

การแสดงออกของยีนในพืช: จากข้อมูลพันธุกรรมสู่การเจริญเติบโตและการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม

บทนำ

พืชแต่ละชนิดมีรูปร่าง ลักษณะ สี กลิ่น รสชาติ และความสามารถในการปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ความแตกต่างเหล่านี้ส่วนหนึ่งถูกกำหนดโดยข้อมูลพันธุกรรมที่อยู่ภายในเซลล์ ข้อมูลดังกล่าวบรรจุอยู่ในโมเลกุลดีเอ็นเอ หรือ DNA ในรูปของหน่วยพันธุกรรมที่เรียกว่า ยีน

อย่างไรก็ตาม การมียีนอยู่ในจีโนมไม่ได้หมายความว่ายีนนั้นจะทำงานตลอดเวลา ยีนบางยีนทำงานเฉพาะในราก บางยีนทำงานในใบ ดอก เมล็ด หรือผล ขณะที่ยีนบางกลุ่มจะถูกกระตุ้นเมื่อพืชขาดน้ำ ถูกแมลงเข้าทำลาย ได้รับเชื้อโรค หรือสัมผัสกับอุณหภูมิที่ผิดปกติ กระบวนการที่เซลล์นำข้อมูลจากยีนมาใช้สร้างผลิตภัณฑ์ เช่น RNA หรือโปรตีน เรียกว่า การแสดงออกของยีน หรือ *gene expression*

การศึกษาการแสดงออกของยีนในพืชจึงมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจการเจริญเติบโต พัฒนาการ การสืบพันธุ์ การตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการปรับปรุงพันธุ์พืชให้มีผลผลิตสูงและทนต่อสภาวะเครียดต่าง ๆ

ความหมายของการแสดงออกของยีน

การแสดงออกของยีนหมายถึงกระบวนการที่ข้อมูลในลำดับเบสของ DNA ถูกนำไปใช้สร้างผลิตภัณฑ์ที่มีหน้าที่ในเซลล์ ผลิตภัณฑ์ของยีนอาจเป็น RNA ที่ทำหน้าที่โดยตรง หรืออาจเป็นโปรตีน เช่น เอนไซม์ โปรตีนโครงสร้าง ตัวรับสัญญาณ และโปรตีนควบคุมการทำงานของยีนอื่น

สำหรับยีนที่สร้างโปรตีน การแสดงออกของยีนประกอบด้วยสองขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

1. การถอดรหัส หรือ **transcription** เป็นการสร้าง RNA จากแม่แบบ DNA
2. การแปลรหัส หรือ **translation** เป็นการนำข้อมูลจาก messenger RNA หรือ mRNA ไปสร้างโปรตีน

แนวคิดนี้มักอธิบายเป็นลำดับว่า

DNA → RNA → โปรตีน

โปรตีนที่สร้างขึ้นจะทำหน้าที่ต่าง ๆ ภายในเซลล์ และก่อให้เกิดลักษณะทางสรีรวิทยาหรือฟีโนไทป์ของพืช เช่น สีของดอก ความสูงของลำต้น การสังเคราะห์แสง การสะสมน้ำตาล และความต้านทานโรค

ตำแหน่งของสารพันธุกรรมในเซลล์พืช

สารพันธุกรรมส่วนใหญ่ของพืชอยู่ในนิวเคลียส โดยรวมตัวเป็นโครโมโซม นอกจากนี้ ออร์แกเนลล์บางชนิดยังมี DNA ของตนเอง ได้แก่ คลอโรพลาสต์และไมโทคอนเดรีย

ยีนในนิวเคลียสควบคุมการทำงานส่วนใหญ่ของเซลล์ ขณะที่ยีนในคลอโรพลาสต์เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงและการทำงานของคลอโรพลาสต์ ส่วนยีนในไมโทคอนเดรียเกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์และการสร้างพลังงาน

อย่างไรก็ตาม คลอโรพลาสต์และไมโทคอนเดรียไม่สามารถทำงานได้อย่างอิสระทั้งหมด เพราะโปรตีนจำนวนมากที่ใช้ในออร์แกเนลล์เหล่านี้ถูกสร้างจากยีนในนิวเคลียส แล้วจึงถูกลำเลียงเข้าไปภายในออร์แกเนลล์ แสดงให้เห็นว่าการแสดงออกของยีนในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ต้องทำงานประสานกันอย่างซับซ้อน

โครงสร้างของยีนพืช

ยีนของพืชไม่ได้ประกอบด้วยเฉพาะส่วนที่ใช้กำหนดลำดับกรดอะมิโนของโปรตีนเท่านั้น แต่ยังมีบริเวณควบคุมที่กำหนดว่ายีนจะทำงานเมื่อใด ที่ใด และมากน้อยเพียงใด

