

· 技术方法 ·

# 新疆春小麦品种加代模式和遗传转化效率探究

邱四春, 康禧, 张舒琪, 孙羽晨, 刘世岩, 张跃强, 史雪\*, 许盛宝\*

西北农林科技大学, 杨凌 712100

**摘要** 全球气候变化和耕地退化对小麦(*Triticum aestivum*)育种效率提出了新的挑战, 传统育种周期长、效率低, 难以满足日益增长的粮食需求。新疆作为我国优质小麦生产区, 亟待建立适合当地小麦品种的快速加代体系和高效遗传转化平台, 以缩短育种周期并拓宽转基因受体材料的选择范围。以新疆主栽小麦品种新春9号、新春37、新春44和核春137为研究材料, 以小麦品种Fielder为对照, 通过优化温室环境参数和培养条件建立了快速加代模式, 并系统评估了这些小麦品种的幼胚遗传转化效率。快速加代实验结果表明, 与常规温室条件相比, 人工气候室快速加代条件下, 5个品种的生育期均明显缩短, 其中新春37由92天缩短至59天, 差异最显著。农杆菌介导的幼胚遗传转化比较实验结果表明, 新春37的转化效率(23.30%)优于其它3个品种, 但低于对照品种Fielder (27.95%)。而新春9号、新春44和核春137也表现出一定程度的转化效率。综上, 该研究建立了新疆主栽小麦品种快速加代技术体系, 并评价了不同受体的遗传转化效率, 为新疆地区小麦种质创新提供了关键技术支撑。

**关键词** 小麦, 新疆地区, 快速加代, 遗传转化

邱四春, 康禧, 张舒琪, 孙羽晨, 刘世岩, 张跃强, 史雪, 许盛宝 (2026). 新疆春小麦品种加代模式和遗传转化效率探究. 植物学报 61, 291–299.

小麦(*Triticum aestivum*)是全球三大主粮之一, 在气候变化和耕地退化压力下, 传统育种技术已不能满足小麦产量增长的需求(Ghosh et al., 2018)。近年来, 加代技术和遗传转化技术的创新发展, 为小麦育种效率提升与基因功能解析奠定了坚实的基础。缩短育种周期与建立转基因体系是种质资源创制的必要基础(苟升学等, 2010)。然而, 新疆春小麦仍缺乏成熟的快速加代技术和高效遗传转化体系, 制约当地种质资源的创新和品种改良。

快速加代是转基因的重要基础。小麦在自然条件下的生育周期较长, 导致传统育种方法存在品种选育周期长和效率低等局限性(张永鹏和魏迎春, 2024)。为了突破该局限性, 近年来发展起来的“快速育种”(speed breeding, SB)技术通过延长光照、调控温度以及提前采收种子等综合技术措施, 可将小麦育种代次由1年1代提高到1年6代(Watson et al., 2018;

Hickey et al., 2019)。快速育种技术通过精准调控环境因子和创新栽培技术, 显著提高了作物世代周期效率, 但该技术在新疆春小麦中的适用性仍需进一步验证和探索。农杆菌介导的遗传转化加速了功能基因研究和定向改良(Guo et al., 2021; Li et al., 2022; Lin et al., 2022), 但受基因型影响(Hollingworth et al., 2003; Chen et al., 2022)。研究表明, 不同基因型小麦在细胞结构、代谢水平以及基因表达调控等方面的差异会显著影响外源基因的转化效率(李明浩等, 2010)。新疆春小麦遗传转化研究较少, 且转化效率低。现有报道中转化效率最高的是新春9号, 仅达13.3%, 仍明显低于遗传转化的模式作物Fielder (Wang et al., 2017)。本研究以新春9号、新春37、新春44、核春137及Fielder为实验材料, 比较研究不同新疆小麦品种幼胚转化效率, 构建适合新疆春小麦的快速加代模式, 为提升其育种效率、加快新种质创制提供技术支撑。

收稿日期: 2025-05-06; 接受日期: 2025-07-01

基金项目: 小麦种业创新工程(No.K3031222159)

\* 通讯作者。E-mail: shixue@nwfau.edu.cn; xushb@nwfau.edu.cn

## 1 实验材料

本研究所用小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为新春9号、新春37、新春44、核春137以及Fielder。农杆菌菌株为根癌农杆菌AGL1。

## 2 实验方法

### 2.1 加代培养条件

本研究采用人工气候室和温室进行小麦栽培实验,人工气候室为快速加代培养条件设置,温室为对照环境。

人工气候室设置3个植物培养架,每个培养架分为2层,种植总面积为4.2 m<sup>2</sup>,可栽种1 080株小麦,种植密度为257.14株·m<sup>-2</sup>。每层植物培养架高度为90 cm,每层顶部安装4组飞利浦(Philips)植物全光谱顶光模组。环境控制系统设置参数:光周期为22小时光照/2小时黑暗,昼夜温度22°C/17°C,相对湿度稳定维持在60%±5%。

