

जलवायु चुनौतियों के खिलाफ फसलों का सशक्तिकरण

अनीता मान, सुजाता, पूनम, प्रीति, नोयोनिका, हरीश, अन्नु, कृशानु और **नितीश रंजन प्रकाश**

"कृषि उत्पादकता पर सूखा, लवणता, अत्यधिक तापमान (गर्मी और शीत) और पोषक तत्वों के असंतुलन जैसे विभिन्न अजैविक तनावों का गंभीर प्रभाव पड़ता है। ये पर्यावरणीय तनाव पौधों की वृद्धि, विकास और उपज को गंभीर रूप से प्रभावित करते हैं। इससे वैश्विक खाद्य सुरक्षा के सामने एक बड़ी चुनौती उत्पन्न होती है-विशेष रूप से जलवायु परिवर्तन और निरंतर बढ़ती जनसंख्या के संदर्भ में। वहीं पारंपरिक प्रजनन विधियों का उपयोग दशकों से तनाव-सहिष्णु फसल किस्मों के विकास हेतु किया जा रहा है, लेकिन ये विधियां समय-गहन और श्रमसाध्य होती हैं। इसके साथ ही इनकी प्रभावशीलता प्राकृतिक आनुवंशिक विविधता की उपलब्धता तक सीमित रहती है। पिछले कुछ वर्षों में, जीनोम संपादन प्रौद्योगिकियां सटीक और लक्षित आनुवंशिक संशोधनों के लिए महत्वपूर्ण उपकरण के रूप में उभरी हैं। ये अजैविक तनाव की स्थिति में फसलों की प्रतिरोधक क्षमता बढ़ाने के लिए नए मार्ग प्रदान करती हैं। पारंपरिक प्रजनन या ट्रांसजेनिक विधियों के विपरीत, जीनोम संपादन में किसी अन्य डीएनए के समावेश की आवश्यकता नहीं होती। इसके माध्यम से सीधे इन विशिष्ट जीनों या नियामक तत्वों का हेरफेर किया जा सकता है, जो पौधों की तनाव प्रतिक्रिया में भूमिका निभाते हैं। यह सटीकता अनपेक्षित प्रभावों को कम करती है और उन्नत फसल किस्मों के विकास को तेज करती है।"

जीनोम संपादन तकनीक में, CRISPR-Cas 9 अग्रणी उपकरण के रूप में उभरा है। इसके अतिरिक्त TALENs (ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर-लाइक इफेक्टर न्यूक्लिजेस) और ZFNs (जिंक फिंगर न्यूक्लिजेस) जैसी प्रणालियां भी प्रभावी रूप में उपयोग में लाई जा रही हैं। इन उन्नत तकनीकों का सफल प्रयोग धान, गेहूं, मक्का, टमाटर और सोयाबीन सहित विभिन्न फसलों की एक विस्तृत श्रृंखला में किया जा चुका है।

इन तकनीकों के माध्यम से नकारात्मक नियामकों को नियंत्रित करके, तनाव-उत्तरदायी जीन की अभिव्यक्ति को बढ़ाने तथा बेहतर तनाव सहिष्णुता के लिए लाभकारी जीनों को सम्मिलित करने के जैव प्रयास किये जा रहे हैं। पौधों के लक्षणों पर अधिक नियंत्रण प्रदान करने के साथ ही जीनोम संपादन मल्टीप्लेक्स जीन संपादन की संभावना भी प्रदान करता है। इसमें एक साथ कई जीनों का संशोधन संभव है।

जीनोम संपादन न केवल अजैविक तनाव सहिष्णुता को बढ़ाने में सहायक है, बल्कि सतत कृषि में योगदान देने, रासायनिक आदानों पर निर्भरता को कम करने और पर्यावरणीय परिस्थितियों के प्रति फसलों को अनुकूलन बनाने में योगदान देता है। हाल के अध्ययनों ने सूखा, लवणता, गर्मी और ठंड जैसे विभिन्न अजैविक तनावों के प्रति फसल की सहनशीलता को बढ़ाने में CRISPR-Cas9 की क्षमता को उजागर किया है। इसके अलावा, जीनोम संपादन तकनीकों में हाल की प्रगतियां जैसे बेस संपादन और प्राइम संपादन, फसल सुधार के लिए और भी अधिक सटीक और कुशल तकनीक प्रदान करती हैं।