บริเวณสำคัญของยีนประกอบด้วย

โปรโมเตอร์ หรือ promoter เป็นบริเวณด้านหน้าของยีนที่เอนไซม์และโปรตีนควบคุมเข้าจับ เพื่อเริ่มต้นการถอดรหัส

บริเวณควบคุม หรือ regulatory elements เป็นลำดับ DNA ที่ตอบสนองต่อสัญญาณต่าง ๆ เช่น แสง ฮอร์โมน อุณหภูมิ หรือการขาดน้ำ

เอกซอน หรือ exon เป็นส่วนของยีนที่ยังคงอยู่ใน RNA ที่สมบูรณ์ และอาจใช้กำหนดลำดับกรดอะมิโน

อินตรอน หรือ intron เป็นส่วนที่ถูกถอดรหัสเป็น RNA แต่จะถูกตัดออกก่อนที่ RNA จะถูกนำไปใช้สร้างโปรตีน

บริเวณยุติการถอดรหัส เป็นตำแหน่งที่ส่งสัญญาณให้กระบวนการสร้าง RNA สิ้นสุดลง

โครงสร้างเหล่านี้ทำให้ยีนสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและสัญญาณภายในเซลล์ได้อย่างจำเพาะ

ขั้นตอนการถอดรหัสในพืช

การถอดรหัสเกิดขึ้นภายในนิวเคลียส โดยเอนไซม์ RNA polymerase จะใช้สาย DNA เส้นหนึ่งเป็นแม่แบบในการสร้าง RNA

ในเซลล์พืชมี RNA polymerase หลายชนิด เช่น RNA polymerase I ทำหน้าที่สร้าง ribosomal RNA บางชนิด RNA polymerase II สร้าง mRNA และ RNA บางประเภท ส่วน RNA polymerase III สร้าง transfer RNA และ RNA ขนาดเล็ก บางชนิด

การถอดรหัสของยีนที่สร้างโปรตีนเริ่มจากโปรตีนควบคุมเข้าจับกับโปรโมเตอร์ จากนั้น RNA polymerase II จึงเข้าจับและเคลื่อนที่ไปตามสาย DNA พร้อมกับสร้างสาย RNA ที่มีลำดับเบสคู่สมกับแม่แบบ DNA

RNA ที่สร้างขึ้นในระยะแรกเรียกว่า **pre-mRNA** ซึ่งยังไม่พร้อมสำหรับการแปลรหัส จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับแต่งก่อน

การปรับแต่ง RNA

หลังการถอดรหัส pre-mRNA ของพืชจะผ่านกระบวนการสำคัญ ได้แก่ การเติมโครงสร้างที่ปลายด้านหน้า การเติมสาย poly(A) ที่ปลายด้านท้าย และการตัดต่อ RNA

การเติมโครงสร้างที่ปลาย 5' เรียกว่า **5' cap** ช่วยป้องกัน RNA จากการสลายตัว และช่วยในการเริ่มต้นการแปลรหัส

การเติม **poly(A) tail** ที่ปลาย 3' เป็นการเติมเบสอะดีนีนจำนวนมาก ช่วยเพิ่มความเสถียรของ mRNA และมีส่วนช่วยในการลำเลียง mRNA ออกจากนิวเคลียส

การตัดต่อ RNA หรือ **RNA splicing** เป็นกระบวนการตัดอินทอนออก แล้วเชื่อมเอกซอนเข้าด้วยกัน ทำให้ได้ mRNA ที่สมบูรณ์

ยีนบางยีนสามารถตัดต่อ RNA ได้หลายรูปแบบ เรียกว่า **alternative splicing** กระบวนการนี้ทำให้ยีนหนึ่งยีนสามารถสร้าง mRNA และ โปรตีนได้มากกว่าหนึ่งชนิด จึงช่วยเพิ่มความหลากหลายของโปรตีนโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนยีนในจีโนม

การแปลรหัสและการสร้างโปรตีน

เมื่อ mRNA ที่สมบูรณ์ถูกลำเลียงออกจากนิวเคลียสเข้าสู่ไซโทพลาซึม จะถูกใช้เป็นแม่แบบในการสร้างโปรตีนที่ไรโบโซม

ไรโบโซมจะอ่านลำดับเบสของ mRNA ทีละสามเบส เรียกว่า **โคดอน** แต่ละโคดอนกำหนดกรดอะมิโนหนึ่งชนิด transfer RNA หรือ tRNA จะนำกรดอะมิโนที่ตรงกับโคดอนมาเรียงต่อกันเป็นสายพอลิเพปไทด์

