว ทำให้ Ca^{2+} เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว Ca^{2+} อาจจับกับโปรตีน แคลมอดูลิน แล้วกระตุ้นโปรตีนไคเนส หรือกระตุ้น calcium-dependent protein kinase โดยตรง ผลที่เกิดขึ้นอาจเป็นการปิดปากใบ การเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึม หรือการสร้างโปรตีนตอบสนองต่อความเครียด

1.2 การเติมหมู่ฟอสเฟตทำหน้าที่เหมือนสวิตช์

โปรตีนไคเนสทำหน้าที่เติมหมู่ฟอสเฟต ขณะที่โปรตีนฟอสฟาเทสทำหน้าที่กำจัดหมู่ฟอสเฟต กระบวนการทั้งสองจึงเปรียบเสมือนสวิตช์เปิด-ปิดของโปรตีน เซลล์พืชมีระบบไคเนสหลายชนิด โดยเฉพาะลำดับการส่งสัญญาณแบบ MAPK cascade ซึ่งประกอบด้วย MAPKKK, MAPKK และ MAPK ตามลำดับ

การส่งสัญญาณแบบลูกโซ่นี้ช่วยขยายสัญญาณจากตัวรับเพียงไม่กี่โมเลกุลให้เกิดการตอบสนองอย่างกว้างขวาง และยังเชื่อมต่อการควบคุมการแบ่งเซลล์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การป้องกันเชื้อโรค และการตอบสนองต่อความแห้งแล้ง ความเค็ม ความเย็น หรือบาดเจ็บ

2. ฮอร์โมนพืชกับการควบคุมการเจริญและการพัฒนาการ

ฮอร์โมนพืชมีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันมากและออกฤทธิ์ที่ความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปต่ำกว่าระดับไมโครโมลาร์ ฮอร์โมนชนิดหนึ่งอาจมีผลหลายด้าน และผลที่เกิดขึ้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อเยื่อ อายุของพืช ความเข้มข้นของฮอร์โมน และการทำงานร่วมกับฮอร์โมนชนิดอื่น

ฮอร์โมน	หน้าที่สำคัญ
ออกซิน	การยืดตัวของเซลล์ การเกิดราก การครอบงำของยอด และการตอบสนองต่อแสงหรือแรงโน้มถ่วง
จิบเบอเรลลิน	การยืดปล้อง การงอกของเมล็ด การออกดอก และการเจริญของผล
ไซโทไคนิน	การแบ่งเซลล์ การแตกตาข้าง และการชะลอความชรา
กรดแอบไซซิก	การปิดปากใบ การพักตัวของเมล็ด และการตอบสนองต่อความแห้งแล้ง
เอทิลีน	การสุกของผล การหลุดร่วง และความชราของอวัยวะ
จัสโมเนต	การตอบสนองต่อบาดแผล แมลง และเชื้อโรค
สไตรโกแลกโทน	การยับยั้งการแตกกิ่งและการสื่อสารระหว่างรากกับสิ่งมีชีวิตในดิน
บราสซิโนสเตอรอยด์	การขยายเซลล์ การคลี่ใบ การพัฒนาท่อลำเลียง และความทนทานต่อความเครียด

2.1 ออกซิน: ตัวควบคุมทิศทางการเจริญ

ออกซินที่สำคัญที่สุดคือ **indole-3-acetic acid** หรือ **IAA** ส่วนใหญ่สร้างที่ปลายยอดและใบอ่อน แล้วลำเลียงจากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่งอย่างมีทิศทาง การลำเลียงนี้อาศัยโปรตีนรับเข้า AUX1 และโปรตีนส่งออกกลุ่ม PIN ซึ่งกระจายตัวไม่เท่ากันบนเยื่อหุ้มเซลล์

การสะสมของออกซินไม่เท่ากันในแต่ละด้านของอวัยวะทำให้เซลล์ยืดตัวแตกต่างกัน เช่น เมื่อต้นอ่อนได้รับแสงจากด้านเดียว ออกซินจะกระจายไปยังด้านมืดมากกว่า เซลล์ด้านมืดจึงยืดตัวมากและทำให้ยอดโค้งเข้าหาแสง