温室设置1层植物培养架,可种植面积为2.592 m<sup>2</sup>,可栽种240株小麦,种植密度为92.59株·m<sup>-2</sup>。培养架高度为120 cm,安装6根LED白灯(16 W)和2根LED植物生长灯(18 W)。环境控制系统设置参数:光周期为16小时光照/8小时黑暗,昼夜温度22°C/17°C,相对湿度稳定维持在50%±5%。

### 2.2 种子消毒与萌发

选取大小一致、籽粒饱满的小麦种子,经消毒处理后进行萌发诱导。(1)在灭菌水中浸泡8小时;(2)用60% NaClO消毒15分钟,用灭菌水润洗干净,然后置于灭菌水浸湿的滤纸上,4°C放置2天;(3)将露白的种子在人工气候培养箱(光周期为16小时光照/8小时黑暗,温度为22°C/17°C,光强为157 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,相对湿度为50%)中培养1天,此时胚芽及初生根伸出;(4)将萌发的种子播种在营养土:蛭石=3:1(v/v)的花盆中,分别置于人工气候室和温室中培养。

### 2.3 种植管理措施

人工气候室栽种小麦使用1 g·L<sup>-1</sup>尿素(CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O)混合营养土和蛭石,在分蘖期和灌浆期配置营养液灌根,浇灌用量为每盆2 L,每2周浇灌1次营养液,孕穗期

追加1 g·L<sup>-1</sup>花多多,开花后20天左右停止浇水,以加速小麦成熟。

本研究所用营养液成分参考Acher等(1997)公开发表的配方。温室栽种对照组小麦使用自来水混合营养土和蛭石培养,持续浇水至小麦成熟。

### 2.4 培养基成分

本研究所用培养基成分均来自Hayta等(2019)公开发表的配方,并根据实验目的进行适当调整。

### 2.5 幼胚剥离和农杆菌侵染

转化前一天,在10 mL MG液体培养基中加入200 μL农杆菌保存液,于28°C、200 r·min<sup>-1</sup>培养14–16小时,使OD<sub>600</sub>≈0.5;随后于室温、4 025 ×g离心10分钟,倒掉上清,菌体继续用小麦接种培养基(wheat inoculation medium, WIM)稀释至OD<sub>600</sub>≈0.5,于室温、80 r·min<sup>-1</sup>培养4小时。

取开花后14天的麦穗,取出穗粒,去掉外稃,置于灭菌瓶中,在超净工作台上进行消毒处理。在1.5 mL离心管中添加1 mL WIM,取出幼胚放入离心管中。取胚结束后,加入1 mL活化后的菌液,反复倒管20秒,静置20分钟,将幼胚盾片朝上排列于小麦共培养培养基(wheat co-cultivation medium, WCM)上,24°C暗培养3天。

### 2.6 抗性愈伤组织诱导和愈伤组织分化

用消毒过的不锈钢尖头镊子切除幼胚胚轴,置于愈伤组织诱导培养基(wheat callus induction, WCI)上,24°C暗培养5天,此时可明显观察到愈伤组织出现。

在添加15 mg·L<sup>-1</sup> Hygromycin的WCI中筛选抗性愈伤组织,24°C暗培养14天,相同条件继代1次。再转移到16小时光照/8小时黑暗、24°C、光强为69 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、相对湿度为60%的环境下培养7天,此时可观察到再生芽萌出。随后更换至小麦再生培养基(wheat regeneration medium, WRM)上,于16小时光照/8小时黑暗、22°C、光强为157 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、相对湿度为60%的环境下培养14天,继代1次。

### 2.7 生根与移栽

将1–2 cm长的再生芽移至生根培养基(rooting me-

dium, RT)中, 培养14天左右, 此时可观察到有侧根萌出, 将再生苗取出, 用清水冲洗干净, 移栽至营养土:蛭石=2:1 (v/v)的穴盘内, 加盖, 在16小时光照/8小时黑暗、22°C/17°C、光强为37  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、相对湿度为60%的环境下培养14天, 逐渐揭开盖子, 移栽至常规温室培养。

## 2.8 转基因阳性植株鉴定

取移栽到人工气候室的再生苗叶片1–2 cm, 用CTAB法提取叶片DNA, 在载体上设计合适引物, PCR反应后进行琼脂糖凝胶电泳和测序, 统计阳性植株率。

## 2.9 数据统计

本研究中, 愈伤组织诱导率、再生率及转化效率分别按照以下公式进行计算。

愈伤组织诱导率=(诱导愈伤组织数目/接种外植体总数) $\times 100\%$ ; 愈伤组织再生率=(再生苗数目/接种外植体总数) $\times 100\%$ ; 转化效率=(阳性苗数目/接种外植体总数) $\times 100\%$ 。

愈伤组织诱导率统计以形成明显增殖愈伤组织的幼胚数量为准; 在计算再生率时, 仅选用质地紧实、色泽鲜明的愈伤组织用于后续分化培养; 转化效率则依据目标基因的PCR扩增产物, 经琼脂糖凝胶电泳及测序验证阳性植株数进行评估。使用Graph-Pad Prism (V:10.1.2)进行数据分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同加代条件下新疆春小麦的性状比较