เมื่อสร้างสายพอลิเพปไทด์เสร็จแล้ว โปรตีนอาจต้องผ่านการพับตัว การตัดบางส่วน หรือการเติมหมู่เคมี เช่น หมู่ฟอสเฟต และหมู่น้ำตาล เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

โปรตีนที่สร้างขึ้นอาจทำงานในไซโทพลาซึม นิวเคลียส เยื่อหุ้มเซลล์ แวกคิวโอล คลอโรพลาสต์ ไมโทคอนเดรีย หรือถูกหลั่งออกนอกเซลล์ ตำแหน่งปลายทางของโปรตีนมักถูกกำหนดด้วยลำดับกรดอะมิโนที่ทำหน้าที่เหมือน “ป้ายบอกที่อยู่”

การควบคุมการแสดงออกของยีน

เซลล์พืชควบคุมการแสดงออกของยีนได้หลายระดับ ตั้งแต่การเปิดหรือปิดบริเวณ DNA การเริ่มต้นถอดรหัส การปรับแต่ง RNA ความเสถียรของ mRNA การแปลรหัส ตลอดจนการตัดแปลงและการสลายโปรตีน

การควบคุมระดับโครมาติน

DNA ในนิวเคลียสพันรอบโปรตีนฮิสโตนและรวมตัวเป็นโครมาติน หากโครมาตินอยู่ในสภาพอัดแน่น โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการถอดรหัสจะเข้าถึงยีนได้ยาก ทำให้ยีนทำงานน้อยหรือไม่ทำงาน

ในทางตรงกันข้าม หากโครมาตินคลายตัว ยีนจะถูกเข้าถึงได้ง่ายและมีโอกาสแสดงออกมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เกี่ยวข้องกับการตัดแปลงฮิสโตนและการเติมหมู่เมทิลบน DNA

การควบคุมโดย transcription factors

Transcription factors เป็นโปรตีนที่จับกับลำดับ DNA จำเพาะบริเวณโปรโมเตอร์หรือบริเวณควบคุม โปรตีนเหล่านี้อาจกระตุ้นหรือยับยั้งการถอดรหัส

พืชมี transcription factors จำนวนมาก เช่น กลุ่ม MYB, bZIP, WRKY, NAC และ AP2/ERF แต่ละกลุ่มมีบทบาทแตกต่างกัน เช่น ควบคุมการสร้างเม็ดสี การพัฒนาราก การตอบสนองต่อความแห้งแล้ง และการป้องกันเชื้อโรค

การควบคุมหลังการถอดรหัส

หลังจากสร้าง RNA แล้ว เซลล์ยังสามารถควบคุมการตัดต่อ การลำเลียง และการสลาย RNA ได้ RNA บางชนิดมีอายุสั้นจึงสร้างโปรตีนได้เพียงเล็กน้อย ขณะที่ RNA ที่มีความเสถียรสูงสามารถใช้เป็นแม่แบบสร้างโปรตีนได้หลายครั้ง

RNA ขนาดเล็ก เช่น microRNA หรือ miRNA สามารถจับกับ mRNA เป้าหมาย ทำให้ mRNA ถูกสลายหรือไม่สามารถแปลรหัสได้ กลไกนี้มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาพืชและการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม

การควบคุมระดับโปรตีน

โปรตีนที่สร้างขึ้นอาจยังไม่ทำงานทันที บางชนิดต้องได้รับการเติมหมู่ฟอสเฟต หรือจับกับโมเลกุลอื่นก่อนจึงจะทำงานได้ นอกจากนี้ เซลล์สามารถควบคุมอายุของโปรตีนผ่านระบบ ubiquitin–proteasome โดยทำเครื่องหมายโปรตีนที่ต้องการกำจัดด้วย ubiquitin แล้วส่งไปสลายในโปรตีโอโซม

การแสดงออกของยีนในเนื้อเยื่อพืช

แม้เซลล์ส่วนใหญ่ของพืชจะมีชุดยีนเหมือนกัน แต่เซลล์แต่ละชนิดมีรูปร่างและหน้าที่แตกต่างกัน เพราะมีรูปแบบการแสดงออกของยีนไม่เหมือนกัน

เซลล์ใบมีการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงสูง เช่น ยีนที่สร้างคลอโรฟิลล์และโปรตีนในระบบแสง เซลล์รากแสดงยีนเกี่ยวกับการดูดน้ำและแร่ธาตุ ส่วนเซลล์ดอกแสดงยีนที่ควบคุมการพัฒนาของกลีบเลี้ยง กลีบดอก เกสรเพศผู้ และเกสรเพศเมีย