ออกซินยังกระตุ้นการทำงานของปั๊ม H^+ ทำให้บริเวณผนังเซลล์มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น โปรตีนที่ช่วยคลายโครงสร้างผนังเซลล์จึงทำงานได้ดีขึ้น เซลล์สามารถรับน้ำและยืดตัวได้ กลไกนี้เรียกว่าแนวคิด **acid growth**

ในระดับอื่น ออกซินจับกับตัวรับ TIR1 แล้วกระตุ้นให้โปรตีนกดการแสดงออกของยีนกลุ่ม AUX/IAA ถูกเติมยูบิควิตินและย่อยโดยโปรตีโอโซม เมื่อโปรตีนกดถูกกำจัด ยีนที่ตอบสนองต่อออกซินจึงถูกเปิดใช้งาน

2.2 จิบเบอเรลลิน: ฮอร์โมนแห่งการยืดลำต้นและการงอก

จิบเบอเรลลินหรือ GA ถูกค้นพบจากโรคต้นกล้าข้าวสูงผิดปกติที่เกิดจากเชื้อรา *Gibberella fujikuroi* ฮอร์โมนนี้กระตุ้นการยืดตัวของปล้อง ทำให้ลำต้นสูงขึ้น และส่งเสริมการออกดอกในพืชบางชนิด

ในเมล็ด จิบเบอเรลลินช่วยยุติการพักตัวและกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ เช่น แอลฟา-อะไมเลส ซึ่งย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล สำหรับการเจริญของเอ็มบริโอ หลักการนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมมอลต์และการผลิตเบียร์

ตัวรับจิบเบอเรลลินคือ GID1 เมื่อจับกับ GA จะช่วยให้โปรตีน DELLA ซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชลดลง เมื่อ DELLA ลดลง การแสดงออกของยีนที่ส่งเสริมการยืดตัวจึงเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าจิบเบอเรลลินไม่ได้ “กดคันเร่ง” โดยตรง แต่ทำหน้าที่ “ปลดเบรก” ของการเจริญ

พันธุ์ข้าวสาธิตต้นเตี้ยที่ใช้ในยุคลปฏิวัติเขียวมีการเปลี่ยนแปลงในระบบตอบสนองต่อจิบเบอเรลลิน ทำให้ลำต้นสั้น แข็งแรง ไม่ล้มง่าย และจัดสรรชีวมวลไปยังเมล็ดได้มากขึ้น

2.3 ไซโทไคนิน: ฮอร์โมนกระตุ้นการแบ่งเซลล์

ไซโทไคนินเป็นอนุพันธ์ของอะดีนีน โดยซีเอดีนเป็นชนิดที่พบได้ทั่วไป ฮอร์โมนนี้กระตุ้นการแบ่งเซลล์ ส่งเสริมการแตกตาข้าง และชะลอความชราของใบ จึงมีฤทธิ์ตรงข้ามกับออกซินในเรื่องการครอบงำของยอด และตรงข้ามกับเอทิลีนในเรื่องความชรา

ความสัมพันธ์ระหว่างออกซินกับไซโทไคนินมีความสำคัญอย่างมากต่อการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช โดยทั่วไป

- ออกซินสูงเมื่อเทียบกับไซโทไคนิน ส่งเสริมการเกิดราก
- ไซโทไคนินสูงเมื่อเทียบกับออกซิน ส่งเสริมการเกิดยอด
- ระดับที่เหมาะสมร่วมกัน ส่งเสริมการเกิดแคลลัสและการแบ่งเซลล์

ไซโทไคนินรับรู้ผ่านตัวรับฮิสทีดินไคเนสที่เชื่อมเซลล์ จากนั้นหมู่ฟอสเฟตจะถูกถ่ายทอดผ่านโปรตีนหลายชั้นจนถึงนิวเคลียส เพื่อควบคุมยีนที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์และการพัฒนาการ

2.4 กรดแอบไซซิก: ผู้รักษาสมดุลน้ำและการพักตัว

กรดแอบไซซิกหรือ ABA มีบทบาทเด่นในการรักษาสมดุลน้ำ เมื่อรากหรือใบเผชิญภาวะขาดน้ำ ปริมาณ ABA จะเพิ่มขึ้น ABA สามารถละลายจากรากผ่านไซเล็มไปยังใบ แล้วกระตุ้นให้เซลล์คุมสูญเสียไอออนและน้ำ ความดันเต่งจึงลดลงและปากใบปิด ช่วยลดการคายน้ำ

