

## 长期不同季秸秆还田对冬小麦幼苗质量的影响

王菲菲,黄伟祥,王睿,蔡洪梅,唐志伟,张志翔,  
喻思媛,翁颖,杨传敏,郑宝强,李金才,陈翔

(安徽农业大学农学院/作物抗逆育种与减灾国家地方联合工程实验室,安徽合肥 230036)

**摘要:**为探明安徽淮北平原砂姜黑土区长期不同季秸秆还田对小麦幼苗质量的影响,基于农业农村部华东地区作物栽培科学观测站小麦-玉米周年长期定位试验,以秸秆周年不还田为对照(CK),设置小麦秸秆全量粉碎覆盖还田(T1)、小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T2)和玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T3)3种不同秸秆还田模式,比较分析了连续还田15年后不同处理下冬小麦幼苗农艺性状和干物质积累的差异。结果表明,与CK相比,秸秆还田降低了小麦三叶期至五叶期的次生根数、根体积和根平均直径,但促进了六叶期至越冬期的根系生长。越冬期T1、T2和T3处理的次生根数、根体积和根平均直径较CK均显著增加,次生根数增幅分别为18.64%、16.95%和11.86%,根体积增幅分别为16.89%、29.63%和20.63%,根直径增幅分别为19.26%、12.73%和14.42%。秸秆还田后三叶期至越冬期小麦幼苗的高度、叶面积指数、单株茎蘖数和干物质重均增加,六叶期至越冬期T1、T2和T3处理的光合势较CK分别提高了11.77%、9.45%和3.54%。通过对越冬期10个指标的主成分分析,提取出2个互相独立的综合指标,其方差贡献率分别为68.428%和26.961%,代表了全部数据95.389%的信息量,各处理小麦幼苗质量的评价指标综合得分表现为T1>T2>T3>CK。综合来看,长期秸秆还田可促进小麦根系和地上部植株的生长发育,进而提高幼苗质量,其中小麦单季秸秆全量粉碎覆盖还田对幼苗质量提升效果最好。

**关键词:**砂姜黑土;秸秆还田;小麦;幼苗质量;根系;主成分分析

中图分类号:S512.1+1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1226-09

## Effects of Long-Term Straw Returning in Different Seasons on the Quality of Winter Wheat Seedlings

WANG Feifei, HUANG Weixiang, WANG Rui, CAI Hongmei, TANG Zhiwei, ZHANG Zhixiang,  
YU Siyuan, WENG Ying, YANG Chuanmin, ZHENG Baoqiang, LI Jincai, CHEN Xiang

(College of Agronomy, Anhui Agricultural University/National Engineering Laboratory of Crop  
Stress Resistance Breeding, Hefei, Anhui 230036, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of long-term straw returning in different seasons on the quality of wheat seedlings in lime concretion black soil area of Huaibei Plain in Anhui Province, based on the long-term positioning test of wheat-maize in the Crop Cultivation Scientific Observation Station of East China of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, the differences in agronomic traits and dry matter accumulation of winter wheat seedlings under four different straw returning modes for 15 years were compared and analyzed, including no straw returning(CK), total crushing and mulching of wheat straw(T1), total crushing and mulching of wheat straw+total crushing and burying of corn straw(T2) and total crushing and burying of corn straw(T3). The results showed that compared with no straw returning, straw returning reduced the number of secondary roots, root volume and average

收稿日期:2024-09-23 修回日期:2024-11-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1901005)

第一作者 E-mail:wff8062@163.com(王菲菲)

通讯作者 E-mail:cxagricultural@163.com(陈翔)

root diameter of wheat from three-leaf stage to five-leaf stage, but promoted root growth from six-leaf stage to over-wintering stage. At the over-wintering stage, the number of secondary roots of T1, T2, and T3 treatments was significantly increased by 18.64%, 16.95%, and 11.86%, respectively, compared with CK. The root volume and average root diameter were significantly increased by 16.89%, 29.63%, 20.63% and 19.26%, 12.73%, 14.42%, respectively, compared with CK. Straw returning increased the seedling height, leaf area index, stem per plant and dry matter weight of wheat seedlings from three-leaf stage to over-wintering stage. From six-leaf stage to over-wintering period, the photosynthetic potential of T1, T2, and T3 treatments increased by 11.77%, 9.45% and 3.54%, respectively, compared with CK. Two independent comprehensive indices were extracted by principal component analysis of the 10 indices at over-wintering stage, and their contribution rates were 68.428% and 26.961%, respectively, representing 95.389% of the contribution of all data. The comprehensive score of evaluation index of wheat seedling quality in each treatment ranked as T1>T2>T3>CK. In summary, long-term straw returning can improve the quality of seedlings by promoting the growth and development of wheat roots and aboveground plants. Among them, the full crushing and mulching of wheat straw in single season has the best effect on improving the quality of seedlings.