ตัวอย่างที่ชัดเจนคือยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โปรตีน RuBisCO ซึ่งมีการแสดงออกสูงในเนื้อเยื่อสีเขียวที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสง แต่มีการแสดงออกต่ำในรากที่อยู่ใต้ดิน

ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างราก ลำต้น ใบ ดอก ผล และเมล็ดจึงไม่ได้เกิดจากการมียีนคนละชุด แต่เกิดจากการเลือกเปิดและปิดยีนที่แตกต่างกัน

บทบาทของฮอร์โมนพืชต่อการแสดงออกของยีน

ฮอร์โมนพืชเป็นสารสื่อสัญญาณที่ควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาการ โดยเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนเป้าหมาย

ออกซินมีบทบาทต่อการยืดตัวของเซลล์ การเกิดราก และการกำหนดรูปแบบของอวัยวะพืช เมื่อเซลล์ได้รับออกซิน โปรตีนยับยั้งบางชนิดจะถูกสลาย ทำให้ transcription factors สามารถกระตุ้นยีนที่ตอบสนองต่อออกซินได้

ไซโทไคนินเกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ การพัฒนายอด และการชะลอความแก่ของใบ ส่วนจิบเบอเรลลินกระตุ้นการยืดตัวของลำต้นและการงอกของเมล็ด โดยส่งเสริมการสลายโปรตีนที่ยับยั้งการเจริญเติบโต

กรดแอบไซซิก หรือ ABA มีบทบาทสำคัญเมื่อพืชขาดน้ำ โดยกระตุ้นยีนที่เกี่ยวข้องกับการปิดปากใบ การรักษาสมดุลน้ำ และการสร้างโปรตีนป้องกันความเสียหายของเซลล์

เอทิลีนควบคุมการสุกของผล การหลุดร่วงของใบ และการตอบสนองต่อบาดแผล ขณะที่กรดแจสโมนิกและกรดซาลิไซลิกมีบทบาทสำคัญต่อการป้องกันแมลงและเชื้อโรค

การตอบสนองต่อแสง

แสงไม่ได้เป็นเพียงแหล่งพลังงานสำหรับการสังเคราะห์แสง แต่ยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณควบคุมการแสดงออกของยีน พืชมีตัวรับแสงหลายชนิด เช่น phytochrome, cryptochrome และ phototropin

Phytochrome ตอบสนองต่อแสงสีแดงและแสงสีแดงไกล มีบทบาทในการงอกของเมล็ด การยืดตัวของลำต้น และการออกดอก ส่วน cryptochrome ตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงินและแสงอัลตราไวโอเลตบางช่วง

เมื่อพืชได้รับแสง ตัวรับแสงจะส่งสัญญาณไปยังนิวเคลียส ทำให้ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างคลอโรพลาสต์ การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และการสังเคราะห์แสงเริ่มทำงาน ต้นกล้าที่ได้รับแสงจึงเปลี่ยนจากลักษณะลำต้นยาว สีเหลือง และใบไม่กางไปเป็นต้นกล้าสีเขียวที่มีใบขยายตัว

การตอบสนองต่อความเครียดจากสิ่งแวดล้อม

พืชไม่สามารถเคลื่อนที่หนีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ จึงต้องปรับตัวด้วยการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและการแสดงออกของยีน

ความแห้งแล้ง

เมื่อพืชขาดน้ำ ระดับฮอร์โมน ABA จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปากใบปิดเพื่อลดการสูญเสียน้ำ พร้อมกับกระตุ้นยีนที่สร้างโปรตีนป้องกันเซลล์ สารควบคุมสมดุลออสโมซิส และเอนไซม์กำจัดอนุมูลอิสระ

พืชอาจสะสมสาร เช่น โปรตีน น้ำตาล และสารละลายอื่นที่ช่วยรักษาน้ำในเซลล์ รวมทั้งสร้างโปรตีน LEA ซึ่งช่วยป้องกันโครงสร้างภายในเซลล์จากความเสียหายระหว่างการขาดน้ำ

ความเค็ม

ดินเค็มทำให้พืชเผชิญทั้งการขาดน้ำและความเป็นพิษจากไอออนโซเดียม พืชจึงกระตุ้นยีนที่เกี่ยวข้องกับการลำเลียงไอออน การขับโซเดียมออกจากเซลล์ และการเก็บโซเดียมไว้ในแวคิวโอล

ระบบ SOS หรือ Salt Overly Sensitive เป็นตัวอย่างของเส้นทางสัญญาณที่ช่วยควบคุมสมดุลของไอออนและเพิ่มความทนเค็มของพืช