ตัวรับ ABA คือโปรตีนกลุ่ม PYR เมื่อ ABA จับกับตัวรับ คอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้นจะยับยั้งโปรตีนฟอสฟาเทส PP2C ทำให้โปรตีนไคเนส SnRK2 ทำงานได้ จากนั้น SnRK2 จะกระตุ้นช่องไอออนและปั๊มควบคุมการก่อกวนที่เกี่ยวกับการทนแล้ง

ABA ยังทำให้เมล็ดและตาพักตัว ป้องกันไม่ให้เมล็ดงอกก่อนสุกเต็มที่ จึงมักทำงานเป็นปฏิปักษ์กับจิบเบอเรลลิน โดย ABA ส่งเสริมการพักตัว ส่วนจิบเบอเรลลินส่งเสริมการงอก

2.5 เอทิลีน: ก๊าซที่ควบคุมการสุกและความชรา

เอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่อยู่ในรูปก๊าซ สร้างจาก S-adenosylmethionine ผ่านสารตัวกลาง ACC โดยใช้เอนไซม์ ACC synthase และ ACC oxidase เอทิลีนมีบทบาทในการสุกของผล การหลุดร่วงของใบและผล ความชราของเนื้อเยื่อ และการตอบสนองต่อบาดเจ็บหรือเชื้อโรค

ผลไม้สุกสามารถปล่อยเอทิลีนไปกระตุ้นผลไม้อื่นที่อยู่ใกล้กันได้ ตัวอย่างเช่น แอปเปิลสุกสามารถเร่งให้มะเขือเทศดิบสุกเร็วขึ้น ในทางการค้า กล้วยมักถูกเก็บเกี่ยวในระยะดิบและควบคุมการสุกด้วยเอทิลีนก่อนจำหน่าย ส่วนสาร 1-methylcyclopropene หรือ 1-MCP สามารถขัดขวางการรับรู้เอทิลีน จึงใช้ชะลอการสุกและยืดอายุการเก็บรักษาผัก ผลไม้ และดอกไม้

กลไกการส่งสัญญาณของเอทิลีนมีลักษณะน่าสนใจ เนื่องจากตัวรับที่ไม่ได้จับเอทิลีนจะเกิดการตอบสนองไว้ เมื่อเอทิลีนจับกับตัวรับ การกดดังกล่าวจะถูกยกเลิก และส่วนหนึ่งของโปรตีน EIN2 จะเข้าสู่นิวเคลียสเพื่อช่วยให้ปัจจัยควบคุมการถอดรหัสมีความเสถียร

2.6 จัสโมเนต: สัญญาณบาดเจ็บและการป้องกันศัตรู

กรดจัสโมนิคและอนุพันธ์สร้างจากกรดไขมันลิโนเลนิกในเยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อใบถูกแมลงกัดกินหรือได้รับบาดเจ็บ การสร้างจัสโมเนตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จัสโมเนตกระตุ้นยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารป้องกัน เช่น สารฟีนอล โปรพานอยด์ ฟลาโวนอยด์ และโปรตีนยับยั้งเอนไซม์ย่อยโปรตีนของแมลง

จัสโมเนตและเมทิลจัสโมเนตยังสามารถทำหน้าที่เป็นสัญญาณระยะไกล ทำให้อวัยวะที่ไม่ได้รับบาดเจ็บโดยตรงเตรียมระบบป้องกันไว้ล่วงหน้า ฮอร์โมนนี้จึงเชื่อมโยงการตอบสนองเฉพาะบริเวณเข้ากับการป้องกันทั่วทั้งต้น

2.7 สไตรโกแลกโตน: การควบคุมกิ่งและการสื่อสารใต้ดิน

สไตรโกแลกโตนสร้างจากเบตาแคโรทีนและมีบทบาทสำคัญอย่างน้อยสามประการ ได้แก่

1. ยับยั้งการแตกกิ่งแขนงของลำต้น
2. ส่งเสริมการเข้าร่วมอาศัยของเชื้อราไมคอร์ไรซากับราก ช่วยเพิ่มการดูดฟอสเฟต
3. กระตุ้นการงอกของเมล็ดพืชปรสิต เช่น *Striga*

บทบาทประการที่สามมีความสำคัญทางนิเวศวิทยาและเป็นปัญหาทางการเกษตร เพราะพืชปรสิตสามารถใช้สไตรโกแลกโตนเป็นสัญญาณบอกว่ามีพืชเจ้าบ้านอยู่ใกล้ๆ แล้วจึงงอกและเข้าทำลายราก

