

# 아시아 및 아프리카 원산 참깨(*Sesame indicum* L.) 유전자원의 농업형질과 리그난 함량 평가

이수경<sup>1</sup>, 성정숙<sup>1</sup>, 이기안<sup>1</sup>, 유은애<sup>1</sup>, 황소정<sup>1</sup>, 리웨이란<sup>1</sup>, 양태진<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업유전자원센터, 연구원, <sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학대학 농림생물자원학부, 교수

## Characterization of Agronomic Traits and Evaluation of Lignan Contents in Asian and African Sesame (*Sesamum indicum* L.) Germplasms

Sookyong Lee<sup>1</sup>, Jungsook Sung<sup>1</sup>, Gi-An Lee<sup>1</sup>, Eunae Yoo<sup>1</sup>, So Jeong Hwang<sup>1</sup>,  
Weilan Li<sup>1</sup> and Tae-Jin Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, National Agrobiodiversity Center, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju 54874, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Plant Genomics and Breeding Institute, Research Institute of Agriculture and Life Science, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

**Abstract** - Sesame (*Sesamum indicum* L.) is an ancient oilseed crop, which is usually cultivated for its seeds. Sesame breeding aims to achieve high seed yield and quality, along with resistance to biotic or abiotic stresses. It is estimated that sesame is originated from Asia or Africa continent. In this study, we characterized 10 agronomic traits and evaluated lignan contents in 165 sesame germplasm originated from Asia or Africa, to select high-yield or high-lignan content accessions. Sesame germplasm showed diverse phenotypes and highly variable lignan contents (sesamin: 0.5-12.6 mg/g, sesamol: 0.1-3.5 mg/g, lignan: 1.1-16.1 mg/g). Based on originated continent, there are significant difference in agronomic traits, but no in lignan content. Correlation analysis revealed that yield-related agronomic traits were negatively related with lignan contents. Also, PCA analysis showed that most agronomic traits and lignan contents were principal components explaining diversity of whole sesame germplasm. Sesame germplasm was clustered into three groups based on agronomic traits and lignan contents. Finally, we selected high-yield (IT29416, IT167042, K276848, K276849) and high-lignan candidate accessions (IT169254, IT170031, IT169250, IT154876, IT170034), respectively. These accessions are expected to be valuable resources for breeding of high-yield and high-lignan contents functional cultivars.

**Key words** – Agronomic traits, Genetic resource, Sesame, Sesamin, Sesamol

## 서 언

참깨(*Sesamum indicum* L.)는 꿀풀목(Lamiales), 참깨과(Pedaliaceae), 참깨속(*Sesamum*)에 속하는 1년생 초본식물로서, 참깨속에 속하는 23개 종 중에서 가장 많이 알려져 있고 광범위한 지역에서 재배되고 있는 종이다(Ashri, 1998; Dossa *et al.*, 2017). 참깨는 기원전 3,050~3,500년 경부터 재배되어온

오랜 역사가 있는 유지작물이다(Bedigian and Harlan, 1986; Yol *et al.*, 2021). 참깨의 원산지는 고온 건조한 인도와 에티오피아 지역으로 추정되고 있으며, 원산대륙으로 추정되는 아시아 및 아프리카 대륙에서 세계 참깨 생산량의 약 96%를 생산하고 있다(Ashri, 1998; FAOSTAT, 2021). 특히, 아프리카 대륙의 수단, 탄자니아와 아시아 대륙의 인도, 미얀마가 2021년 기준 세계 참깨 생산량의 약 51%를 생산하였다(FAOSTAT, 2021). 참깨는 아시아, 아프리카 대륙 뿐만 아니라 전세계적으로 재배되면서 다양한 환경에 적응하여 높은 다양성을 나타낸다(Dossa *et al.*, 2017; Wei *et al.*, 2015).