**Keywords:** Lime concretion black soil; Straw returning; Wheat; Seedling Quality; Roots; Principal component analysis

中国目前是世界上最大的小麦生产国,2023年中国小麦种植面积、总产和单产分别为  $2.35 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、 $1.38 \times 10^8 \text{ t}$  和  $5.87 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[1]</sup>,其稳产丰产对保障国家粮食安全具有极其重要的作用。安徽省淮北平原是中国小麦主产区之一,但低产土壤面积约占该地区耕地面积的60%,其中又以砂姜黑土面积占比最大,约为  $1.80 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[2]</sup>。作为典型的中低产土壤,砂姜黑土具有僵板黏闭、适耕期短、养分含量低等不良属性<sup>[3]</sup>。秸秆还田在农业生产中能够提升耕地质量和作物产能<sup>[4]</sup>。农作物秸秆含有丰富的碳、氮、磷等大量元素和中微量元素<sup>[5]</sup>,其还田不仅可减少化学肥料的使用,提高土壤养分和作物产量<sup>[6-7]</sup>,还能解决秸秆焚烧带来的生态环境污染问题<sup>[8]</sup>,但当前生产中由于秸秆还田质量不高,小麦出苗和成苗受到的一些不利影响仍然不可忽视<sup>[9-10]</sup>。

苗期是小麦叶片、根系、分蘖等营养器官生长发育的重要时期<sup>[11]</sup>,高质量的幼苗有利于小麦安全越冬,进而提高对春季低温和花后高温等非生物胁迫的抵抗能力<sup>[12-14]</sup>。研究发现,秸秆还田条件下,深耕+旋耕+播后镇压的耕作模式可使安徽淮北平原砂姜黑土区小麦的出苗数和产量较旋耕分别提高61.5%和16.4%<sup>[15]</sup>。李福建等<sup>[16]</sup>研究表明,秸秆全量还田条件下翻耕能使小麦越冬期茎蘖数较免耕增加12.8%。此外,秸秆还田量的多少和还田年份的长短对小麦幼苗质量的影响

也不尽相同。试验结果显示,江苏省水稻秸秆全量还田条件下小麦的基本苗数较不还田处理降低17.67%,且幼苗个体质量随秸秆还田量的增加而降低,使抗寒性变弱<sup>[17]</sup>。张宸茜等<sup>[18]</sup>认为,单季水稻秸秆还田影响小麦出苗率和幼苗质量,但其对小麦幼苗质量的负面影响随着秸秆还田年份的增加而逐渐减弱。

目前已有大量研究报道秸秆还田对冬小麦出苗和幼苗质量的影响<sup>[16-18]</sup>,但有关砂姜黑土区长期不同季秸秆还田对冬小麦幼苗生长发育的影响仍鲜有报道。团队前期初步研究了不同季秸秆还田模式对砂姜黑土区冬小麦出苗和幼苗生长质量的影响<sup>[19]</sup>,本研究在此基础上进一步深入探究长期不同季秸秆还田对冬前小麦幼苗连续动态生长发育的影响,从而筛选出适合安徽淮北平原砂姜黑土区的长期秸秆还田模式,以期为该地区小麦生产的可持续高质量发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

长期定位试验自2008年在安徽省蒙城县农业农村部华东地区作物栽培科学观测站( $33^{\circ}9'44'' \text{ N}$ ,  $116^{\circ}32'56'' \text{ E}$ )开始设置,供试土壤类型为砂姜黑土。试验开始设置时0~20 cm耕层有机质含量  $12.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为  $0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $80.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、

15.40 mg · kg<sup>-1</sup> 和 100.30 mg · kg<sup>-1</sup>[20]。本研究数据来源于 2023 年 11 月至 12 月调查结果。

## 1.2 试验设计

试验区为小麦—玉米轮作区,试验以秸秆周年不还田为对照(CK),设置小麦秸秆全量粉碎覆盖还田(T1)、小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T2)和玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T3)3种秸秆还田模式。还田处理的秸秆均为相应小区的上茬作物全部秸秆,且就地粉碎,长度≤10 cm;玉米秸秆用大型旋耕播种机旋耕埋入 0~20 cm 土层,小麦秸秆粉碎后均匀抛撒覆盖后免耕播种玉米。CK 小区的秸秆收获后全部运出。小区长 8.0 m,宽 5.4 m,3 次重复。

供试小麦品种为烟农 19,于 2023 年 10 月 19 日采用大型旋耕播种机(SGT-NB-200Z4/A8,西安亚奥机械有限公司)进行条播,基本苗为 220 万株 · hm<sup>-2</sup>,小麦季化肥施用量为纯氮 240 kg · hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg · hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 90 kg · hm<sup>-2</sup>,其中氮肥 55% 基施,45% 于拔节期追施,磷钾肥全部基施[20]。其他田间管理措施同当地高产小麦田一致。

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 苗高、单株茎蘖数和叶面积指数测定

于小麦三叶期(2023 年 11 月 12 日)、四叶期(2023 年 11 月 18 日)、五叶期(2023 年 11 月 25 日)、六叶期(2023 年 12 月 8 日)、越冬始期(2023 年 12 月 24 日,以下统称为越冬期)每小区选择长势基本均匀一致的植株 5 株,3 次重复,调查单株茎蘖数,并将叶片捋直后用直尺测量苗高和叶片长、宽,计算叶面积指数(LAI)[21],LAI=绿叶总面积/土地面积。参考赵宏波等[23]的方法计算光合势,光合势=(LAI<sub>1</sub>+LAI<sub>2</sub>)×(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>)。式中,t<sub>1</sub>和 t<sub>2</sub>分别为前次测定时间和后次测定时间,LAI<sub>1</sub>和 LAI<sub>2</sub>表示前后两次测定的叶面积指数。

### 1.3.2 SPAD 值测定

于小麦三叶期至越冬期,使用叶绿素测定仪测定顶部完全展开叶片上、中、下部位的 SPAD 值,取平均值作为该叶片最终观测值。

### 1.3.3 次生根数目和根系形态性状测定

参考 Nie 等[22]的方法测定根系相关参数。于小麦三叶期至越冬期,以选定植株为中心,用铁锹挖取 30 cm×30 cm×30 cm(长×宽×高)的土块用网袋冲洗干净并分离单株,平铺于根系扫描仪玻璃板上,根系之间充分分开不重叠,使用根系