在距离地面55 cm处和灯下20 cm处测量光质量(表1)。较矮的植物架层高和密集的光源会使植物冠层处的光合光子通量密度(photosynthetic photon flux density, PPF)和照度大大增加, 在不损害小麦叶片的同时提供充足的光源, 使小麦快速生长。

研究发现, 在人工气候室快速加代条件下的小麦生长状况良好(图1A), 育性正常(图1B)。统计常规温室和快速加代条件下春小麦Fielder、新春9号、新春37、新春44和核春137的生长周期、穗长和有效分蘖(表2), 发现快速加代条件下所有材料的生长周期均

表1 不同环境灯下20 cm和地上55 cm的光质量

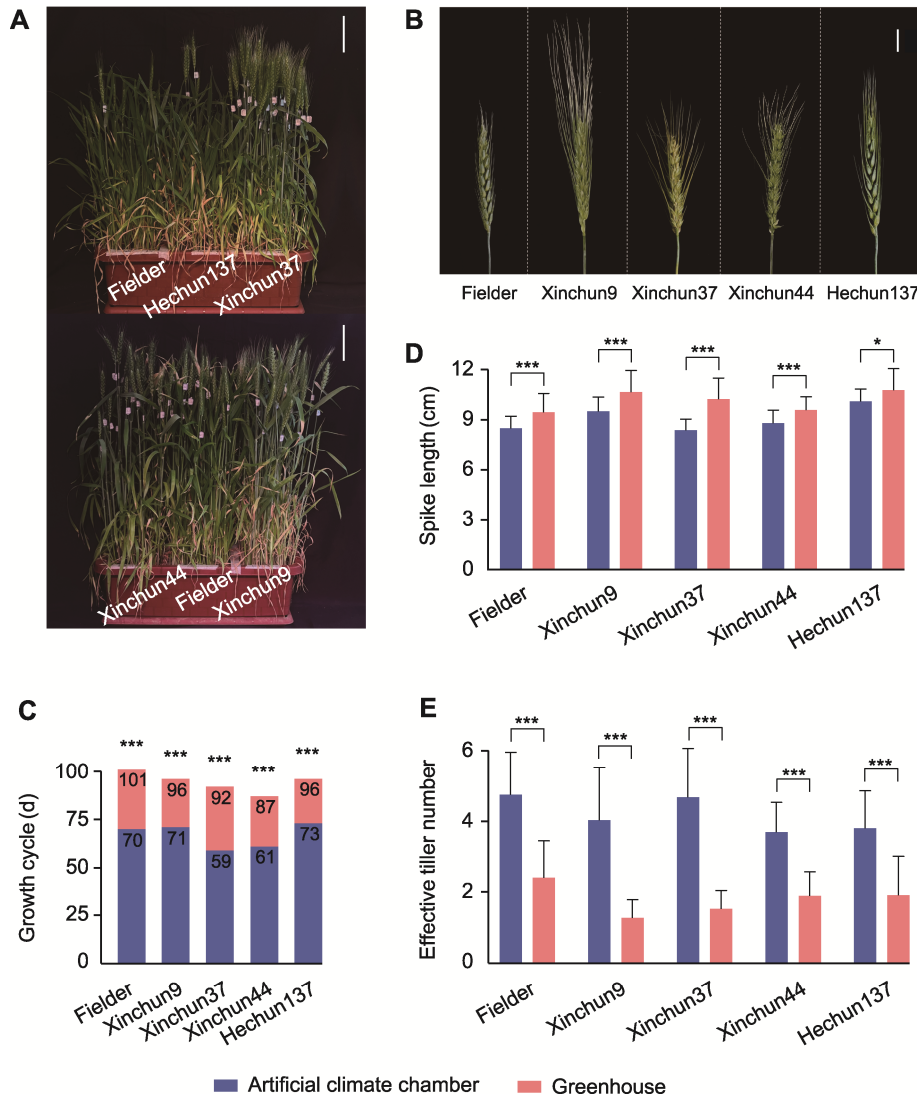
Table 1 Light quality at 20 cm and 55 cm above ground under different environmental lamps

Different environments	Photosynthetic photon flux density ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Illuminance Ev (lx)
Artificial climate chamber (20 cm below lamps)	1581.3	54217.3
Greenhouse (20 cm below lamps)	766.3	27588.0
Artificial climate chamber (55 cm above ground)	1351.3	47585.9
Greenhouse (55 cm above ground)	178.4	6521.0

显著缩短(图1C), 平均缩短27.6天, 呈新春37 (–33天)<Fielder (–31天)<新春44 (–26天)<新春9号(–25天)<核春137 (–23天)的缩短趋势。所有材料的穗长均有所缩短(图1D), 但有效分蘖数显著增加(图1E), 且表现出不同的增长幅度: 新春37 (+3.14)>新春9号(+2.76)>Fielder (+2.35)>核春137 (+1.9)>新春44 (+1.8)。本研究提出一种操作简单、占地面积小、成本低、速度快的加代模式, 新春37 (59天)和新春44 (61天)的加代速度可达到1年5–6代, 极大缩短了地方主栽春小麦品种的育种周期, 节约育种成本, 为种质资源创新和遗传研究提供良好的技术支撑。