जीनोम संपादन प्रौद्योगिकियों में उन्नति

जीनोम संपादन में प्रगति ने कृषि जैव प्रौद्योगिकी को नई दिशा दी है, विशेष रूप से सूखा, लवणता और अत्यधिक तापमान जैसे अजैविक तनावों से फसलों की प्रतिरोधक क्षमता को बढ़ाने में। प्रारंभिक विधियां, जैसे विकिरण या रसायनों का उपयोग करके यादृच्छिक उत्परिवर्तन, विविधता उत्पन्न करने में सहायक रही, परंतु इनमें सटीकता का अभाव था।

वर्ष 1980 के दशक में ट्रांसजेनिक प्रौद्योगिकियों की शुरुआत ने विशिष्ट जीनों के स्थानांतरण को सक्षम किया। इससे बीटी कपास जैसी आनुवंशिक रूप से संशोधित फसलें उत्पन्न हुईं, हालांकि सार्वजनिक क्षमता और नियामक प्रतिबंधों ने इनके व्यापक अंगीकरण को सीमित कर दिया।

एक प्रमुख बदलाव पहली पीढ़ी के जीनोम संपादन तकनीकों-ZFNs और TALENs से आया। इन तकनीकों ने लक्षित डीएनए संशोधन संभव बनाएं, लेकिन इनकी जटिलता एवं उच्च लागत प्रमुख चुनौतियां रहीं। वास्तविक सफलता वर्ष 2012 में CRISPR-Cas 9 के विकास से मिली। आरएनए द्वारा निर्देशित एक सरल, सटीक और स्केलेबल समाधान प्रस्तुत किया। इसके पश्चात Cas 12a, बेस एडिटर्स और प्राइम एडिटिंग जैसे नवीन उपकरणों ने डीएनए को काटने, या यहां तक कि आरएनए को संपादित किए बिना फाइन-ट्यून किए गए जीन परिवर्तनों को शामिल करने के लिए क्षमताओं का विस्तार किया है।

हाल के नवाचारों में एपिजेनोम संपादन, आरएनए संपादन, सिंथेटिक जीव विज्ञान

भाकृअनुप-केंद्रीय मृदा लवणता अनुसंधान संस्थान, करनाल

एकीकरण और मल्टीप्लेक्स संपादन शामिल हैं। ये अत्याधुनिक उपकरण जटिल विशेषता के सुधार के लिए कई जीनों के एक साथ संशोधन को सक्षम करते हैं। इसके साथ में, ये उपकरण सटीक कृषि की ओर एक बदलाव को चिन्हित करते हैं। इसमें जलवायु चुनौतियों का सामना करने में फसल के प्रदर्शन और वैश्विक खाद्य सुरक्षा को स्थायी रूप से बढ़ावा देने की क्षमता है।

जीनोम-संपादन एंजाइमों के प्रकार

जीनोम-संपादन एंजाइमों को दो मुख्य प्रकारों में वर्गीकृत किया जा सकता है:

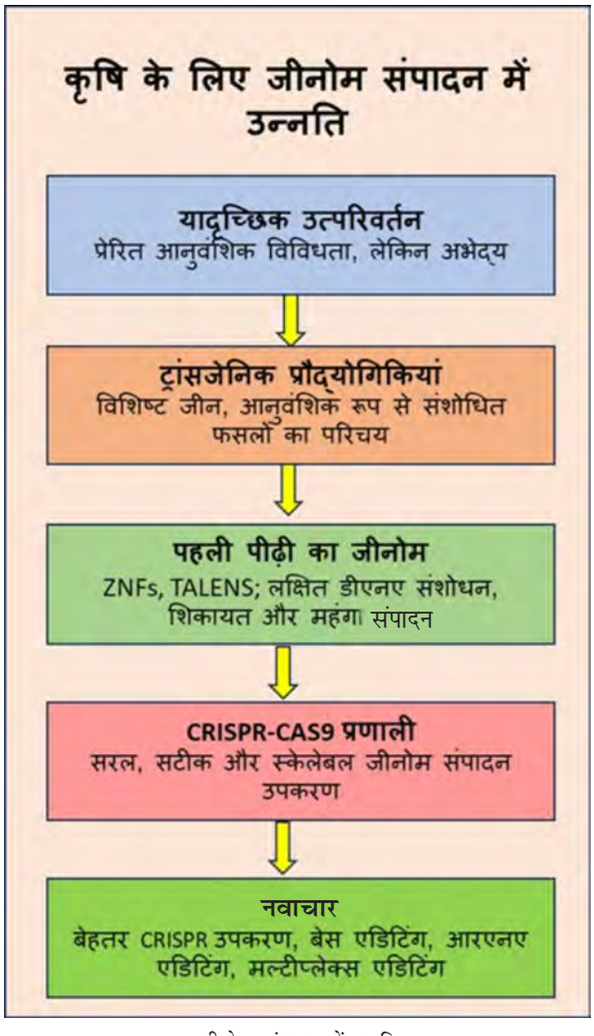
- स्थान-विशिष्ट पुनर्संयोजन (एसएसआर)
- स्थान-विशिष्ट न्यूक्लियस (एसएस एनएस)

स्थान-विशिष्ट न्यूक्लियस के प्रकार

स्थान-विशिष्ट न्यूक्लियस चार प्रकार के होते हैं-1-मेगान्यूक्लियस 2-जिंक फिंगर न्यूक्लियस (ZFNs) 3) ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर जैसे प्रभावक न्यूक्लियस (TALENs) 4: CRISPR-Cas 9।

मेगान्यूक्लियस

यह एंडोन्यूक्लियस का एक दुर्लभ वर्ग



जीनोम संपादन में प्रगति



जीनोम संपादन के लिए धान के बीज का उत्तक संवर्धन के लिए संरोपण

है। यह 14 से 30 या उससे भी अधिक बेस युग्म लंबे डीएनए अनुक्रमों को पहचानकर इन्हें क्लीव करता है। इनकी उच्च विशिष्टता इन्हें जीन संपादन में एक सशक्त उपकरण बनाती है। खमीर और बैक्टीरियोफेज जैसे माइक्रोबियल स्रोतों से उत्पन्न, मेगान्यूक्लियस स्वाभाविक रूप से इंट्रॉन और इंटिन गतिशीलता में संलग्न रहते हैं। जीन संपादन में, मेगान्यूक्लियस विशिष्ट जीनोमिक स्थानों पर डबल-स्ट्रैंड ब्रेक (डीएसबी) को उत्पन्न करते हैं, जिनकी मरम्मत कोशिका के तंत्र (एनएचइजे या एचडीआर) द्वारा की जाती है। इससे जीन व्यवधान या सटीक अनुक्रम सम्मिलन होता है। मेगान्यूक्लियस की असाधारण लक्ष्य विशिष्टता ऑफ-टारगेट प्रभावों को कम करती है, लेकिन प्रत्येक लक्ष्य के लिए नए एंजाइम पुन: तैयार करना जटिल और समय साध्य वाला है।

जिंक फिंगर न्यूक्लियस

यह एक उन्नत अभियांत्रिकी जीन-संपादन तकनीक है। इसमें FokI एंडोन्यूक्लियस के कटिंग डोमेन के साथ डीएनए-बाइंडिंग जिंक फिंगर प्रोटीन को जोड़ते हैं। प्रत्येक जिंक फिंगर डोमेन एक विशिष्ट तीन-बेस युग्म वाले डीएनए अनुक्रम को पहचानता है और कई डोमेन लंबे अनुक्रमों को लक्षित कर सकते हैं।