形态扫描仪(V700 型,EPSON)分别扫描后保存图片,再用 WinRHIZO 图像分析软件进行分析,得到根体积和根平均直径,并对单株次生根数目进行统计。

### 1.3.4 干物质重测定

于小麦三叶期至越冬期,每小区选择长势基本均匀一致的植株 5 株,将植株分为地上部和地下部分别装袋,放入恒温鼓风干燥箱(DHG-9240A,上海三发科学仪器有限公司)先 105 °C 杀青 30 min,再 65 °C 烘干至恒重后用万分位天平称重(ME204E/02,中国)。

## 1.4 统计分析

使用 Excel 2016 软件处理数据,SPSS 26.0 进行单因素方差分析,采用 Duncan 氏新复极差法进行处理间多重比较(α=0.05)。参照王鹏飞等[24]的方法对越冬期小麦幼苗质量进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期秸秆还田对冬小麦根系生长的影响

秸秆还田对冬小麦次生根数、根体积和根平均直径均有影响(表 1)。与 CK 相比,秸秆还田条件下,冬小麦次生根数在三叶期至五叶期降低,六叶期至越冬期提高,其中越冬期 T1、T2 和 T3 处理的次生根数与 CK 差异均显著(P<0.05),增幅分别为 18.64%、16.95%和 11.86%。T1、T2 和 T3 处理的根体积和根平均直径在三叶期至五叶期均低于 CK,但六叶期和越冬期均高于 CK,其中越冬期的根体积和根平均直径与 CK 差异均显著,根体积增幅分别为 16.89%、29.63%和 20.63%,根平均直径增幅分别为 19.26%、12.73%和 14.42%。可见,相较于秸秆不还田,秸秆还田抑制了三叶期至五叶期小麦根系的生长,但随着生育进程的推进,这种不利影响逐渐弱化,在六叶期和越冬期根系生长优于不还田处理,其中以小麦秸秆全量粉碎覆盖还田的效果最佳。

### 2.2 长期秸秆还田对冬小麦地上部苗质的影响

#### 2.2.1 苗高和单株茎蘖数

各处理冬小麦的苗高和单株茎蘖数均随着生育进程的推进呈增加趋势(图 1)。三叶期至越冬期,秸秆还田处理的小麦苗高均大于 CK。其中,T1、T2 和 T3 处理的苗高较 CK 在三叶期分别增加 11.11%、5.08%和 4.05%,在越冬期分别增加 4.39%、3.22%和 1.83%。三叶期至五叶期,不同

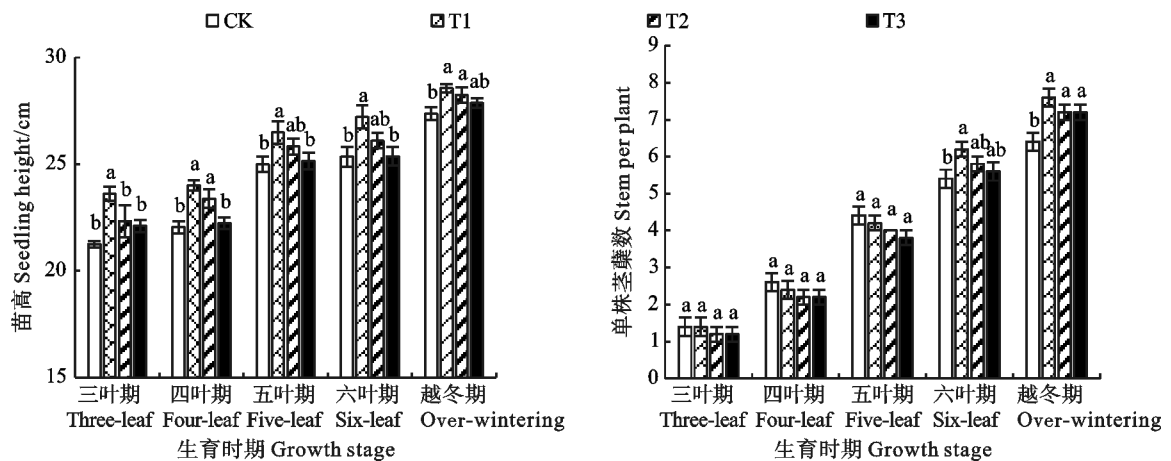
表 1 长期秸秆还田下冬小麦根系性状的变化

Table 1 Changes in root traits of winter wheat at different stages on under long-term straw returning

时期 Stage	处理 Treatment	单株次生根数 Secondary root number per plant	根体积 Root volume/cm <sup>3</sup>	根平均直径 Average root diameter/mm
三叶期 Three-leaf	CK	1.60±0.24a	0.09±0.00a	0.99±0.01a
	T1	1.40±0.24ab	0.08±0.01ab	0.83±0.19a
	T2	1.20±0.20ab	0.08±0.01ab	0.79±0.11a
	T3	0.80±0.20b	0.07±0.00b	0.68±0.09a
四叶期 Four-leaf	CK	5.54±0.46a	0.33±0.03a	0.97±0.05a
	T1	5.40±0.20a	0.26±0.03ab	0.89±0.04a
	T2	5.00±0.07ab	0.19±0.03b	0.93±0.03a
	T3	4.40±0.22b	0.26±0.01ab	0.96±0.03a
五叶期 Five-leaf	CK	9.20±0.31a	0.41±0.03a	0.82±0.02a
	T1	8.80±0.18ab	0.36±0.09a	0.82±0.02a
	T2	8.20±0.32bc	0.37±0.03a	0.82±0.01a
	T3	7.60±0.22c	0.31±0.02a	0.76±0.01b
六叶期 Six-leaf	CK	10.00±0.37b	0.58±0.06a	0.85±0.01b
	T1	11.80±0.50a	0.59±0.08a	0.95±0.02a
	T2	10.40±0.31ab	0.65±0.04a	0.87±0.01b
	T3	10.40±0.33ab	0.61±0.05a	0.87±0.01b
越冬期 Over-wintering	CK	11.80±0.56b	0.82±0.03c	0.91±0.01c
	T1	14.00±0.52a	0.96±0.03b	1.09±0.01a
	T2	13.80±0.17a	1.06±0.01a	1.03±0.02b
	T3	13.20±0.32a	0.99±0.03ab	1.04±0.02ab