### 3.2 新疆地区主栽小麦品种遗传转化效率比较

受体基因型显著影响小麦幼胚遗传转化效率, 本研究对新春9号、新春37、新春44、核春137和对照Fielder品种进行农杆菌介导的遗传转化, 统计转化效率关键指标, 包括抗性愈伤组织率、幼苗分化率和阳性植株率, 评估不同新疆主栽品种的遗传转化能力。结果表明, 5个供试品种均可诱导出胚性抗性愈伤组织(图2A)、再生芽(图2B)和根(图2C), 但遗传转化效率存在不同程度的差异(表3)。5个实验材料抗性愈伤组织诱导效率差异不大, 在94.06%–99.33%之间, 说明选取的幼胚质量较高且均一。再生芽的效率在5.45%–32.32%之间, 对照Fielder效率最高(32.32%), 新春37为25.45%, 其它3个品种低于15%。阳性植株检测结果仍然为Fielder最高(27.95%), 新春37次之(23.30%)。与小麦幼胚遗传转化的理想模式品种



**图1** 快速加代对不同新疆春小麦品种农艺性状的影响  
**(A)** 不同快速加代条件下新疆春小麦生育期表型(bars=10 cm); **(B)** 不同快速加代条件下新疆春小麦穗部性状(bar=2 cm); **(C)** 不同快速加代条件下新疆春小麦生育期; **(D)** 不同快速加代条件下新疆春小麦穗长统计; **(E)** 不同快速加代条件下新疆春小麦有效分蘖数统计。统计分析方法为ANOVA。\*表示显著差异( $P<0.05$ ), \*\*\*表示极其显著差异( $P<0.001$ )。

**Figure 1** The effects of speed breeding on agronomic traits of different Xinjiang spring wheat cultivars  
**(A)** Phenotypes of Xinjiang spring wheat different developmental stages under different speed-breeding conditions (bars=10 cm); **(B)** Spike traits of Xinjiang spring wheat under different speed-breeding conditions (bar=2 cm); **(C)** Life cycle length of Xinjiang spring wheat under different speed-breeding conditions; **(D)** Statistical analysis of spike length of Xinjiang spring wheat under different speed-breeding conditions; **(E)** Statistical analysis of effective tiller number of Xinjiang spring wheat under different speed-breeding conditions. The statistical analysis was performed using ANOVA. \* and \*\*\* indicate significant differences and highly significant differences at  $P<0.05$  and  $P<0.001$ , respectively.

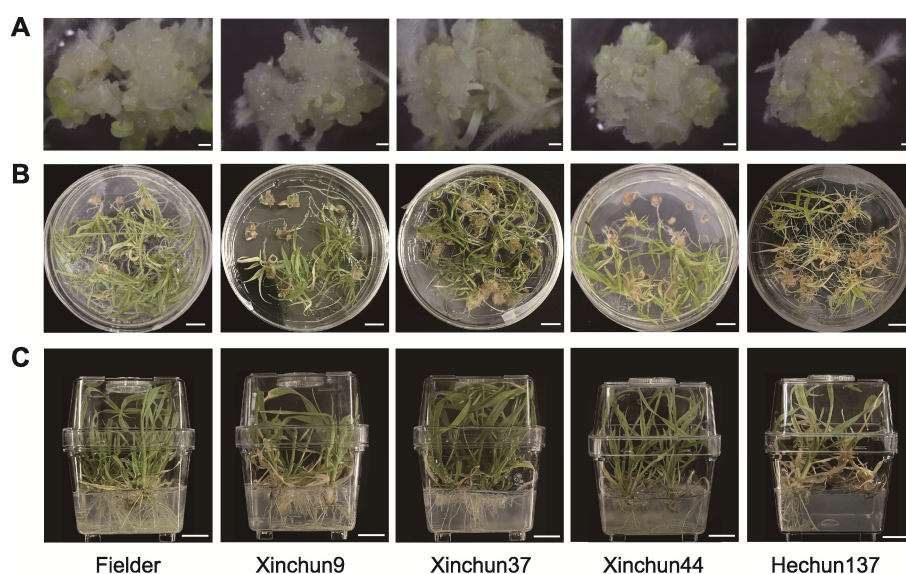
Fielder相比, 尽管新疆主栽春小麦品种新春37的转化效率略低, 但通过培养条件或转化体系的优化可进一步提升。因此, 新春37在小麦幼胚遗传转化上具有广阔的应用前景, 有望成为小麦分子育种的优良受体材料。

### 3.3 快速加代培养下新春37和新春44转化效率分析

对加代时间最短的新春37和新春44在快速加代条件下获得的幼胚进行农杆菌介导的转化效率探索, 进

**表2** 温室与人工气候室条件下小麦品种表型性状比较**Table 2** Comparison of phenotypic traits of wheat cultivars under greenhouse and artificial climate chamber conditions