อุณหภูมิสูง

เมื่อพืชได้รับความร้อน โปรตีนในเซลล์อาจเสียโครงสร้าง พืชจึงกระตุ้นยีนที่สร้าง heat shock proteins โปรตีนเหล่านี้ช่วยพับโปรตีนให้กลับคืนสู่โครงสร้างที่เหมาะสม และช่วยป้องกันการรวมตัวของโปรตีนที่เสียสภาพ

อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิต่ำส่งผลต่อความยืดหยุ่นของเยื่อหุ้มเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ พืชบางชนิดสามารถปรับตัวโดยกระตุ้นยีนในเส้นทาง CBF-COR ซึ่งนำไปสู่การสร้างโปรตีนและสารป้องกันความเสียหายจากความเย็น

ภาวะน้ำท่วมและการขาดออกซิเจน

เมื่อรากจมอยู่ในน้ำ การแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่เนื้อเยื่อจะลดลง พืชจึงเปลี่ยนการแสดงออกของยีนจากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนไปสู่กระบวนการสร้างพลังงานแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่น การหมัก

พืชทนน้ำท่วมบางชนิดสามารถสร้างช่องอากาศในเนื้อเยื่อ หรือควบคุมการยืดตัวของลำต้นเพื่อให้ใบพ้นผิวน้ำ กลไกเหล่านี้ต้องอาศัยการควบคุมยีนอย่างเป็นระบบ

การตอบสนองต่อเชื้อโรคและแมลง

เมื่อพืชตรวจพบโมเลกุลจากเชื้อโรค ตัวรับบนเยื่อหุ้มเซลล์จะกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ทำให้เกิดการส่งสัญญาณเข้าสู่ นิวเคลียสและเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนจำนวนมาก

พืชอาจสร้างเอนไซม์ที่ทำลายผนังเซลล์ของเชื้อรา สร้างสารต้านจุลชีพ สร้างสารเมแทบอลิต์เฉพาะทาง หรือทำให้เซลล์ บริเวณที่ติดเชื้อมีตายอย่างรวดเร็วเพื่อจำกัดการแพร่กระจายของเชื้อ

กรดซาลิไซลิกมีบทบาทสำคัญในการป้องกันเชื้อโรคที่อาศัยเซลล์พืชที่มีชีวิต ส่วนกรดแจสโมนิคและเอทิลีนมักเกี่ยวข้องกับการป้องกันแมลงกินพืชและเชื้อโรคที่ทำลายเซลล์

ยีนในกลุ่ม pathogenesis-related หรือ PR genes เป็นตัวอย่างของยีนที่ถูกกระตุ้นเมื่อพืชติดเชื้อ ผลผลิตของยีนกลุ่มนี้บางชนิดสามารถย่อยสลายส่วนของเชื้อรา หรือช่วยเพิ่มความต้านทานของเนื้อเยื่อพืช

การแสดงออกของยีนกับการพัฒนาดอก

การเปลี่ยนจากระยะเจริญทางลำต้นและใบเข้าสู่ระยะออกดอกเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมอย่างละเอียด พืชรับรู้ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยาวของช่วงกลางวัน อุณหภูมิ อายุของต้น และระดับฮอร์โมน แล้วส่งสัญญาณไปควบคุมยีนที่เกี่ยวข้องกับการออกดอก

ยีน FT เป็นยีนสำคัญที่ทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณกระตุ้นการออกดอก โปรตีน FT ถูกสร้างในใบแล้วลำเลียงไปยังปลายยอด เพื่อกระตุ้นยีนที่เปลี่ยนเนื้อเยื่อเจริญให้พัฒนาเป็นดอก

การกำหนดอวัยวะของดอกอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง ABC ซึ่งเสนอว่ากลุ่มยีนต่าง ๆ ทำงานร่วมกันเพื่อกำหนดการสร้างกลีบเลี้ยง กลีบดอก เกสรเพศผู้ และเกสรเพศเมีย การเปลี่ยนแปลงของยีนเพียงบางยีนอาจทำให้อวัยวะดอกชนิดหนึ่งเปลี่ยนไปเป็นอีกชนิดหนึ่งได้

การสุกของผลและการพัฒนาเมล็ด

ระหว่างการพัฒนาเมล็ด ยีนที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ การสะสมแป้ง น้ำมัน และโปรตีนสะสมจะถูกกระตุ้น ขณะที่ยีนบางกลุ่มช่วยให้เมล็ดเข้าสู่ภาวะพักตัวและทนต่อการสูญเสียน้ำ