各时期同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

Different lowercase letters after the values within the same columns at each stage indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.



图柱上不同字母表示同时期不同处理间差异显著(P<0.05)。下图同。

Different letters on the columns indicate significant differences among the treatments at the same stages at 0.05 level. The same in the following figures.

图 1 长期秸秆还田下冬小麦苗高和单株茎蘖数的变化

Fig. 1 Changes in seedling height and stem number per plant of winter wheat at different stages on under long-term straw returning

处理间冬小麦单株茎蘖数无显著差异;六叶期和越冬期,T1、T2 和 T3 处理的单株茎蘖数均大于 CK,其中越冬期差异显著,增幅分别为 18.75%、

12.50%和 12.50%。可见,相较于秸秆不还田,秸秆还田可提高冬小麦的苗高和单株茎蘖数,其中以小麦秸秆全量粉碎覆盖还田的提升效果最好。

### 2.2.2 叶面积指数和 SPAD 值

随生育进程的推进,各处理小麦叶面积指数和 SPAD 值均呈增加趋势(图 2)。与秸秆不还田相比,秸秆还田增加了三叶期至越冬期的叶面积指数。T1、T2 和 T3 处理的叶面积指数较 CK 在三叶期分别增加了 45.25%、33.31%和 32.70%,差异均显著;越冬期分别增加了 13.05%、11.32%和 6.96%,其中 T1、T2 处理变化明显。三叶期和四叶期不同处理间 SPAD 值差异较小;五叶期至越冬期,秸秆还田处理的 SPAD 值均显著大于 CK(五叶和六叶期的 T3 处理除外)。可见,秸秆还田能提高小麦叶面积指数和 SPAD 值,其中小麦秸秆全量粉碎覆盖还田的效果最好。

### 2.2.3 光合势

由图 3 可见,各处理的冬小麦光合势均随着生育进程的推进呈增加趋势。相较于秸秆不还

田,秸秆还田增加了四叶期至越冬期小麦的光合势。三叶期至四叶期 T1、T2 和 T3 处理较 CK 的光合势均显著增加,增幅分别为 36.84%、34.46%和 8.14%;六叶期至越冬期 T1、T2 和 T3 处理较 CK 的光合势也均显著增加,增幅分别为 11.77%、9.45%和 3.54%( $P < 0.05$ )。可见,秸秆还田处理能够增加冬小麦光合势,其中 T1 效果最好。

### 2.3 长期秸秆还田对冬小麦干物质积累的影响

各处理的小麦幼苗干物质积累量随着小麦生育进程的推进均逐渐增加(图 4)。其中,三叶期 T1、T2 和 T3 处理的地上部干物质积累量较 CK 分别增加了 25.47%、2.63%和 11.99%;T1 处理的根系干物质积累量较 CK 增加了 7.91%,而 T2 和 T3 处理分别降低了 3.02%和 15.35%。越冬期 T1、T2 和 T3 处理地上部干物质积累量较 CK 分别增加了 28.64%、16.65%和 11.92%,差异均

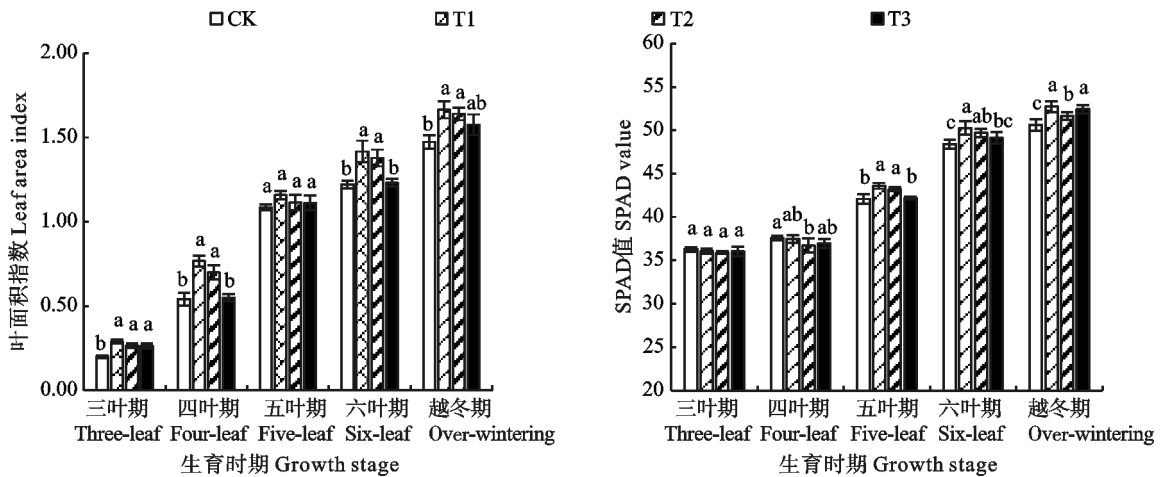


图 2 长期秸秆还田下冬小麦叶面积指数和 SPAD 值的变化

Fig. 2 Changes in leaf area index and SPAD value of winter wheat at different stages on under long-term straw returning