Wheat cultivars	Environment	Growth cycle (d)	Effective tiller number	Spike length (cm)
Fielder	Greenhouse	101	2.39	9.43
	Artificial climate chamber	70	4.74	8.46
Xinchun9	Greenhouse	96	1.27	10.65
	Artificial climate chamber	71	4.03	9.48
Xinchun37	Greenhouse	92	1.53	10.21
	Artificial climate chamber	59	4.67	8.34
Xinchun44	Greenhouse	87	1.89	9.55
	Artificial climate chamber	59	4.67	8.34
Hechun137	Greenhouse	96	1.91	10.75
	Artificial climate chamber	73	3.81	10.07

**图2** 新疆地区主栽小麦品种的遗传转化

(A) 筛选后的愈伤组织(bars=1 mm); (B) 在分化培养基上培养14天的愈伤组织分化状态(bars=1 cm); (C) 在生根培养基中培养14天的再生植株(bars=2 cm)

**Figure 2** Genetic transformation of major wheat cultivars in Xinjiang region

(A) Callus after selection (bars=1 mm); (B) Differentiation status of calli on differentiation medium at 14 days (bars=1 cm); (C) Regenerated plantlets on rooting medium at 14 days (bars=2 cm)

**表3** 新疆地区主栽小麦品种的遗传转化关键指标**Table 3** Key metrics for genetic transformation of major wheat cultivars in Xinjiang region

Cultivars	Transformed embryos (number)	Calli (number)	Induction rate (%)	Regeneration rate (%)	Positive plants (number)	Transformation efficiency (%)
Fielder	297	295	99.33	32.32	83	27.95
Xinchun9	261	246	94.25	9.58	24	9.20
Xinchun37	299	287	95.99	25.45	65	23.30
Xinchun44	202	190	94.06	13.92	25	12.89
Hechun137	110	108	98.18	5.45	5	4.55

一步缩短转基因受体获得时间, 加快转化进程。与常规培养条件下的小麦幼胚相比, 快速加代的幼胚形态未发生变化(图3A, C, E, G), 但再生能力大幅降低(图3B, D, F, H)。新春37和新春44在快速加代和常规培养条件下仍表现出较高的愈伤组织诱导率(>94%), 但再生率和转化效率则显著降低(表4), 表明加代条件下幼胚快速发育导致其再生能力降低。

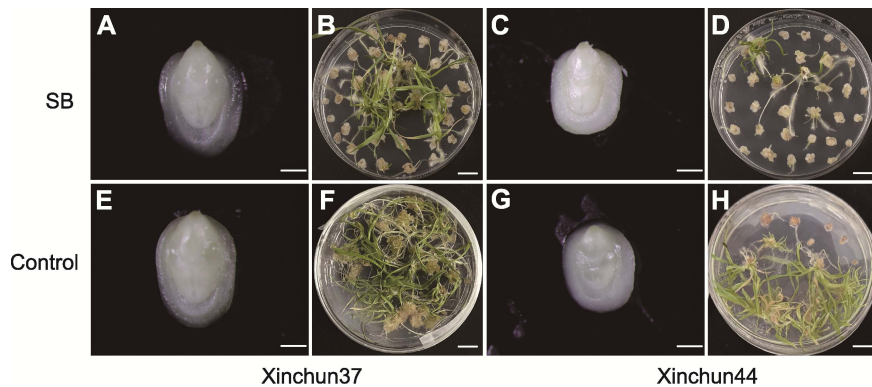
### 3.4 讨论

新疆地区春小麦品种发育速度快、不需要春化, 应用快速加代和遗传转化等新技术是充分挖掘当地种质潜力、提高小麦产量的重要手段。本研究构建了适用于新疆主栽小麦品种的快速加代体系, 并以转基因理想受体品种Fielder为对照, 系统评估了主栽小麦品种新春9号、新春37、新春44和核春137的遗传转化效率, 为新疆地区春小麦种质创新和育种改良提供了

技术支持。

本研究建立了新疆小麦人工气候室快速加代培养技术体系, 可实现每年5–6个世代的小麦繁殖速度, 能够将育种周期缩短至3–4年。这与国际上快速育种技术的发展趋势相符(Watson et al., 2018; Hickey et al., 2019)。研究发现, 人工气候室的PPFD达到 $1\ 351\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 充分体现了光环境在快速育种体系中的关键作用(Rai, 2022)。在该条件下, 新春37的生育期从常规温室的92天显著缩短至59天, 表现出极高的快速加代潜力。此外, 快速加代条件下小麦的有效分蘖数显著增加, 但穗长略有降低, 说明该技术在不明显影响小麦育性的情况下能够提高整体繁殖效率。

我国科研人员在对地方主栽品种进行遗传转化时发现, 很多农艺性状有很大优势的品种受其基因型限制转化效率很低, 甚至不能转化(蒋苏等, 2012; Wang et al., 2021)。在本研究的遗传转化体系下, 新春37



**图3** 小麦品种新春37、新春44快速加代(SB)和常规培养条件下的幼胚转化

(A)–(D) 快速加代下新春37、新春44侵染当天幼胚和分化培养基14天后的愈伤组织分化状态; (E)–(H) 常规培养条件下新春37、新春44侵染当天幼胚和分化培养基14天后的愈伤组织分化状态。(A), (C), (E), (G) Bars=500  $\mu\text{m}$ ; (B), (D), (F), (H) Bars=1 cm