\*교신저자: E-mail tjyang@snu.ac.kr

Tel. +82-2-880-4547

참깨는 주로 종자를 활용하기 위해 재배되는 작물로서, 참깨 종자는 지방 44~58%, 단백질 18~25%, 탄수화물 ~13.5%를 함유하고 있다(Borchani *et al.*, 2010). 참깨 종자의 가장 높은 비율을 차지하는 지방은 올레산(oleic acid), 리놀레산(linoleic acid) 등 약 80%의 불포화 지방산으로 구성되어 있다(Agidew *et al.*, 2021; Gandhi, 2009). 참기름(sesame oil)은 산패에 강한 특성이 있으며, 이는 리그난(lignans), 토코페롤 등의 항산화 물질을 함유하고 있기 때문이다(Andargie *et al.*, 2021). 리그난은 두 개의 페닐프로판노이드(phenylpropanoid) 분자로부터 형성된 페놀성 화합물이며, 참깨에서 주요 리그난은 세사민(sesamin)과 세사몰린(sesamol)이 있다(Andargie *et al.*, 2021). 리그난은 혈당과 콜레스테롤 수치를 낮추고, 심혈관계 질환과 암을 예방하는 등의 건강증진효과가 있어 최근 각광받고 있는 성분이다(Andargie *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2019).

참깨 품종의 주요 육성 목표에는 다수성과 고품질, 병저항성, 재해저항성 등이 있다(Dossa *et al.*, 2017; Teklu *et al.*, 2022). 참깨 수량성 관련 농업형질에는 이른 성숙기, 짧은 초장, 수량 구성 요소(식물체당 분지수, 엽액당 꼬투리 수, 꼬투리당 종자 수, 천립중)의 향상 등이 있다(Sabag *et al.*, 2021; Teklu *et al.*, 2022). 종자 품질과 관련해서는 조지방 및 리그난 고함량, 올레산, 리놀렌산(linolenic acid) 등이 높은 지방산 조성 등이 있다(Andargie *et al.*, 2021; Teklu *et al.*, 2022). 특히, 최근에 리그난의 의약적 효과가 밝혀지며 리그난 참깨 품종에 대한 수요가 높아지고 있다(Andargie *et al.*, 2021; Dossou *et al.*, 2023). 이와 같이 참깨 품종을 육성하기 위해서는 육종목표에 맞는 육종 소재 발굴이 필요하며, 육종소재의 발굴은 다양성이 높은 유전자원에 대한 특성평가를 통해 이루어질 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 다수성 및 고리그난 참깨 품종 육성에 활용될 수 있는 자원을 발굴하고자 참깨 원산지가 포함된 아시아 및 아프리카 대륙원산 165자원을 대상으로 농업형질 및 리그난 함량을 평가하였다. 평가한 농업형질 및 리그난 함량은 유전자원이 수집된 원산대륙 및 원산국 간에 비교하여 원산지별 유전자원의 다양성에 대한 정보를 제공하고자 하였다. 또한, 농업형질과 리그난 함량 간의 상관관계, 주성분 및 군집 분석을 수행하여 우수자원 발굴의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 실험 재료

본 연구에서는 참깨 165자원을 농촌진흥청 농업유전자원센터(<http://genebank.rda.go.kr>)로부터 분양 받아 이용하였다.

참깨자원은 농업유전자원센터에서 보유하고 있는 자원 중 참깨의 원산지인 아시아 및 아프리카 대륙 원산으로 구성하였으며, 대륙별로 아시아 원산자원은 한국, 이란 등 9개국 71자원을, 아프리카 원산자원은 수단, 이집트 등 6개국 94자원으로 구성하였다(Appendix 1). 연구에 활용된 참깨 유전자원은 2021년 5월에 휴폭 50 cm, 휴간 60 cm의 두둑에 흑색 비닐(0.02 mm)을 피복하고, 주간 45 cm 간격으로 자원당 8주씩 농업유전자원센터 시험포장에 파종하여 전생육기간동안 재배하였다. 자원별로 성숙기에 맞추어 수확한 후 건조한 종자를 리그난 함량 분석에 사용하였다.

### 농업형질 조사

참깨 유전자원 농업형질 조사는 국제식물유전자원연구소(IPGRI, International Plant Genetic Resources Institute) 조사 기준(IPGRI and NBPGR, 2004)의 일부를 수정하여 이용하였다(Table 1). 본 연구에서 조사한 10개의 농업형질은 3개의 질적형질(과성, 실방수, 종피색)과 7개의 양적형질(개화기, 성숙기, 초삭고, 착삭부위장, 삭장, 삭폭, 천립중)로 구성되어 있다. 질적형질 중 과성(number of capsules per axil, NCPA)과 실방수(number of locules per capsule, NLPC)는 자원별 재식된 모든 개체를 조사하여 대표형질을 기록하였으며, 양적형질 중 초삭고(height of the first capsule-bearing node, HFC), 착삭부위장(capsule zone length, CZL), 삭장(capsule length, CL), 삭폭(capsule width, CW)은 5개체 측정치의 평균값으로 나타내었다.