जब दो ZFNs कॉन्स्ट्रक्ट लक्ष्य स्थल पर डीएनए स्ट्रैंड के विपरीत जुड़ते हैं, तो FokI डोमेन डिमराइज हो जाते हैं। इससे डबल-स्ट्रैंड ब्रेक (डीएसबी) बनता है। यह कोशिका की मरम्मत प्रणालियों को सक्रिय करता है। इससे जीन व्यवधान या सटीक अनुक्रम संशोधन संभव हो जाता है।

ZFNs, पहले प्रोग्राम करने योग्य न्यूक्लियस में से एक है। इनका उपयोग विभिन्न फसलों में सफलतापूर्वक किया गया है जैसे-मक्का में शाकनाशी सहिष्णुता और सोयाबीन में तेल की गुणवत्ता में सुधार के लिए। इनकी उच्च विशिष्टता सफलतापूर्वक जिंक फिंगर डामेन के माध्यम से प्राप्त होती है, जो इन्हें शक्तिशाली बनाती है। हालांकि, नए लक्ष्यों के लिए प्रभावी जेडएफएन विकसित करना श्रम-गहन है और इसके लिए उन्नत प्रोटीन इंजीनियरिंग विशेषज्ञता की आवश्यकता होती है।

ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर जैसे प्रभावकारी न्यूक्लियस

ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर-लाइफ इफिक्टर न्यूक्लियस (TALENs) दो मुख्य भागों से बनी योग्य जीन-संपादन तकनीक है: ट्रांसक्रिप्शन एक्टिवेटर-जैसे प्रभावकों (TALNEs) से प्राप्त एक डीएनए-बाइंडिंग डोमेन और एक FokI न्यूक्लियस डोमेन जो डीएनए को काटता है। प्रत्येक टेल रिपीट एक विशेष न्यूक्लियोटाइड से जुड़ता है। इससे शोधकर्ताओं को TALENs डिजाइन करने की सुविधा मिलती है, जो उच्च परिशुद्धता के साथ लगभग किसी भी डीएनए अनुक्रम को लक्षित कर सके।

कार्य करने के लिए, दो TALENs लक्ष्य स्थल के फ्लैकिंग डीएनए की विपरीत धाराओं से जुड़ते हैं। इसके बाद FokI डोमेन डाइभर बताकर उस स्थान पर डबल-स्ट्रैंड ब्रेक