เมื่อเมล็ดเริ่มงอก รูปแบบการแสดงออกของยีนจะเปลี่ยนไป ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสลายอาหารสะสมและการสร้างพลังงานจะทำงานมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ในเมล็ดธัญพืช จิบเบอเรลลินจะกระตุ้นการสร้างเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส เพื่อย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลสำหรับเลี้ยงต้นอ่อน

ในผลไม้บางชนิด เช่น มะเขือเทศและกล้วย เอทิลีนกระตุ้นยีนที่เกี่ยวข้องกับการนิ่มของผนังเซลล์ การเปลี่ยนสี การสร้างกลิ่น และการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ทำให้ผลเกิดการสุก

นาฬิกาชีวภาพและการแสดงออกของยีน

พืชมีนาฬิกาชีวภาพภายในที่มีรอบประมาณ 24 ชั่วโมง เรียกว่า **circadian clock** นาฬิกานี้ควบคุมการแสดงออกของยีนจำนวนมาก เช่น ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง การเปิดปิดปากใบ การเจริญเติบโต และการสร้างกลีบของดอก

แม้พืชจะถูกเก็บไว้ในสภาพแสงคงที่ กิจกรรมบางอย่างยังคงเกิดขึ้นเป็นจังหวะ แสดงให้เห็นว่าจังหวะดังกล่าวไม่ได้เกิดจากแสงโดยตรงเท่านั้น แต่ถูกควบคุมโดยระบบนาฬิกาภายใน

แสงและอุณหภูมิทำหน้าที่ปรับนาฬิกาชีวภาพให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง ทำให้พืชสามารถเตรียมพร้อมสำหรับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นประจำ เช่น พระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตก

การควบคุมแบบอีพีเจเนติก

อีพีเจเนติก หรือ epigenetics หมายถึงการเปลี่ยนแปลงการทำงานของยีนโดยไม่เปลี่ยนลำดับเบสของ DNA กลไกสำคัญได้แก่ การเติมหมู่เมทิลบน DNA การดัดแปลงโปรตีนฮิสโตน และการปรับโครงสร้างโครมาติน

การเติมหมู่เมทิลบนบริเวณควบคุมของยีนมักสัมพันธ์กับการลดการแสดงออกของยีน ขณะที่การเปลี่ยนแปลงบางชนิดบนฮิสโตนอาจทำให้โครมาตินคลายตัวและกระตุ้นการแสดงออกของยีน

กระบวนการอีพีเจเนติกมีบทบาทต่อการพัฒนาเอ็มบริโอ การสร้างดอก การพักตัวของเมล็ด การตอบสนองต่อความเครียด และการควบคุมชิ้นส่วน DNA ที่สามารถเคลื่อนที่ได้หรือ transposable elements

ตัวอย่างที่สำคัญคือ vernalization หรือการที่พืชต้องได้รับอุณหภูมิต่ำเป็นเวลานานก่อนจึงจะออกดอกได้ ความเย็นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครมาตินบริเวณยีนยับยั้งการออกดอก ส่งผลให้ยีนดังกล่าวถูกปิดและพืชสามารถออกดอกเมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสม

การศึกษาการแสดงออกของยีนในพืช

นักวิทยาศาสตร์ใช้หลายวิธีในการศึกษาว่ายีนใดทำงานในเนื้อเยื่อหรือสภาวะต่าง ๆ

RT-PCR และ quantitative PCR

RNA จะถูกเปลี่ยนกลับเป็น complementary DNA หรือ cDNA ก่อน จากนั้นจึงเพิ่มจำนวนด้วยเทคนิค PCR วิธี quantitative PCR หรือ qPCR สามารถใช้วัดปริมาณการแสดงออกของยีนเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

วิธีนี้เหมาะสำหรับศึกษา ยีนจำนวนไม่มาก และใช้เปรียบเทียบการแสดงออกระหว่างตัวอย่าง เช่น พืชปกติกับพืชที่ขาดน้ำ

RNA sequencing

RNA sequencing หรือ RNA-seq เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ RNA จำนวนมากในตัวอย่างเดียว ทำให้สามารถตรวจสอบการแสดงออกของยีนทั่วทั้งจีโนม ค้นหายีนใหม่ ศึกษา alternative splicing และเปรียบเทียบรูปแบบการแสดงออกระหว่างเนื้อเยื่อหรือสภาวะต่าง ๆ ได้

Reporter genes

ยีนรายงานผล เช่น GUS, GFP และ luciferase สามารถเชื่อมต่อกับโปรโมเตอร์ของยีนที่สนใจ เมื่อนำเข้าไปในพืช นักวิทยาศาสตร์สามารถสังเกตได้ว่าโปรโมเตอร์ดังกล่าวทำงานในเนื้อเยื่อใดหรือช่วงเวลาใด