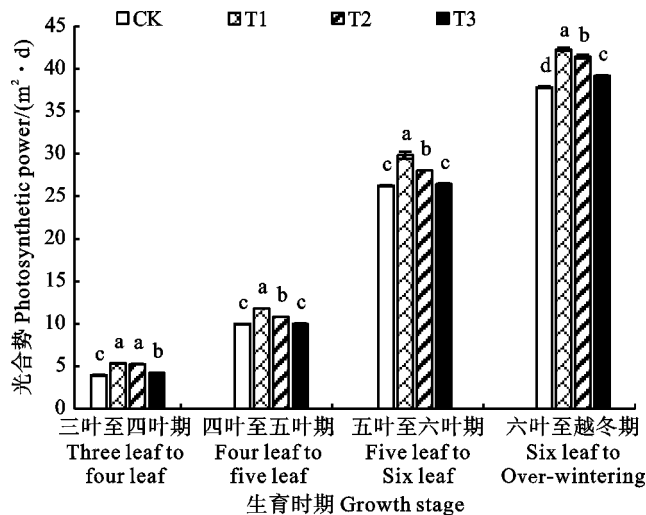


图 3 长期秸秆还田下冬小麦光合势的变化

Fig. 3 Changes in photosynthetic potential of winter wheat at different stages on under long-term straw returning

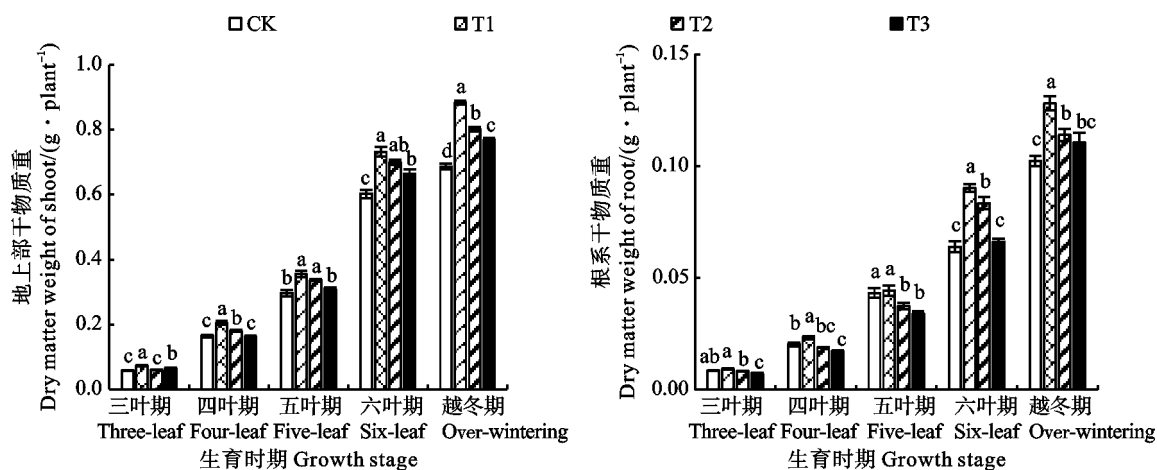


图 4 长期秸秆还田下冬小麦干物质重的变化

Fig. 4 Changes in dry matter weight of winter wheat at different stages on under long-term straw returning

显著;T1、T2 和 T3 处理根系干物质重较 CK 分别增加 25.05%、11.25% 和 7.91%，其中 T1 和 T2 处理与 CK 差异均显著。这说明，秸秆还田能提高冬小麦干物质积累，其中 T1 处理提升效果最好。

### 2.4 越冬期幼苗质量综合评价

为构建综合指标精确评价长期不同季秸秆还田处理对冬小麦幼苗质量的影响，避免单项指标评价造成的片面性，采用 SPSS 对 10 个幼苗质量评价指标进行主成分分析(表 2)。基于主因子特征值大于 1 的原则提取出 2 个主成分因子，其累计方差贡献率达到了 95.389%。其中，第 1 主成分的方差贡献率为 68.428%，主要反映了次生根数目、根体积、根平均直径、单株茎蘖数、SPAD 值、地上部干物质重和根系干物质重等 7 个指标的信息；第 2 主成分的方差贡献率为 26.961%，主要反映了小麦苗高、叶面积指数和光合势 3 个指标的信息。

计算主成分载荷矩阵数值与对应特征值算术平方根的比值，得出主成分系数矩阵，并求出两个主成分的得分( $F_1$  和  $F_2$  值)，再以各个主成分对应的相对贡献率为权重，对主成分得分进行加权求和，得出综合评价值( $F$  值)。

$$F_1 = 0.361X_1 + 0.324X_2 + 0.372X_3 - 0.257X_4 + 0.376X_5 - 0.212X_6 + 0.353X_7 + 0.325X_8 + 0.293X_9 - 0.241X_{10}$$

$$F_2 = -0.144X_1 - 0.154X_2 + 0.120X_3 + 0.447X_4 + 0.108X_5 + 0.496X_6 + 0.078X_7 + 0.320X_8 + 0.389X_9 + 0.472X_{10}$$

$$F = (0.684F_1 + 0.270F_2) \div 0.954$$

不同处理下小麦幼苗质量评价指标综合表现为  $T1 > T2 > T3 > CK$ (表 3)，进一步说明秸秆还田能提高冬前小麦幼苗质量，其中小麦单季秸秆全量粉碎覆盖还田更有利于小麦幼苗生长发育进而形成壮苗。