सारणी: पौधों में स्थान-विशिष्ट पुनर्संयोजन और स्थान-विशिष्ट न्यूक्लियस की तुलना

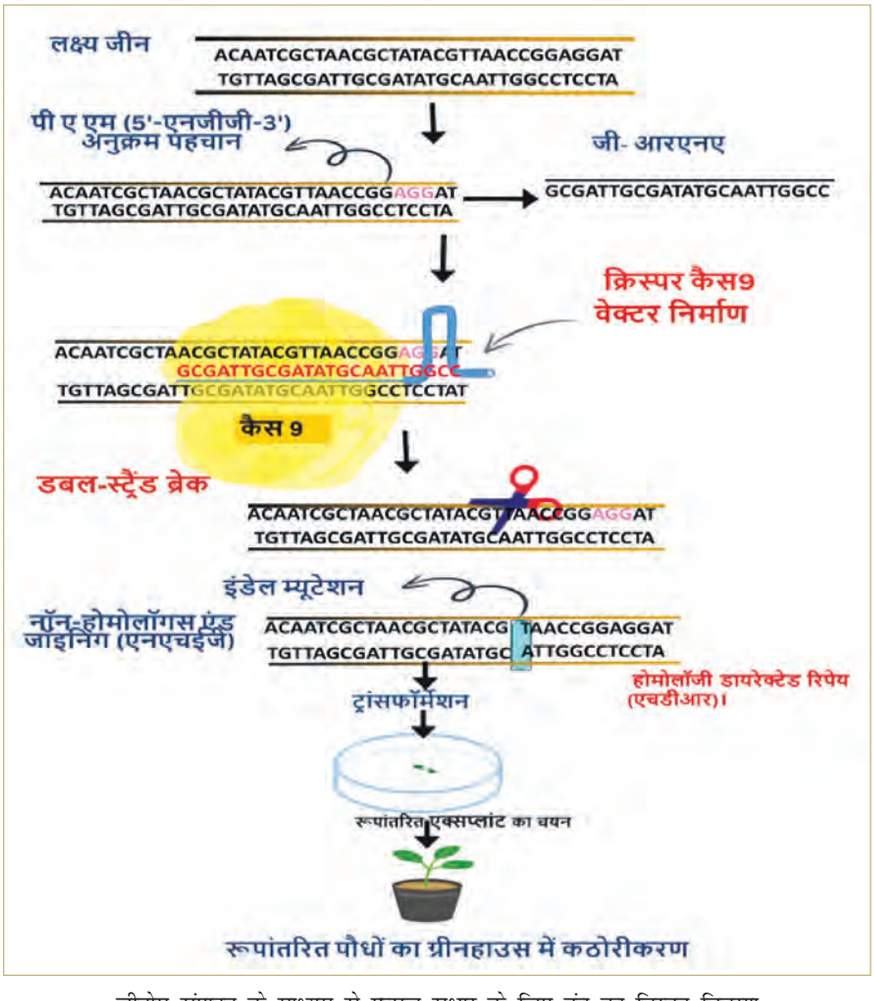
सुविधाएं	स्थान-विशिष्ट पुनर्संयोजन	स्थान-विशिष्ट न्यूक्लियस
परिभाषा	एंजाइम जो विशिष्ट डीएनए अनुक्रमों के बीच पुनर्संयोजन को उत्प्रेरित करते हैं (बिना डीएनए कट के)	एंजाइम जो विशिष्ट डीएनए अनुक्रमों पर डबल-स्ट्रैंड उत्पन्न करते हैं
क्रियाविधि	डीएनए पुनर्व्यवस्था: छांटना, एकीकरण, उलटना	मरम्मत के बाद डीएनए दरार (NHEJ या HDR)
डीएनए कट	नहीं, ब्रेक के बिना पुनर्संयोजन	हां, डबल-स्ट्रैंड ब्रेक (DSB) को प्रेरित करता है
संपादन क्रिया	प्रत्यक्ष पुनर्संयोजन	डीएनए मरम्मत की आवश्यकता है (NHEJ या HDR)
लक्ष्य स्थान	क्रे/लॉक्सपी, एफएलपी/एफआरटी, आर/आरएस	ZFNs, TALENs, CRISPR-Cas9, CRISPR-Cas12a
सुनिश्चितता स्थान	केवल विशिष्ट पुनर्संयोजन स्थान	कस्टम-डिजाइन किए गए डीएनए अनुक्रम (कोई भी अनुक्रम है)
यथार्थता	बहुत अधिक (केवल परिभाषित स्थानों को पुन: संयोजित करता है)	उच्च, लेकिन ऑफ-टारगेट प्रभाव हो सकते हैं
पौधों में उपयोग	मार्कर जीन हटाने, ट्रांसजीन स्टैकिंग, प्रतिवर्ती जीन अभिव्यक्ति	जीन नॉकआउट, जीन प्रतिस्थापन, आधार संपादन, विशेषता सुधार
पौधों में वितरण	पुन: संयोजक जीन को पेश करने के लिए परिवर्तन विधियों (जैसे, एग्रोबैक्टीरियम या कण बमबारी) की आवश्यकता होती है	प्लास्मिड, एग्रोबैक्टीरियम, आरएनपी या वायरस-आधारित वैक्टर के माध्यम से वितरित; कुछ संपादन डीएनए-मुक्त (ट्रांसजीन-मुक्त) हो सकते हैं
प्रतिरोधक क्षमता	उच्च (यदि स्थल पहले से सम्मिलित हैं)	चर (डिजाइन, वितरण और मरम्मत मार्ग पर निर्भर करता है)
उपयोग	जीन कैसेट छांटना, सशर्त अभिव्यक्ति, ट्रांसजीन स्थिरीकरण	विशेषता संशोधन, जीनोम संपादन, लक्षित उत्परिवर्तन

