تعبير الجينات إلى تراكم — ليس فقط بروتينات حماية — ولكن كذلك مئات النواتج الأيضية الأخرى التى يُعرف لبعضها وظائف حماية (عن Zhu وآخرين ٢٠٠٧).

وتتضمن تقسية البرودة التعبير عن بعض الجينات التى تعمل على حماية الأغشية البروتوبلازمية من أضرار التجمد. ولقد أمكن التعرف فى نبات الـ Arabidopsis على مجموعة من عوامل النسخ transcription factors — هى البروتينات CBF/DREB1 — تتحكم فى مجموعة من الجينات التى تستحث البرودة عملها لأجل زيادة القدرة على تحمل التجمد (Thomashow ١٩٩٩).

طبيعة تحمل البرودة

دور الأحماض الدهنية غير المشبعة بالغشاء البلازمى

تحتوى الأغشية البروتوبلازمية للخلايا على أحماض دهنية غير مشبعة بدرجة عالية، وهى التى يُشار إليها باسم trienoic fatty acids (اختصارًا: TFA). ورغم تباين كمية تلك الأحماض فى النوع النباتى الواحد تبعًا للبيئة التى يعيش فيها النبات، فإن النباتات ذات القدرة العالية على تحمل الحرارة المنخفضة — مثل القمح — تزداد فيها كمية الـ TFA لتمثل أكثر من ٨٠٪ من جميع الأحماض الدهنية فى الغشاء البلازمى حينما تتعرض لحرارة منخفضة. وفى المقابل .. فإن بعض النباتات الصحراوية والتى تتحمل الأجواء الحارة والجفاف تنخفض فيها بوضوح نسبة الـ TFA فى البيئات الحارة. ولذا .. فإنه يعتقد بأن الـ TFA تلعب دورًا هامًّا فى تحمل النباتات للبرودة والحرارة. ولقد أمكن إنتاج نباتات محولة وراثيًّا ذات قدرة عالية على تحمل الحرارة بتثبيط نشاط الإنزيم omega-3 fatty acid desaturase الذى يقوم بتمثيل الـ TFA (Iba ٢٠٠٦).

وقد تبين لدى مقارنة الأحماض الدهنية فى الأغشية الخلوية للنباتات الحساسة للبرودة بتلك التى تكون فى النباتات المتحملة لها، وفى النباتات التى أقلمت على البرودة مقابل تلك التى لم تؤقلم .. تبين وجود وفرة أكبر من الأحماض الدهنية التى

تحتوى إما على رابطتين غير مشبعتين (حامض اللينوليّك linoleic acid)، وإما على ثلاث روابط غير مشبعة (حامض اللينولينك linolenic acid) بكل حامض دهنى من الدهون الفوسفورية التى توجد فى الأغشية الخلوية بالنباتات الأكثر تحملاً للبرودة عن الأقل تحملاً، وبالنباتات الأكثر تأقلمًا على البرودة عن غير المؤقلمة، هذا مع العلم بأن الأحماض الدهنية غير المشبعة تجعل الأغشية الخلوية أكثر سيولة فى الحرارة المنخفضة، مما يمنع صلابتها عند انخفاض الحرارة إلى أقل من ١٠°م.

ومن المعلوم أن معظم الـ cyanobacteria وعديد من النباتات تحتوى على مستويات عالية من الأحماض الدهنية غير المشبعة فى أغشيتها الخلوية، ولقد وجد أن الجينات الخاصة بعدم تشبع الأحماض الدهنية fatty acid desaturases (مثل الجينات: desA، و desB، و desC فى السيانوبكتيريا *Synechocystis* sp.) هى المسئولة عن تحملها للحرارة المنخفضة.

وقد أمكن تحديد وعزل ونقل الجين الذى يشفر لتكوين الإنزيم glycerol-3-phosphate acyltransferase الذى يختص بإضافة ولحام الأحماض الدهنية غير المشبعة إلى العمود الفقرى الجليسرولى glycerol backbone للدهون الفوسفورية، وبذا .. أمكن هندسة نباتات وراثيًّا (نباتات التبغ) كانت أكثر تحملاً للحرارة المنخفضة (عن Murata وآخرين ١٩٩٦، و Chrispeels & Sadava ٢٠٠٣).

أهمية مضادات الأكسدة فى تقليل أضرار البرودة

تُنتج جميع الكائنات الحية عناصر نشطة فى الأكسدة reactive oxygen species (اختصارًا: ROSs)، منها السوبر أوكسيد (O_2^-)، وفوق أكسيد الأيدروجين (H_2O_2)، والـ hydroxyl radical (أى OH). يمكن لهذه العناصر النشطة التفاعل مع عديد من المركبات الخلوية؛ مما يؤدى إلى فقدان لون الصبغات، والإضرار بالبروتينات والأحماض النووية، وأكسدة دهون الأغشية البروتوبلازمية. وتؤدى أضرار الأكسدة الشديدة إلى موت الخلايا والأنسجة.

ويعد الكاتاليز catalase الإنزيم الفاعل الرئيسى الذى يعمل على فوق أكسيد الأيدروجين فى البيروكسى زومات peroxisomes، كما يتواجد فى الميتوكوندريا — كذلك — فى النباتات. ويُنتج فوق أكسيد الأيدروجين خلال كثير من العمليات الخلوية، فهو يتم تمثيله كناتج للتنفس فى الضوء photorespiration، والـ β-oxidation للأحماض الدهنية، وكنتيجة للشدِّ البيئى والبيولوجى.

ولقد وجد أن أضرار البرودة فى النباتات تتحقق جزئيًا بواسطة العناصر النشطة فى الأكسدة التى تحدث أضرارًا ثانوية بالأنسجة. فعلى سبيل المثال .. أدى تعريض بادرات الخيار للبرودة فى الضوء إلى حث أكسدة الدهون واستنفاذ مضادات الأكسدة بما فى ذلك الألفا توكوفيرول α-tocopherol، والجلوتاثيون، وحامض الأسكوربيك (عن Kerdnaimongkol & Woodson ١٩٩٩).

بروتينات الصدمة الحرارية وعلاقتها بتحمل أضرار البرودة فى ثمار الطماطم

دُرس تأثير الجينان المتحكمان فى إنتاج بروتينات الصدمة الحرارية tom66، و tom111 على الطماطم المحولة وراثيًا بهما، وتبين أن التعبير عنهما استُحِثَّ بفعل التعرض للحرارة فى الثمار، والأزهار، والأوراق، والسيقان، ولكن ليس بفعل الحرارة المنخفضة أو العادية المعتدلة، أو بأنواع الشدِّ الأخرى مثل الجفاف أو الظروف اللاهوائية. وعندما عُرِّضت ثمار الطماطم لحرارة مرتفعة، ثم نُقلت لحرارة منخفضة فإن مستويات آران أى الرسول mRNA لكل من tom66، و tom111 انخفضت أولاً، ولكنها استُحِثَّت بعد ذلك، ولم يلاحظ ذلك الاستحثاث فى الثمار التى لم تُعرض للحرارة. ولقد كان الاستنتاج الذى تم التوصل إليه من تلك الدراسة أن التعبير عن tom66، و tom111 يرتبط بالحماية ضد بعض — وليس كل — أعراض أضرار البرودة فى ثمار الطماطم (Sabehat وآخرون ١٩٩٨).