**Figure 3** Genetic transformation of immature embryos in wheat cultivars Xinchun37 and Xinchun44 under speed breeding (SB) and conventional culture conditions

(A)–(D) Callus differentiation status of Xinchun37 and Xinchun44 embryos on the first day and at 14 days after infection under speed breeding conditions, respectively; (E)–(H) Callus differentiation status of Xinchun37 and Xinchun44 embryos on the first day and at 14 days after infection under conventional conditions, respectively. (A), (C), (E), (G) Bars=500  $\mu\text{m}$ ; (B), (D), (F), (H) Bars=1 cm

**表4** 小麦品种新春37、新春44快速加代和常规培养条件下遗传转化中的关键指标

**Table 4** Key indexes in the genetic transformation of wheat cultivars Xinchun 37 and Xinchun 44 under speed breeding and conventional culture conditions

Cultivars	Transformed embryos (number)	Calli (number)	Induction rate (%)	Regeneration rate (%)	Positive plants (number)	Transformation efficiency (%)
Xinchun37	99	96	96.97	24.24	24	9.09
Xinchun44	102	97	95.1	5.88	6	5.88

展现出与Fielder相当的转化潜力(27.95%和23.30%), 显著高于新疆主栽品种的历史记录(Wang et al., 2017), 这对于推进新疆春小麦幼胚遗传转化应用具有重要意义。与小麦幼胚遗传转化的理想模式品种Fielder相比, 尽管新疆主栽春小麦品种新春37的转化效率略低, 但通过培养条件或转化体系的优化可进一步提升转化效率。因此, 新春37在小麦幼胚遗传转化中具有广阔的应用前景, 有望成为新疆小麦分子育种的优良受体材料。此外, 快速加代方法明显降低了幼胚的遗传转化效率, 可能是幼胚快速发育导致胚性细胞程序性死亡加速(Hayta et al., 2021), 营养元素(如Zn以及Cu)的动态平衡被打破(Warchol et al., 2021), 可在后续研究中通过激素配比等方法改进。

本研究建立了适用于新疆地区主栽小麦品种的快速加代体系, 证实了利用小麦当地品种进行转基因的可行性, 研究成果可直接应用于基因功能研究、种质资源快速扩繁, 具有重要应用价值。快速加代技术与高效遗传转化体系相结合, 将极大加速小麦基因功能研究和育种进程。此外, 将快速加代技术与分子标记辅助选择相结合, 有望实现“设计育种”的流水线操作。

## 作者贡献声明

邱四春: 完成实验并撰写论文; 康禧: 参与实验; 张舒琪: 整理数据; 孙羽晨: 作图及分析数据; 刘世岩: 复核数据及修改论文; 张跃强: 指导实验设计; 史雪: 指导实验及分析数据; 许盛宝: 指导实验设计及论文写作。

**利益冲突:** 所有作者均声明不存在利益冲突

**Conflict of Interests:** The authors declare that there is no conflict of interests.

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## 参考文献

- Acher A, Heuer B, Rubinskaya E, Fischer E (1997). Use of ultraviolet-disinfected nutrient solutions in greenhouses. *J Hortic Sci* **72**, 117–123.
- Chen ZL, Debernardi JM, Dubcovsky J, Gallavotti A (2022). Recent advances in crop transformation technolo-

gies. *Nat Plants* **8**, 1343–1351.

- Ghosh S, Watson A, Gonzalez-Navarro OE, Ramirez-Gonzalez RH, Yanes L, Mendoza-Suárez M, Simmonds J, Wells R, Rayner T, Green P, Hafeez A, Hayta S, Melton RE, Steed A, Sarkar A, Carter J, Perkins L, Lord J, Tester M, Osbourn A, Moscou MJ, Nicholson P, Harwood W, Martin C, Domoney C, Uauy C, Hazard B, Wulff BBH, Hickey LT (2018). Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nat Protoc* **13**, 2944–2963.
- Gou SX, Wang ZL, Wang KT, Wang CC (2010). Natural generation-adding technique in summer in wheat breeding in southern Huanghuai. *Crops* (3), 118–120. (in Chinese)
- 苟升学, 王转丽, 王可田, 王长春 (2010). 黄淮南片小麦夏季自然加代育种技术. *作物杂志* (3), 118–120.
- Guo M, Wang Q, Zong Y, Nian JQ, Li HW, Li JM, Wang T, Gao CX, Zuo JR (2021). Genetic manipulations of *TaARE1* boost nitrogen utilization and grain yield in wheat. *J Genet Genomics* **48**, 950–953.
- Hayta S, Smedley MA, Clarke M, Forner M, Harwood WA (2021). An efficient *Agrobacterium*-mediated transformation protocol for hexaploid and tetraploid wheat. *Curr Protoc* **1**, e58.
- Hayta S, Smedley MA, Demir SU, Blundell R, Hinchliffe A, Atkinson N, Harwood WA (2019). Correction to: an efficient and reproducible *Agrobacterium*-mediated transformation method for hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Methods* **15**, 152.
- Hickey LT, Hafeez AN, Robinson H, Jackson SA, Leal-Bertioli SCM, Tester M, Gao CX, Godwin ID, Hayes BJ, Wulff BBH (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol* **37**, 744–754.
- Hollingsworth RM, Bjeldanes LF, Bolger M, Kimber I, Meade BJ, Taylor SL, Wallace KB, Society of Toxicology ad hoc Working Group (2003). The safety of genetically modified foods produced through biotechnology. *Toxicol Sci* **71**, 2–8.
- Jiang S, Ma HX, Zhang X, Yu GH, Sun XB (2012). *Agrobacterium*-mediated transformation by mature embryo of wheat Ningmai 13. *J Wheat Crops* **32**, 415–420. (in Chinese)
- 蒋苏, 马鸿翔, 张旭, 余桂红, 孙晓波 (2012). 农杆菌介导的宁麦13成熟胚遗传转化体系的构建. *麦类作物学报* **32**, 415–420.
- Li MH, Chen W, Xing LP, Xiao J, Wang HY, Cao AZ, Wang XE (2010). Establishment of high-efficiency genetic trans-