(DSB) सेल इस ब्रेक को गैर-होमोलॉगस एंड जॉइनिंग (एनएचईजे) के माध्यम से मरम्मत करता है, जो जीन को बाधित कर सकता है, या होमोलॉजी-डायरेक्टेड रिपेयर (एचडीआर), जो सटीक आनुवंशिक परिवर्तनों की अनुमति देता है।

TALENs अपनी सटीकता और बहुमुखी प्रतिभा के लिए प्रसिद्ध है, पहले की तकनीकों की तुलना में कम ऑफ-टारगेट प्रभाव उत्पन्न करते हैं। तथापि, जीन संपादन का टैलेंस तंत्र महंगा, श्रम गहन और समय लेने वाला है।

CRISPR-Cas 9

यह एक जीन-संपादन तकनीक है, जो वैज्ञानिकों को जीवित जीवों के डीएनए में सटीक लक्षित परिवर्तन करने की सुविधा प्रदान करती है। CRISPR शब्द क्लस्टर्ड रेगुलरली इंटरस्पेस्ड शॉर्ट पैलिंड्रोमिक रिपीट्स के लिए है, जो बैक्टीरिया और आर्किया के जीनोम में पाए जाने वाले विशिष्ट अनुक्रम हैं। ये अनुक्रम एक संक्रमण के दौरान वायरल डीएनए की पहचान करने और काटने के लिए सूक्ष्मजीवों द्वारा उपयोग किए जाने वाले प्राकृतिक रक्षा तंत्र का हिस्सा हैं।



जीनोम संपादन के माध्यम से फसल सुधार के लिए तंत्र का विस्तृत विवरण

Cas 9 प्रोटीन (CRISPR से जुड़े प्रोटीन 9 के लिए छोटा) एक एंडोन्यूक्लिज एंजाइम है, जो आणविक कैंची के रूप में कार्य करता है। यह एक विशेष गाइड आरएनए (जीआरएनए) की मदद से लक्षित डीएनए अनुक्रम की पहचान करता है और वहां डबल-स्ट्रेड ब्रेक उत्पन्न करता है। इसके बाद कोशिका की मरम्मत प्रणाली सक्रिय होती है, आमतौर पर गैर-समरूप अंत में शामिल होने (एनएचईजे) या होमोलॉजी-डायरेक्टेड रिपेयर (एचडीआर)।

यह प्रोग्राम करने योग्य प्रणाली जीन के सटीक संपादन को सक्षम बनाती है। CRISPR-Cas 9 का व्यापक उपयोग अनुसंधान, चिकित्सा और कृषि जैव प्रौद्योगिकी में किया जा रहा है। जिंक फिंगर न्यूक्लियस (ZFNs) और TALENs जैसे पहले के उपकरणों की तुलना में इसकी दक्षता, सादगी और बहुमुखी प्रतिभा के कारण, कई जेनेटिक इंजीनियरिंग कार्यों के लिए पसंद की विधि बन गया है। इस खोज के महत्व को वर्ष 2020 में पहचाना गया जब डौडना और चारपेंटियर को रसायन विज्ञान

में नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया, जो जेनेटिक इंजीनियरिंग के इतिहास में एक मील का पत्थर है।

पौधों में तंत्र

CRISPR-Cas 9 अपने पशु समकक्ष के समान एक प्रणाली है, जो आरएनए मार्गदर्शन का उपयोग करके पौधों में सटीक जीनोम संपादन को संभव बनाती है। गाइड आरएनए पौधे के जीनोम में एक विशिष्ट लक्ष्य स्थल से मेल खाती है, Cas 9 प्रोटीन को निर्देशित करता है, स्ट्रेप्टोकोकस पायोजेनेस से एक एंडोन्यूक्लिज, इच्छित स्थान पर एक बार बाध्य होने के बाद, Cas9 लक्षित स्थल पर एक डबल-स्ट्रैंड ब्रेक (डीएसबी) को प्रेरित करता है।