2.8 บราสซิโนสเตอรอยด์: สอร์โมนสเตอรอยด์ของพืช

บราสซิโนสเตอรอยด์เป็นฮอร์โมนสเตอรอยด์ที่พบในอวัยวะต่าง ๆ ของพืช ช่วยส่งเสริมการขยายตัวของเซลล์ การเจริญของยอด การคลี่ใบ การพัฒนาท่อลำเลียงไซเล็ม และความทนทานต่อความร้อนหรือความแห้งแล้ง

บราสซิโนไลด์จับกับตัวรับ BRI1 ที่เชื่อมเซลล์แล้ว BRI1 จะรวมตัวกับ BAK1 เกิดการเติมหมู่ฟอสเฟตต่อเนื่องไปยังโปรตีน BSK, BIN2, BSU และปัจจัยควบคุมการถอดรหัส BZR1/BZR2 ซึ่งเข้าสู่นิวเคลียสและเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีน กลไกนี้เป็นตัวอย่างชัดเจนของการถ่ายทอดสัญญาณจากเชื่อมเซลล์ไปสู่การควบคุมยีน

3. แสงไม่ได้ให้เพียงพลังงาน แต่ให้ข้อมูลแก่พืชด้วย

แสงมีความสำคัญต่อพืชสองด้าน ด้านแรกคือเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนด้านที่สองคือเป็นข้อมูลที่บอกถึงตำแหน่ง เวลา ฤดูกาล และสภาพการแข่งขัน พืชจึงมีตัวรับแสงหลายกลุ่มที่ตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน

3.1 ไฟโตโครม: ตัวรับแสงสีแดงและสีแดงไกล

ไฟโตโครมมีสองรูปที่เปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ได้แก่

- **Pr** ดูดกลืนแสงสีแดงประมาณ 660 นาโนเมตร
- **Pfr** ดูดกลืนแสงสีแดงไกลประมาณ 730 นาโนเมตร และโดยทั่วไปเป็นรูปที่ออกฤทธิ์

เมื่อ Pr รับแสงสีแดงจะเปลี่ยนเป็น Pfr ส่วนแสงสีแดงไกลจะเปลี่ยน Pfr กลับเป็น Pr การเปลี่ยนรูปนี้ทำให้พืชประเมินอัตราส่วนของแสงสีแดงต่อแสงสีแดงไกลได้

ใบของพืชดูดกลืนแสงสีแดงได้มาก แต่ปล่อยให้แสงสีแดงไกลผ่านหรือสะท้อนออกมา ดังนั้นต้นพืชที่อยู่ใต้ร่มเงาของต้นอื่นจะได้รับแสงที่มีสัดส่วนสีแดงไกลสูงขึ้น พืชจึงรับรู้ว่ามีคู่แข่งอยู่ใกล้และแสดง **กลุ่มอาการหลบหลีกเงา** เช่น ลำต้นและก้านใบยืดยาว ใบบาง และออกดอกเร็วขึ้น

ไฟโตโครมรูปออกฤทธิ์สามารถเข้าสู่นิวเคลียสและควบคุมโปรตีน PIF รวมทั้งปัจจัยควบคุมการถอดรหัส HY5, LAF1 และ HFR1 ในที่มี PIF ส่งเสริมลักษณะต้นกล้าที่เจริญโดยไม่มีแสง เช่น ลำต้นอ่อนยาวและใบเลี้ยงยังไม่คลี่ เมื่อได้รับแสง ไฟโตโครมกระตุ้นการสลาย PIF และช่วยให้ยีนที่ตอบสนองต่อแสงทำงาน ต้นกล้าจึงเปลี่ยนเข้าสู่กระบวนการพัฒนาภายใต้แสงหรือ photomorphogenesis ตามแผนภาพรูปที่ 19.19

ไฟโตโครมยังควบคุมการงอกของเมล็ด การยับยั้งการยืดของลำต้น การสร้างแอนโทไซยานิน และการตอบสนองต่อความยาวกลางวัน

3.2 โฟโตโทรปิน: ตัวรับแสงสีน้ำเงินที่ควบคุมการเคลื่อนไหว

โฟโตโทรปินมี FMN เป็นโครโมฟอร์ เมื่อรับแสงสีน้ำเงินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการเติมหมู่ฟอสเฟตให้ตนเอง จากนั้นส่งสัญญาณผ่าน Ca^{2+} และโปรตีนอื่น