### 리그난 함량분석

참깨 종자의 리그난 함량을 분석하기 위한 리그난 추출 및 HPLC 분석법은 Jung *et al.* (2017)과 Kim *et al.* (2014)의 방법을 수정하여 이용하였으며, 자원당 3반복으로 실험을 수행하였다. 분쇄한 참깨 시료 1 g을 conical tube (50 mL)에 넣고 메탄올 20 mL을 첨가한 후 sonicator (POWER SONIC 420, Hwashin Tech Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 1시간 동안 추출하였다. 추출 후, 원심분리기(1236R, Labogene, Seoul, Korea)로 원심분리(10분, 3,500 rpm)하여 상층액을 0.2  $\mu$ m nylon filter (Whatman, Little Chalfont, Buckinghamshire, UK)로 여과한 후 HPLC (1260 Infinity, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA)에 시료당 10  $\mu$ L를 주입하여 20분 동안 분석하였다. HPLC 분석 시 사용한 표준물질은 Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, USA)의 세사민(59867, purity  $\geq$  98%)과 세사몰린(SMB00701, purity  $\geq$  97%)이었으며, 컬럼은 Waters (Milford, MA, USA)의 C<sub>18</sub> 컬럼(4.6 x 250 mm, 5  $\mu$ m)을 이용하였

Table 1. Descriptor of 10 agronomic traits for sesame germplasm

Trait	Abbreviation	Unit/Range	Description
Days to flowering	DTF	days	Number of days from sowing until 50% of plants initiate flowering
Days to maturity	DTM	days	Number of days from sowing until 75% of plants reaching physiological maturity
Number of capsules per axil	NCPA	1-3	1: one, 2: three, 3: mixture of one and three capsules
Number of locules per capsule	NLPC	1-7	1: four, 2: six, 3: eight, 4: mixture of 8 and 6 locules, 5: mixture of 4 and 6 locules, 6: mixture of 4 and 8 locules, 7: mixture of 4, 6, and 8 locules
Height of the first capsule-bearing node	HFC	cm	Average length from base to the first capsule-bearing node in five plants
Capsule zone length	CZL	cm	Average length from the first capsule-bearing node to the last capsule-bearing node in five plants
Capsule length	CL	mm	Average capsule length of five randomly selected capsules from the middle of main stem
Capsule width	CW	mm	Average capsule width of five randomly selected capsules from the middle of main stem
Seed coat color	ScC	1-8	1: white, 2: gray, 3: light brown, 4: brown, 5: brick red, 6: bright black, 7: black, 8: olive
1000-seed weight	1000SW	g	Weight in grams of 1000 random seeds taken from the bulk harvest

다. 이동상은 메탄올:물=80:20 (v/v)의 등용(isocratic) 조건으로 유속은 분당 0.7 mL로 흘러주었으며, diode array detector (DAD)로 285 nm에서 검출한 세사민과 세사몰린의 피크면적을 정량에 이용하였다. 정량된 세사민과 세사몰린의 합을 리그난 함량으로 나타내었다.

### 통계분석

본 연구에서 수행한 모든 통계분석은 R 소프트웨어(버전 4.2.2.)를 이용하였다. 참깨자원의 원산대륙별, 원산국별 및 질적형질별 양적형질과 리그난 함량을 비교하기 위해 t-검정(student's t-test)과 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. 또한, 양적형질과 리그난 함량 간의 상관관계 분석과 군집 분석을 수행하였으며, 참깨 유전자원 집단의 특성을 설명하는 주요인을 찾기 위해 주성분 분석을 수행하였다.