पादप कोशिकाएं अपनी डीएनए मरम्मत मशीनरी को सक्रिय करती हैं, गैर-समरूप अंत में शामिल होने (एनएचईजे) या होमोलॉजी-निर्देशित मरम्मत (एचडीआर) को नियोजित करती हैं। एनएचइजे छोटे सम्मिलन या विलोपन (इंडल्स) का परिचय देता है। संभावित रूप से जीन फंक्शन को बाधित करता है, जबकि एचडीआर विशिष्ट डीएनए अनुक्रमों को पेश कर सकता है यदि एक मरम्मत टेम्पलेट प्रदान किया जाए। इससे अधिक सटीक जीन सम्मिलन या प्रतिस्थापन सक्षम होता है।

पौधों में प्रमुख अनुप्रयोग

फसल उपज वृद्धि: CRISPR-Cas9 अनाज के आकार को सीमित करने और फलों के आकार में सुधार करने वाले जीन को अक्षम करके फसल की उपज बढ़ाता है।

रोग प्रतिरोध: CRISPR-Cas9 संवेदनशीलता जीन को संपादित करके फसलों में रोग प्रतिरोध प्रदान करता है। उदाहरण स्वरूप यह तकनीक खस्ता फफूंदी और कसावा ब्राउन स्ट्रीक वायरस जैसे रोगों के विरूद्ध प्रतिरोधिता प्रदान करती है।

तनाव सहिष्णुता और पोषण: CRISPR-Cas9 फसलों में अजैविक तनाव सहिष्णुता को बढ़ाने में सहायक है। इसके साथ ही तनाव-प्रतिक्रिया नियामकों और चयापचय मार्गों को संपादित कर फसलों की गुणवत्ता सामग्री में सुधार भी करता है।

पौधों में CRISPR अनुप्रयोगों की चुनौतियां

- **वितरण क्षमता:** पशु कोशिकाओं के विपरीत, पौधों की कोशिकाओं में कठोर कोशिका भित्ति होती हैं। इससे जीन वितरण अधिक कठिन हो जाता है।
- **नियामक बाधाएं:** कई देशों में जीनोम-संपादित फसलों के संबंध में जटिल नियम हैं। कुछ देश जीएमओ के समान CRISPR-संशोधित फसलों को विनियमित करते हैं।
- **ऑफ-टारगेट प्रभाव:** हालांकि दुर्लभ, अनपेक्षित उत्परिवर्तन एक चिंता का विषय है, खासकर पॉलीप्लॉइड प्रजातियों में।

पौधों की कोशिकाओं में CRISPR-Cas 9 घटकों की डिलीवरी एक विशेष चुनौती है। एग्रोबैक्टीरियम ट्यूमेफेशियन्स मध्यस्थता परिवर्तन आमतौर पर डाइकोटाइलडोनस पौधों में उपयोग किया जाता है, जबकि बायोलिस्टिक डिलीवरी या जीन गन विधि का उपयोग मोनोकॉट्स और पुनर्गणना प्रजातियों में किया जाता है। वितरण विधि का चयन पौधे की प्रजातियों, लक्षित ऊतक और वांछित परिणाम पर निर्भर करता है। इस प्रकार CRISPR-Cas 9 पौधों की आनुवंशिक अभियांत्रिकी, पादप जीव विज्ञान और फसल सुधार में एक शक्तिशाली और सटीक उपकरण हो रहा है।