表 2 主成分初始特征值、贡献率及载荷矩阵

Table 2 Eigen values, contribution rates and load matrices of principal components

指标 Indicator	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
$X_1$	0.944	0.237
$X_2$	0.846	-0.252
$X_3$	0.974	0.198
$X_4$	-0.672	0.734
$X_5$	0.984	0.177
$X_6$	-0.553	0.815
$X_7$	0.924	0.128
$X_8$	0.850	0.526
$X_9$	0.766	0.639
$X_{10}$	-0.630	0.775
特征值 Eigen value	6.843	2.696
方差贡献率 Variance contribution rate/%	68.428	26.961
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	68.428	95.389

$X_1$ : 次生根数目;  $X_2$ : 根体积;  $X_3$ : 根平均直径;  $X_4$ : 苗高;  $X_5$ : 单株茎蘖数;  $X_6$ : 叶面积指数;  $X_7$ : SPAD 值;  $X_8$ : 地上部干物质重;  $X_9$ : 根系干物质重;  $X_{10}$ : 光合势。

$X_1$ : Number of secondary roots;  $X_2$ : Root volume;  $X_3$ : Average root diameter;  $X_4$ : Seedling height;  $X_5$ : Stem per plant;  $X_6$ : Leaf area index;  $X_7$ : SPAD value;  $X_8$ : Dry matter weight of shoot;  $X_9$ : Dry matter weight of root;  $X_{10}$ : Photosynthetic power.

表 3 各主成分得分、综合得分及排序

Table 3 Each principal component score, comprehensive score and ranking

处理 Treatment	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	综合得分 Overall score	排序 Ranking
T1	2.129	2.630	2.271	1
T2	2.065	2.453	2.175	2
T3	2.030	2.381	2.129	3
CK	1.695	2.422	1.901	4

### 3 讨论

#### 3.1 长期秸秆还田对冬小麦幼苗质量的影响

根系是植物吸收营养和水分的重要器官,合理的根系分布可使根系生长和养分供应相互协调,其中根系的数量、体积和平均直径决定着小麦对养分的吸收和转运能力,进而影响地上部养分的供应效率和生长发育<sup>[25-27]</sup>。吴宇等<sup>[28]</sup>研究发现,小麦秸秆全量粉碎覆盖还田能使小麦维持较高的根系活力,提高根干重和根长。张素瑜等<sup>[29]</sup>研究表明,玉米秸秆粉碎翻压还田能增加土壤水分含量,促进小麦次生根的发生。本研究中,与秸秆不还田相比,秸秆还田对小麦根系的影响表现为“前抑后促”,这可能是由于前期秸秆腐解过程中微生物与作物根系争夺氮素和水分,且植株的生长重心主要集中在地上部,从而抑制了根系的生长发育;后随着秸秆腐解释放养分,根系的生长发育受到促进,使次生根数量、根体积和根平均直径得以提高<sup>[30-31]</sup>。

苗高、叶面积、单株茎蘖数等指标可反映小麦冬前幼苗质量<sup>[11]</sup>。Cui 等<sup>[16]</sup>报道,秸秆还田后深耕增加了冬小麦叶面积和叶绿素含量,播后镇压能提高 10~30 cm 土层土壤含水量,有利于小麦根系生长和增加分蘖数。沈学善等<sup>[32]</sup>研究指出,秸秆还田 1 年配施化肥能提高三叶期和越冬期小麦的苗高、叶面积和干物质重。蔡洪梅等<sup>[19]</sup>研究表明,秸秆还田可以增加冬小麦六叶期分蘖数、叶面积指数和干物质重。本研究发现,长期秸秆还田处理增加了三叶期至越冬期小麦幼苗高度、叶面积和干物质积累量,促进了分蘖的早发快生,提高了光合势。这可能是由于长期秸秆还田改变了土壤的理化性状和根际微生物群落的结构与多样性<sup>[33-36]</sup>,进而影响了根系与地上部物质和信息的交流,促进了地上部的生长发育。此外,本研究中

秸秆还田处理中以小麦单季秸秆还田对幼苗质量的提升效果最好,这可能是玉米秸秆的碳氮比较高,其还田后微生物分解秸秆需要消耗土壤中的氮素,从而与小麦形成氮素竞争,进而对幼苗质量的提升效果不如单季小麦秸秆还田<sup>[37]</sup>。

#### 3.2 综合评价

小麦幼苗质量是个体和群体指标的综合体现,单一指标难以全面反映小麦幼苗质量。采用主成分分析、聚类分析等方法可实现对多个指标进行综合评价分析。如,刘阿康等<sup>[38]</sup>基于小麦越冬期形态与生理指标对不同播期条件下冬小麦苗质进行分析和综合排名;张军等<sup>[39]</sup>通过主成分分析和隶属函数法研究 8 个强筋小麦品种的幼苗在干旱胁迫下形态与生理生化指标,评价了各品种的萌发期抗旱性;陈旭等<sup>[40]</sup>基于苗期根系形态、干物质、氮积累量等指标对试供小麦进行主成分分析,并综合评价各品种植株的氮效率。为了更加科学评价不同季秸秆还田条件下小麦越冬期苗情,本研究对越冬期小麦多个指标进行主成分分析和综合评价,各处理得分表现为 T1>T2>T3>CK。研究表明,黄淮海平原地区小麦单季秸秆还田条件下小麦产量较小麦—玉米周年秸秆还田增加了 5.67%,且小麦单季秸秆还田处理下玉米秸秆饲料化使经济收益显著优于小麦—玉米秸秆周年还田处理<sup>[41]</sup>。本研究中也以小麦单季秸秆全量粉碎覆盖还田条件下的苗情表现最好,因此实际生产中应根据种植区域的实际情况选择适宜的秸秆还田模式,提高秸秆的综合利用率和农民收益。此外,本研究仅从小麦冬前地下部、地上部的农艺指标进行幼苗质量综合评价,未对返青起身之后小麦的幼苗质量进行测定分析,因此后续将对冬前和早春幼苗的农艺性状、生理生化和生态气象指标等方面进一步深入研究,更加全面客观地评价幼苗质量,从而为大田小麦苗情的精准研判和区分苗田间管理的靶向施策提供技术支持。