โฟโตโทรปินเกี่ยวข้องกับการโค้งงอเข้าหาแสง การเปิดปากใบ และการเคลื่อนที่ของคลอโรพลาสต์ เมื่อแสงอ่อน คลอโรพลาสต์จะเคลื่อนไปยังบริเวณที่รับแสงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง แต่เมื่อแสงเข้มเกินไป คลอโรพลาสต์จะเคลื่อนหลบเพื่อลดความเสียหายต่อระบบสังเคราะห์ด้วยแสง

3.3 คริปโตโครม: การควบคุมรูปร่างและนาฬิกาชีวภาพ

คริปโตโครมเป็นตัวรับแสงสีน้ำเงินที่มีโครงสร้างสัมพันธ์กับเอนไซม์โฟโตไลเอส แต่ทำหน้าที่หลักด้านการควบคุมพัฒนาการ คริปโตโครมช่วยยับยั้งการขึ้นของไฮโปคอติลและลำต้น ควบคุมเวลาออกดอก กระตุ้นการสะสมคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และแอนโทไซยานิน รวมทั้งช่วยปรับนาฬิกาชีวภาพให้สอดคล้องกับวงจรกลางวัน-กลางคืน

เมื่อรับแสง คริปโตโครมจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง รวมตัวเป็นคู่และเข้าสู่นิวเคลียส จากนั้นช่วยรักษาเสถียรภาพของ HY5 ทำให้ยีนที่ตอบสนองต่อแสงสามารถแสดงออกได้

3.4 UVR8: ตัวตรวจจับสนี UV-B

UVR8 เป็นโปรตีนรับรังสี UV-B ช่วงประมาณ 280–315 นาโนเมตร โดยใช้กรดอะมิโนทริปโตเฟนเป็นส่วนรับแสง การรับรู้ UV-B ระดับเหมาะสมกระตุ้นการสร้างสารป้องกัน เช่น ฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานิน ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสารกรองรังสี ช่วยลดความเสียหายต่อ DNA โปรตีน และระบบสังเคราะห์ด้วยแสง

ดังนั้น การตอบสนองต่อ UV-B ไม่ได้หมายถึงการป้องกันความเสียหายหลังเกิดเหตุเท่านั้น แต่เป็นการเตรียมระบบป้องกันล่วงหน้าให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีรังสีสูง

4. ฮอโมนและแสงทำงานเป็นเครือข่ายเดียวกัน

การตอบสนองของพืชแทบไม่เคยเกิดจากฮอโมนหรือสัญญาณเพียงชนิดเดียว ตัวอย่างความสัมพันธ์ที่สำคัญ ได้แก่

- ABA ส่งเสริมการพักตัวของเมล็ด แต่จิบเบอเรลลินส่งเสริมการงอก
- ออกซินส่งเสริมการครอบงำของยอด แต่ไซโทไคนินส่งเสริมการแตกตาข้าง
- ไซโทไคนินชะลอความชรา แต่เอทิลีนส่งเสริมความชราและการหลุดร่วง
- ออกซินควบคุมตำแหน่งการเกิดกิ่งและรากร่วมกับสไตรโกแลกโตนและไซโทไคนิน
- ABA และจัสโมเนตอาจทำงานร่วมกันในการตอบสนองต่อความแห้งแล้ง

- ไฟโตโครมและคริปโตโครมเชื่อมโยงกับออกซิน จิบเบอเรลลิน และบราสซิโนสเตอรอยด์ในการควบคุมความยาวของลำต้น
- สัญญาณจากแสง ฮอร์โมน และเชื้อโรคสามารถใช้โปรตีน MAPK และระบบยูบิควิติน-โปรตีโอโซมร่วมกัน

เครือข่ายลักษณะนี้ช่วยให้พืชตอบสนองแบบบูรณาการ ตัวอย่างเช่น เมื่อต้นกล้าอยู่ใต้ร่มเงา พืชไม่ได้เพียงตรวจพบสัดส่วนแสงสีแดงไกลที่สูงขึ้น แต่ยังเปลี่ยนการทำงานของออกซิน จิบเบอเรลลิน และบราสซิโนสเตอรอยด์ เพื่อเร่งการยืดลำต้น และเพิ่มโอกาสเข้าถึงแสง