भावी परिदृश्य

जीनोम संपादन में प्रगति, जैसे CRISPR-Cas 12a, बेस एडिटिंग और प्राइम एडिटिंग, प्लांट जीनोम इंजीनियरिंग में सटीकता और दक्षता में काफी सुधार करती है। 12a के विपरीत, ये नए उपकरण डीएसबी के बिना सटीक जीन संशोधनों को सक्षम करते हैं। इससे ऑफ-टारगेट प्रभाव और अनपेक्षित उत्परिवर्तन का जोखिम कम हो जाता है।

CRISPR-Cas 12a में एक अद्वितीय PAM मान्यता और कंपित कटौती प्रदान करता है, जो इसे दुर्गम जीनोमिक क्षेत्रों और उच्च विशिष्टता के साथ मल्टीप्लेक्स संपादन को लक्षित करने के लिए उपयुक्त बनाती है।

बेस एडिटिंग सीधे एक डीएनए बेस को दूसरे में परिवर्तित करती है, सिंगल-न्यूक्लियोटाइड बहुरूपताओं को सुधारा जा सकता है या सूक्ष्म विविधताओं को पेश करता है।

प्राइम एडिटिंग, जिसे अक्सर 'सर्च-एंड-रिप्लेस' टूल कहा जाता है। एक रिवर्स ट्रांसक्रिपटेस के साथ एक उत्प्रेरक रूप से निष्क्रीय cas9 को जोड़ती है, यह विधि बिना डोनर टेम्प्लेट या DSB के बिना सटीक सम्मिलन, विलोपन और प्रतिस्थापन संभव बनाती है।

इन तकनीकों को उच्च-थ्रूपुट फेनोटाइपिंग, कृत्रिम बुद्धिमत्ता और एपिजेनोम संपादन के साथ एकीकृत करने से जलवायु-स्मार्ट और संसाधन-कुशल फसलें विकसित की जा सकती हैं। इससे प्रजनकों को नाइट्रोजन-उपयोग दक्षता, बेहतर प्रकाश संश्लेषण और अजैविक तनाव सहिष्णुता जैसे लक्षणों को लक्षित करने में मदद मिलेगी। इसके साथ ही वितरण प्रणालियों में नवाचार, जैसे नैनोकैरियर या डीएनए मुक्त जीनोम संपादन, आनुवंशिक रूप से संशोधित जीवों (जीएमओ) से संबंधित नियामक चुनौतियों और सार्वजनिक चिंताओं का समाधान कर सकते हैं।

CRISPR-Cas 9 एक सटीक, लागत-प्रभावी और अनुकूलनीय जीनोम संपादन मंच प्रदान करके पौधों की आनुवंशिकी में महत्वपूर्ण बदलाव किया है। विभिन्न पौधों की प्रजातियों में इसके सफल कार्यान्वयन ने वैश्विक कृषि चुनौतियों का समाधान करने के लिए नए अवसर उत्पन्न किए हैं।

जलवायु परिवर्तन, मृदा जैसे घटक क्षरण, सीमित कृषि योग्य भूमि और जनसंख्या वृद्धि के रूप में प्रस्तुत करते हैं। ऐसे में जीनोम संपादन उपकरण फसल लचीलापन, उपज और पोषण की गुणवत्ता बढ़ाने के लिए एक रणनीतिक समाधान प्रदान करते हैं।

अगली पीढ़ी के जीन संपादन उपकरण जैसे Cas 12a, बेस एडिटर और प्राइम एडिटर अधिक परिष्कृत, सुरक्षित और अनुमानित जीनोम संशोधन उपलब्ध करवाते हैं। ये टिकाऊ और अनुकूल फसलें विकसित करने का मार्ग प्रशस्त करते हैं जो कृषि में रासायनिक निर्भरता को कम करते हैं और बदलती जलवायु में खाद्य सुरक्षा में सुधार करते हैं। हालांकि, इन शक्तिशाली उपकरणों के जिम्मेदार और न्याय संगत उपयोग के लिए अंत:विषय अनुसंधान, मजबूत जैव सुरक्षा ढांचे और पारदर्शी सार्वजनिक जुड़ाव की आवश्यकता है। ■