- formation system for the wheat variety Alondra's. *Chin Bull Bot* **45**, 466–471. (in Chinese with English abstract)
- 李明浩, 陈炜, 邢莉萍, 肖进, 王海燕, 曹爱忠, 王秀娥 (2010). 普通小麦品种Alondra's遗传转化体系的建立. *植物学报* **45**, 466–471.
- Li SN, Lin DX, Zhang YW, Deng M, Chen YX, Lv B, Li BS, Lei Y, Wang YP, Zhao L, Liang YT, Liu JX, Chen KL, Liu ZY, Xiao J, Qiu JL, Gao CX (2022). Genome-edited powdery mildew resistance in wheat without growth penalties. *Nature* **602**, 455–460.
- Lin JC, Song N, Liu DB, Liu XB, Chu W, Li JP, Chang SM, Liu ZH, Chen YM, Yang Q, Liu XY, Yao YY, Guo WL, Xin MM, Peng HR, Ni ZF, Sun QX, Hu ZR (2022). Histone acetyltransferase TaHAG1 interacts with TaNACL to promote heat stress tolerance in wheat. *Plant Biotechnol J* **20**, 1645–1647.
- Rai KK (2022). Integrating speed breeding with artificial intelligence for developing climate-smart crops. *Mol Biol Rep* **49**, 11385–11402.
- Wang K, Liu HY, Du LP, Ye XG (2017). Generation of marker-free transgenic hexaploid wheat via an *Agrobacterium*-mediated co-transformation strategy in commercial Chinese wheat varieties. *Plant Biotechnol J* **15**, 614–623.
- Wang XY, Yu RB, Li JY (2021). Using genetic engineering techniques to develop banana cultivars with fusarium wilt resistance and ideal plant architecture. *Front Plant Sci* **11**, 617528.
- Warchoń M, Juzoń K, Dziurka K, Czyczyło-Mysza I, Kapłoniak K, Marcińska I, Skrzypek E (2021). The effect of zinc, copper, and silver ions on oat (*Avena sativa* L.) androgenesis. *Plants* **10**, 248.
- Watson A, Ghosh S, Williams MJ, Cuddy WS, Simmonds J, Rey MD, Hatta MAM, Hinchliffe A, Steed A, Reynolds D, Adamski NM, Breakspear A, Korolev A, Rayner T, Dixon LE, Riaz A, Martin W, Ryan M, Edwards D, Batley J, Raman H, Carter J, Rogers C, Domoney C, Moore G, Harwood W, Nicholson P, Dieters MJ, Delacy IH, Zhou J, Uauy C, Boden SA, Park RF, Wulff BBH, Hickey LT (2018). Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nat Plants* **4**, 23–29.
- Zhang YP, Wei YC (2024). Research and application of winter wheat generation-adding technology in high altitude area. *Tibet J Agric Sci* **46**(3), 23–26. (in Chinese)
- 张永鹏, 魏迎春 (2024). 高海拔地区小麦加代技术研究与应用. *西藏农业科技* **46**(3), 23–26.

## Exploration of Rapid Generation Advancement Models and Genetic Transformation Efficiency in Xinjiang Spring Wheat Cultivars

Sichun Qiu, Xi Kang, Shuqi Zhang, Yuchen Sun, Shiyan Liu, Yueqiang Zhang  
Xue Shi\*, Shengbao Xu\*