ตัวอย่างเช่น การใช้ GFP ทำให้บริเวณที่ยีนทำงานเรืองแสงสีเขียวเมื่อส่องด้วยแสงที่เหมาะสม

In situ hybridization

เทคนิคนี้ใช้ตรวจหาตำแหน่งของ RNA ภายในเนื้อเยื่อ ทำให้ทราบว่ายีนแสดงออกในเซลล์ชนิดใด เหมาะสำหรับศึกษาการพัฒนาอวัยวะ เช่น ราก ยอด ดอก และเอ็มบริโอ

การวิเคราะห์โปรตีน

เนื่องจากปริมาณ mRNA ไม่ได้สัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนเสมอไป การศึกษาการแสดงออกของยีนจึงอาจต้องตรวจวัดโปรตีนด้วย เช่น Western blot, mass spectrometry และการวิเคราะห์โปรตีโอม

การประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืช

ความรู้เรื่องการแสดงออกของยีนช่วยให้นักปรับปรุงพันธุ์สามารถระบุยีนที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสำคัญ เช่น ผลผลิต คุณภาพทางโภชนาการ ความต้านทานโรค และความทนแล้ง

การเปรียบเทียบการแสดงออกของยีนระหว่างพันธุ์ทนแล้งกับพันธุ์ไวต่อความแห้งแล้ง อาจช่วยค้นหายีนที่เกี่ยวข้องกับการรักษาน้ำ การพัฒนาราก และการป้องกันความเสียหายจากอนุมูลอิสระ ยีนเหล่านี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคัดเลือกพันธุ์หรือการพัฒนาเครื่องหมายโมเลกุล

เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรมสามารถนำยีนที่มีประโยชน์เข้าสู่พืช หรือเพิ่มการแสดงออกของยีนเดิม เช่น การเพิ่มยีนต้านทานแมลง การเพิ่มการสร้างวิตามิน หรือการเพิ่มความทนต่อสารกำจัดวัชพืช

เทคโนโลยี CRISPR-Cas ยังสามารถแก้ไขลำดับ DNA บริเวณยีนหรือบริเวณควบคุม เพื่อเพิ่ม ลด หรือเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนได้อย่างจำเพาะ โดยไม่จำเป็นต้องนำยีนจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นเข้าสู่พืชเสมอไป

ชีววิทยาสังเคราะห์และการออกแบบการแสดงออกของยีน

ชีววิทยาสังเคราะห์เป็นศาสตร์ที่นำหลักวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้กับระบบชีวภาพ นักวิทยาศาสตร์สามารถออกแบบโปรโมเตอร์ วงจรควบคุมยีน และระบบตอบสนองต่อสัญญาณ เพื่อให้พืชสร้างผลิตภัณฑ์หรือแสดงลักษณะที่ต้องการ

ตัวอย่างเช่น การออกแบบให้พืชสร้างสารชีวเภสัชภัณฑ์ การเพิ่มการผลิตสารเมแทบอไลต์ที่มีคุณค่าทางยา การสร้างพืชที่ตรวจจับสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม หรือการควบคุมให้ยีนต้านทานความเครียดทำงานเฉพาะเมื่อพืชเผชิญสภาวะไม่เหมาะสม

การใช้โปรโมเตอร์จำเพาะต่อเนื้อเยื่อช่วยให้ยีนทำงานเฉพาะในตำแหน่งที่ต้องการ เช่น ให้ยีนต้านทานแมลงทำงานเฉพาะในใบ หรือให้ยีนเพิ่มคุณค่าทางอาหารทำงานเฉพาะในเมล็ดและผล วิธีนี้ช่วยลดผลกระทบที่ไม่ต้องการต่อส่วนอื่นของพืช

ความซับซ้อนของเครือข่ายยีน

การแสดงออกของยีนในพืชไม่ได้เกิดขึ้นแบบยีนหนึ่งยีนควบคุมลักษณะหนึ่งลักษณะเสมอไป ลักษณะส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานร่วมกันของยีนจำนวนมากในรูปของเครือข่าย

ยีนหนึ่งยีนอาจควบคุมยีนเป้าหมายหลายยีน ขณะเดียวกันยีนเป้าหมายหนึ่งยีนอาจถูกควบคุมด้วย transcription factors หลายชนิด เครือข่ายดังกล่าวยังเชื่อมโยงกับฮอริโมน สัญญาณแคลเซียม อนุพลออกซิเจน และกระบวนการเมแทบอลิซึม