### 4 结论

在本试验条件下,长期秸秆还田增加了三叶期至越冬期小麦幼苗的高度、叶面积指数和干物质积累,促进了根系的生长和分蘖的早发快生。各处理越冬期小麦幼苗质量的评价指标综合得分表现为 T1>T2>T3>CK,说明秸秆还田提高了砂姜黑土区冬小麦冬前幼苗质量,其中小麦秸秆全量粉碎覆盖还田的效果最佳,是适合在淮北平

## 原砂姜黑土区推广的一种还田模式。

## 参考文献:

- [1]国家统计局. 国家统计局关于2023年夏粮产量数据的公告[R]. 2023. <https://www.stats.gov.cn>.  
National Bureau of Statistics of China. Announcement of the National Bureau of Statistics on 2023 summer grain output data [R]. 2023. <https://www.stats.gov.cn>
- [2]曹承富,孔令聪,汪芝寿,等. 砂姜黑土长期定位培肥技术研究[J]. 土壤通报,2003,34(2):102.  
CAO C F, KONG L C, WANG Z S, et al. Effect of long-term trial on raising fertility of Shajiang black soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 102.
- [3]熊鹏,郭自春,李玮,等. 淮北平原砂姜黑土玉米产量与土壤性质的区域分析[J]. 土壤,2021,53(2):391.  
XIONG P, GUO Z C, LI W, et al. Regional analysis of maize yield and physiochemical properties of Shajiang black soil (vertisol) in Huaibei Plain [J]. *Soils*, 2021, 53(2): 391.
- [4]SARKER J R, SINGH B P, COWIE A L, et al. Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 209.
- [5]李逢雨,孙锡发,冯文强,等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):374.  
LI F Y, SUN X F, FENG W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 374.
- [6]BAI Y L, WANG L, LU Y L, et al. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize rotation [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2467.
- [7]XU X, PANG D W, CHEN J, et al. Straw return accompany with low nitrogen moderately promoted deep root [J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 71.
- [8]GUO L J, ZHANG Z S, WANG D D, et al. Effects of short-term conservation management practices on soil organic carbon fractions and microbial community composition under a rice-wheat rotation system [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 65.
- [9]MU X Y, ZHAO Y L, LIU K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32.
- [10]李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报,2006,32(3):463.  
LI S K, WANG K R, FENG J K, et al. Factors affecting seedling emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463.
- [11]于振文. 作物栽培学各论:北方本[M]. 北京:中国农业出版社,2013:21.  
YU Z W. Various theories of crop cultivation: Northern book [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 21.
- [12]陈翔,张乐乐,吴宇,等. 秸秆还田对小麦出苗质量的影响及对策[J]. 安徽农学通报,2021,27(2):27.  
CHEN X, ZHANG L L, WU Y, et al. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(2): 27.
- [13]蔡洪梅,王菲菲,王捧娜,等. 冬小麦越冬期壮苗评价方法与指标研究进展[J]. 应用生态学报,2024,35(2):555.  
CAI H M, WANG F F, WANG P N, et al. Research progress on the method and index evaluating strong seedlings of winter wheat during overwintering stage [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(2): 555.
- [14]赵佳佳,乔玲,武棒棒,等. 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析[J]. 作物学报,2021,47(4):714.  
ZHAO J J, QIAO L, WU B B, et al. Seedling root characteristics and drought resistance of wheat in Shanxi province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(4): 714.
- [15]CUI X J, WANG Z W, ZHUANG T F, et al. Improving wheat seedling quality through deep ploughing and soil compaction at sowing in lime concretion black soil [J]. *PLoS One*, 2023, 18(7): e0288459.
- [16]李福建,徐东忆,刘凯丽,等. 耕作方式对稻茬小麦幼苗茎蘖生长生理和生产力的影响[J]. 华北农学报,2022,37(1):58.  
LI F J, XU D Y, LIU K L, et al. Effects of tillage methods on growth and physiology of seedlings stem and tillers and their productivity of wheat in rice stubble [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 58.
- [17]邵鹏,徐雯,宋亮. 水稻秸秆还田浅旋灭茬不同还田量对小麦生长性状及产量的影响[J]. 上海农业科技,2017(3):51.  
SHAO P, XU W, SONG L. Effects of different amount of returning rice straw to field on growth traits and yield of wheat [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2017(3): 51.
- [18]张蕊茜,杭雅文,李福建,等. 稻秸还田年数和氮肥运筹对小麦出苗和幼苗形态及生理特性的影响[J]. 核农学报,2020,34(8):1805.  
ZHANG C X, HANG Y W, LI F J, et al. Effects of rice straw returning and nitrogen fertilizer on seedling emergence and morphological and physiological characteristics of wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(8): 1805.
- [19]蔡洪梅,吴宇,于敏,等. 长期秸秆全量还田对砂姜黑土区冬小麦幼苗生长质量的影响[J]. 麦类作物学报,2022,42(10):1266.  
CAI H M, WU Y, YU M, et al. Effects of long-term straw returning to field on seedling growth quality of winter wheat in lime concretion black soil area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(10): 1266.
- [20]屈会娟,李金才,沈学善,等. 秸秆全量还田对冬小麦不同小穗位和粒位结实粒数和粒重的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2176.  
QU H J, LI J C, SHEN X S, et al. Effects of all straw returned to the field on grain number and grain weight at different spikelets and grain positions in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(10): 2176.
- [21]李浩然,李慧玲,王红光,等. 冬小麦叶面积测算方法的再探讨[J]. 麦类作物学报,2018,38(4):455.  
LI H R, LI H L, WANG H G, et al. Further study on the method of leaf area calculation in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(4): 455.
- [22]NIE Z J, ZHAO P, WANG J, et al. Absorption kinetics and