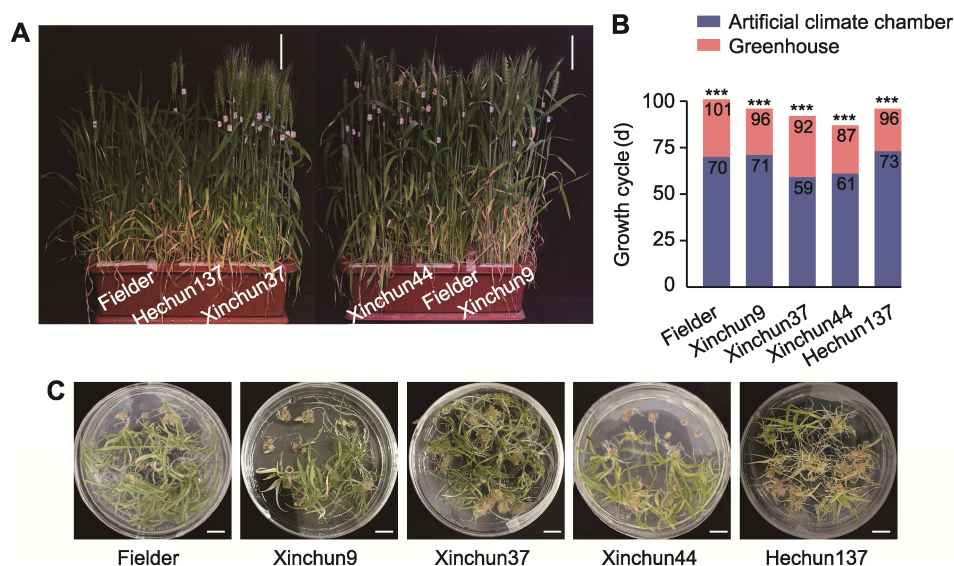
Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**INTRODUCTION:** Global climate change and soil degradation have posed new challenges to the breeding efficiency of wheat (*Triticum aestivum*). Traditional breeding cycles are lengthy and inefficient, making it difficult to meet the ever-growing demand for breeding new cultivars adapting to the changing environment. As a major high-quality wheat producing region in China, Xinjiang urgently needs to establish a rapid generation-advancement system and an efficient genetic transformation platform tailored to its local cultivars, in order to shorten breeding cycles and expand the range of transgenic recipient materials.

**RATIONALE:** Accelerating generation turnover and establishing efficient transformation protocols are critical bottlenecks in wheat functional genomics research and breeding. Conventional greenhouse conditions impose long generation times, while transformation efficiency varies greatly and is often unacceptably low in many elite cultivars. This study was designed to systematically evaluate whether controlled artificial climate chamber conditions could significantly shorten the lifecycle of key Xinjiang wheat cultivars, and to assess the *Agrobacterium*-mediated transformation efficiency of their immature embryos. The goal was to identify cultivars with both a shortened generation time and satisfactory transformation capability, thereby facilitating their use in genetic research and speed breeding applications.

**RESULTS:** Under artificial climate chamber conditions compared to conventional greenhouse conditions, all five wheat cultivars showed a significant reduction in generation time. Xinchun37 exhibited the greatest reduction, shortening its life cycle from 92 days to 59 days; in *Agrobacterium*-mediated embryo transformation assays, Xinchun37 achieved a transformation efficiency of 23.30%, outperforming the other three Xinjiang cultivars but remaining lower than the Fielder control. Xinchun 9, Xinchun44, and Hechun137 also demonstrated measurable transformation efficiencies.

**CONCLUSION:** This study successfully established a novel rapid generation-advancement system for the main wheat cultivars of Xinjiang, and increased their embryonic genetic transformation efficiency. These methods will greatly shorten breeding cycles and provide key technological support for expanding the selection of transgenic recipient materials, thereby contributing to germplasm innovation and food-security strategies in Xinjiang and beyond.



The embryonic genetic transformation efficiency of different Xinjiang spring wheat cultivars (A, C) and their growth cycles (B) under rapid generation advancement conditions were investigated. All tested Xinjiang spring wheat cultivars proved amenable to genetic transformation *via* immature embryos, though with varying transformation efficiencies. Under controlled conditions in artificial climate chambers, the plants exhibited normal growth and fertility, with all lines demonstrating a significantly shortened growth cycle. (A) Bars=10 cm; (C) Bars=1 cm. \*\*\*  $P < 0.001$

**Key words** wheat, Xinjiang region, rapid generation advancement, genetic transformation

**Qiu SC, Kang X, Zhang SQ, Sun YC, Liu SY, Zhang YQ, Shi X, Xu SB** (2026). Exploration of rapid generation advancement models and genetic transformation efficiency in Xinjiang spring wheat cultivars. *Chin Bull Bot* **61**, 291–299.

\* Authors for correspondence. E-mail: shixue@nwfau.edu.cn; xushb@nwfau.edu.cn

(责任编辑: 朱亚娜)

### 通讯作者简介

**许盛宝**, 西北农林科技大学二级教授, 博士生导师, “小麦非生物胁迫耐受机理”团队负责人。现任中国生物化学与分子生物学农业分会理事、中国植物学会高级会员、*Frontiers in Plant Sciences*编委会成员、*Plant Journal*、*Plant Science*和*Journal of Experimental Botany*审稿人。在*New Phytologist*、*Plant Physiology*和*Plant Journal*等著名SCI收录期刊发表论文20余篇, 申请发明专利1项。主要研究方向为小麦重要农艺性状和根系发育相关基因的鉴定和作用机理、小麦耐热基因发掘与作用机理以及小麦抗逆分子设计育种。