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพืชขาดน้ำ ABA จะกระตุ้นการปิดปากใบ ขณะเดียวกัน Ca^{2+} อนุมูลออกซิเจน ไนตริกออกไซด์ โปรตีนไคเนส และยีนตอบสนองต่อความแห้งแล้งก็ทำงานร่วมกัน ผลลัพธ์จึงครอบคลุมทั้งการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระดับช่องไอออนและการปรับตัวระยะยาวในระดับการแสดงออกของยีน

5. ความสำคัญต่อการเกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ

ความรู้เรื่องฮอร์โมนและการถ่ายทอดสัญญาณสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ได้แก่

การควบคุมรูปร่างของพืช

สารยับยั้งการสร้างจิบเบอเรลลินช่วยลดความสูงของธัญพืช ทำให้ลำต้นแข็งแรงและลดการล้ม ขณะที่การปรับสัดส่วนฮอร์โมนในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อช่วยควบคุมการเกิดยอดและราก

การเพิ่มคุณภาพของผลผลิต

จิบเบอเรลลินใช้เพิ่มขนาดและส่งเสริมการเกิดผลอ่อนไร้เมล็ด เอทิลีนใช้ควบคุมการสุกของกล้วยหรือมะเขือเทศ และ 1-MCP ใช้ชะลอการสุกระหว่างการเก็บรักษา

การเพิ่มความทนทานต่อความเครียด

การปรับระบบ ABA บราสซิโนสเตอรอยด์ หรือโปรตีนไคเนสที่เกี่ยวข้อง อาจช่วยเพิ่มความทนแล้ง ความทนเค็ม หรือความทนร้อน อย่างไรก็ตาม ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อการเจริญและผลผลิต เนื่องจากการเพิ่มความทนทานมักต้องแลกกับการชะลอการเจริญบางส่วน

การควบคุมแสงในระบบปลูกพืช

ความรู้เกี่ยวกับไฟโตโครม คริปโตโครม และโฟโตโทรปินช่วยออกแบบสัดส่วนแสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน และแสงสีแดงไกลในโรงเรือนหรือระบบปลูกพืชด้วย LED เพื่อควบคุมความสูง การเปิดปากใบ การสะสมรงควัตถุ และเวลาออกดอก

การควบคุมพืชปรสิตและการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์

ความเข้าใจเกี่ยวกับสไตรโกแลกโตนอาจนำไปสู่การควบคุม *Striga* หรือการส่งเสริมความสัมพันธ์กับไมคอร์ไรซา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสในดิน

บทสรุป

การเจริญและการพัฒนาการของพืชไม่ได้ถูกควบคุมโดยฮอร์โมนชนิดใดชนิดหนึ่ง แต่เกิดจากการประสานงานของตัวรับ สารส่งสัญญาณลำดับที่สอง โปรตีนไคเนส โปรตีนฟอสฟาเทส ปัจจัยควบคุมการถอดรหัส และระบบสลายโปรตีน ฮอร์โมนพืชแต่ละชนิดมีบทบาทเฉพาะ แต่สามารถส่งเสริมหรือต่อต้านกันตามบริบทของเซลล์และสิ่งแวดล้อม

ขณะเดียวกัน ตัวรับแสงช่วยให้พืชประเมินทั้งทิศทาง ความเข้ม คุณภาพ และระยะเวลาของแสง แล้วเชื่อมข้อมูลดังกล่าวกับเครือข่ายฮอร์โมน พืชจึงสามารถตัดสินใจได้ว่าจะงอก ยืดลำต้น แตกกิ่ง ออกดอก สร้างผล ปิดปากใบ พักตัว หรือกระตุ้นระบบป้องกันเมื่อใด

ระบบสัญญาณของพืชจึงเปรียบเสมือนเครือข่ายการสื่อสารที่ทำให้สิ่งมีชีวิตซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ที่สามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นพื้นฐานสำคัญของการปรับปรุงพันธุ์ การจัดการพืช และเทคโนโลยีการผลิตพืชสมัยใหม่

เอกสารที่ใช้เรียนเรียง: บทที่ 19 เรื่อง *Multiple Signals Regulate the Growth and Development of Plant Organs and Enable the Adaptation to Environmental Conditions* จากหนังสือ *Plant Biochemistry*