ตัวอย่างเช่น การตอบสนองต่อความแห้งแล้งไม่ได้เกิดจากยีนทนแล้งเพียงยีนเดียว แต่เกี่ยวข้องกับยีนที่ควบคุมการปิดปากใบ การเจริญของราก การสะสมสารละลาย การป้องกันโปรตีน และการกำจัดอนุมูลอิสระ

ดังนั้น การปรับเปลี่ยนยีนเพียงยีนเดียวอาจให้ผลแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด หรืออาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตด้านอื่น ๆ การศึกษาการแสดงออกของยีนจึงต้องพิจารณาทั้งระบบมากกว่ามองเฉพาะยีนรายตัว

ข้อจำกัดในการศึกษาการแสดงออกของยีน

แม้เทคนิคสมัยใหม่จะสามารถวัด RNA ได้ละเอียด แต่ปริมาณ mRNA ไม่ได้สะท้อนกิจกรรมของโปรตีนทั้งหมด เนื่องจาก RNA อาจถูกสลาย โปรตีนอาจถูกสร้างในอัตราต่างกัน หรือโปรตีนอาจต้องผ่านการดัดแปลงก่อนจึงจะทำงานได้

นอกจากนี้ เนื้อเยื่อพืชหนึ่งชิ้นประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด หากวิเคราะห์ RNA จากเนื้อเยื่อรวม ผลที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของเซลล์ทั้งหมด และอาจบดบังความแตกต่างระหว่างเซลล์

เทคนิค single-cell RNA sequencing จึงได้รับการพัฒนาเพื่อศึกษาการแสดงออกของยีนในระดับเซลล์เดียว ช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของเซลล์ในราก ใบ ยอด และอวัยวะอื่น ได้ละเอียดมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม การแยกเซลล์พืชทำได้ยากกว่าเซลล์สัตว์ เนื่องจากพืชมีผนังเซลล์ นักวิจัยจึงอาจใช้การแยกโปรโทพลาสต์ หรือวิเคราะห์ RNA จากนิวเคลียสแทน

ความสำคัญต่อการเกษตรในอนาคต

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้พืชต้องเผชิญกับความแห้งแล้ง อุณหภูมิสูง น้ำท่วม ความเค็ม และการระบาดของศัตรูพืชมากขึ้น การทำความเข้าใจการแสดงออกของยีนจะช่วยให้สามารถพัฒนาพืชที่ปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมเหล่านี้ได้

การวิเคราะห์ยีนร่วมกับข้อมูลจีโนม โปรตีโอม เมแทบอลิโอม และลักษณะทางสรีรวิทยา จะช่วยให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจการทำงานของพืชแบบองค์รวมมากขึ้น

ในอนาคต การใช้ปัญญาประดิษฐ์และการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่จะช่วยให้ทำนายว่ายีนใดควรถูกปรับเปลี่ยน เพื่อให้พืชมีผลผลิตสูง ใช้น้ำและปุ๋ยน้อยลง ทนต่อโรค และมีคุณค่าทางอาหารดีขึ้น

สรุป

การแสดงออกของยีนเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนข้อมูลพันธุกรรมใน DNA ให้กลายเป็น RNA และโปรตีนที่ทำหน้าที่ในเซลล์ กระบวนการนี้ถูกควบคุมหลายระดับ ตั้งแต่โครงสร้างโครมาติน การถอดรหัส การตัดต่อ RNA การแปลรหัส ไปจนถึงการควบคุมและการสลายโปรตีน

แม้เซลล์พืชส่วนใหญ่จะมีชุดยีนเหมือนกัน แต่เซลล์แต่ละชนิดมีลักษณะและหน้าที่ต่างกัน เพราะเปิดและปิดยีนไม่เหมือนกัน การแสดงออกของยีนยังเปลี่ยนแปลงตามแสง ฮอโมน อายุของพืช เชื้อโรค และสภาพแวดล้อม

ความรู้ด้านการแสดงออกของยีนจึงเป็นพื้นฐานสำคัญของชีววิทยาพืช การเกษตรสมัยใหม่ การปรับปรุงพันธุ์ เทคโนโลยีชีวภาพ และชีววิทยาสังเคราะห์ การทำความเข้าใจว่ายีนทำงานเมื่อใด ที่ใด และทำงานร่วมกับยีนอื่นอย่างไร จะช่วยให้มนุษย์สามารถพัฒนาพืชที่ให้ผลผลิตดี มีคุณภาพสูง และสามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน

สามารถนำบทความนี้ไปจัดเป็นบทเรียน โดยเพิ่มภาพแสดงขั้นตอน $\text{DNA} \rightarrow \text{RNA} \rightarrow \text{โปรตีน}$, แผนผังการควบคุมยีน และคำถามท้ายบทได้