- subcellular fractionation of zinc in winter wheat in response to nitrogen supply [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1435.
- [23] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 60. ZHAO H B, HE J, LI H W, *et al.* Effects of straw returning methods on soil physical properties and wheat growth in seedbed [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(S1): 60.
- [24] 王鹏飞, 赵健霄, 李涛, 等. 外源 ALA 缓解梨花器官低温伤害的效应研究[J]. 中国果树, 2023(6): 16. WANG P F, ZHAO J X, LI T, *et al.* Study on the effect of exogenous ALA to alleviate low temperature injury in pear flower organs [J]. *China Fruits*, 2023(6): 16.
- [25] LIAO M T, FILLERY I R P, PALTA J A. Early vigorous growth is a major factor influencing nitrogen uptake in wheat [J]. *Functional Plant Biology*, 2004, 31(2): 121.
- [26] JIANG S Y, SUN J Y, TIAN Z W, *et al.* Root extension and nitrate transporter up-regulation induced by nitrogen deficiency improves nitrogen status and plant growth at the seedling stage of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 141: 28.
- [27] 申冠宇, 杨习文, 周苏玫, 等. 土壤耕作技术对小麦出苗质量、根系功能及粒重的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2042. SHEN G Y, YANG X W, ZHOU S M, *et al.* Impacts of soil tillage techniques on seedling quality, root function and grain weight in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2042.
- [28] 吴宇, 蔡洪梅, 许波, 等. 不同季秸秆全量还田对小麦根系分泌物的影响[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(12): 1938. WU Y, CAI H M, XU B, *et al.* Effects of all straw return on root secretions of wheat in different seasons [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(12): 1938.
- [29] 张素瑜, 王和洲, 杨明达, 等. 水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 2484. ZHANG S Y, WANG H Z, YANG M D, *et al.* Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(13): 2484.
- [30] TANGYUAN N, BIN H, NIANYUAN J, *et al.* Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2009, 55(8): 327.
- [31] ZHANG P, WEI T, JIA Z K, *et al.* Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China [J]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 41.
- [32] 沈学善, 屈会娟, 李金才, 等. 小麦玉米秸秆全量还田对冬小麦出苗和光合生产的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 847. SHEN X S, QU H J, LI J C, *et al.* Effects of wheat and maize straw returned to field on emergence and production of photosynthesis of winter wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(3): 847.
- [33] 郭成藏, 李鲁华, 黄金花, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 296. GUO C Z, LI L H, HUANG J H, *et al.* Effects of cotton straw incorporation on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in long-term continuous cropping cotton field [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3): 296.
- [34] 李辛, 孟繁君, 向阳, 等. 玉米秸秆还田对黑土速效养分和物理性质影响[J]. 农业开发与装备, 2022(9): 161. LI X, MENG F J, XIANG Y, *et al.* The influence of corn straw returning to the field on the available nutrients and physical properties of black soil [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2022(9): 161.
- [35] CONG P, WANG J, LI Y Y, *et al.* Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104735.
- [36] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1765. LI X S, WU N, LIU L, *et al.* Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1765.
- [37] 李然, 徐明岗, 孙楠, 等. 不同碳氮比下秸秆腐解与养分释放的动力学特征[J]. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2118. LI R, XU M G, SUN N, *et al.* Dynamics characteristic of straw decomposition and nutrient release under different C/N ratio [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2118.
- [38] 刘阿康, 马瑞琦, 王德梅, 等. 覆膜和补施氮肥对晚播冬小麦冬前植株生长及群体质量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(7): 1771. LIU A K, MA R Q, WANG D M, *et al.* Effects of filming and supplemental nitrogen fertilizer application on plant growth and population quality of late sowing winter wheat before winter [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(7): 1771.
- [39] 张军, 魏国, 彭彦珉, 等. 8份强筋小麦品种抗旱性评价[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(4): 442. ZHANG J, WEI G, PENG Y M, *et al.* Drought resistance evaluation of eight strong gluten wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(4): 442.
- [40] 陈旭, 杨习文, 李文, 等. 不同氮素利用效率小麦苗期的根系形态数量性状分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 174. CHEN X, YANG X W, LI W, *et al.* Analysis on morphological and quantitative seedling root traits of cultivars with different nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 174.
- [41] 王良, 刘元元, 钱欣, 等. 单季麦秸还田促进小麦-玉米周年碳效率和经济效益协同提高[J]. 中国农业科学, 2022, 55(2): 350. WANG L, LIU Y Y, QIAN X, *et al.* The single season wheat straw returning to promote the synergistic improvement of carbon efficiency and economic benefit in wheat-maize double cropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(2): 350.