## 결 과

### 아시아 및 아프리카 원산 참깨 유전자원의 농업형질 변이

아시아 및 아프리카 원산 참깨 유전자원 165자원에 대해 총 10가지의 농업형질(질적 3개, 양적 7개)을 조사하였다. 각 농업

형질에 대한 참깨 유전자원의 변이는 질적형질과 양적형질로 나누어 나타내었으며, 대륙별, 원산국별 농업형질 조사결과값의 분포와 변이를 비교하였다(Table 2, Table 3, Appendix 2, Appendix 3). Table 2의 질적형질 조사값에 따르면, 과성(number of capsules per axil, NCPA)은 전체자원 중 130자원(약 78.8%)이 1과성 형질(observation: 1)을, 32자원(약 19.4%)이 3과성 형질(observation: 2)을, 나머지 3자원(약 1.8%)이 1과성과 3과성이 섞여 있는 형질(observation: 3)로 나타났다. 대륙별 과성 형질의 분포를 보았을 때, 아시아와 아프리카 원산자원 모두 1과성 형질이 각각 약 67.6%, 87.2%로 가장 많은 형질을 차지하였으나, 3과성 형질은 아프리카 원산자원(약 11.7%)보다 아시아 원산자원(약 29.6%)에서 상대적으로 높은 비율을 보였다. 실방수(number of locules per capsule, NLPC)의 경우, 전체자원 중 대다수 자원인 154자원(약 93.3%)이 '2실 4방'의 형질(observation: 1)을 보였으며, 그 외에 '4실 8방'과 '3실 6방'이 섞여 있는 형질(observation: 4)이 7자원(약 4.2%), '2실 4방'과 '3실 6방'이 섞여 있는 형질(observation: 5)이 2자원(약 1.2%), '2실 4방'과 '4실 8방'이 섞여 있는 형질(observation: 6)과 '2실 4방', '3실 6방', '4실 8방'이 모두 섞여 있는 형질(observation: 7)이 각각 1자원(약 0.6%)로 나타났다. 대륙별 실방수의 분포를

Table 2. Qualitative traits of 165 sesame germplasms including 71 Asia-originated and 94 Africa-originated germplasms

Qualitative traits	Observations <sup>z</sup>	Germplasm (165)		Asia-originated (71)		Africa-originated (94)	
		n	%	n	%	n	%
Number of capsules per axil	1	130	78.8	48	67.6	82	87.2
	2	32	19.4	21	29.6	11	11.7
	3	3	1.8	2	2.8	1	1.1
Number of locules per capsule	1	154	93.3	63	88.7	91	96.8
	2	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	4	7	4.2	6	8.5	1	1.1
	5	2	1.2	0	0.0	2	2.1
	6	1	0.6	1	1.4	0	0.0
	7	1	0.6	1	1.4	0	0.0
Seed coat color	1	83	50.3	25	35.2	58	61.7
	2	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	3	32	19.4	14	19.7	18	19.1
	4	12	7.3	7	9.9	5	5.3
	5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	7	26	15.8	24	33.8	2	2.1
	8	12	7.3	1	1.4	11	11.7

<sup>z</sup>Each value follows qualitative trait description in Table 1.

Table 3. Quantitative traits of 165 sesame germplasms including 71 Asia-originated and 94 Africa-originated germplasms

Quantitative traits	Germplasm (165)					Asia-originated (71)		Africa-originated (94)	
	Range	Mean±SD	Median	Skewness	Kurtosis	Range	Mean±SD <sup>z</sup>	Range	Mean±SD <sup>z</sup>
DTF (d)	44.0-97.0	63.0±9.8	64.0	0.6392	0.7745	44.0-93.0	59.4±10.4 <sup>b</sup>	47.0-97.0	65.7±8.5 <sup>a</sup>
DTM (d)	90.0-147.0	122.3±11.9	124.0	-0.5268	1.0577	90.0-146.0	116.1±13.2 <sup>b</sup>	106.0-147.0	127.0±8.1 <sup>a</sup>
HFC (cm)	12.2-211.9	91.1±35.4	96.2	-0.0436	-0.0766	12.2-167.3	73.1±35.3 <sup>b</sup>	24.0-221.9	104.6±28.9 <sup>a</sup>
CZL (cm)	21.6-151.4	77.1±25.8	76.6	0.4991	0.1848	21.6-151.4	82.2±26.3 <sup>a</sup>	28.1-150.8	73.2±24.9 <sup>b</sup>
CL (mm)	19.9-41.8	27.0±2.7	27.0	0.5399	4.7993	19.9-41.8	26.6±3.2 <sup>a</sup>	21.2-33.3	27.2±2.3 <sup>a</sup>
CW (mm)	5.7-13.5	8.0±1.4	7.7	1.6956	3.6576	6.6-13.5	8.5±1.7 <sup>a</sup>	5.7-10.0	7.7±0.9 <sup>b</sup>
1000SW (g)	1.5-4.4	3.0±0.5	3.0	-0.1006	0.0344	1.5-4.3	2.8±0.6 <sup>b</sup>	1.9-4.4	3.1±0.5 <sup>a</sup>

<sup>z</sup>Means with the same superscript letter are not significantly different between continents ( $p < 0.05$ ). SD, standard deviation; DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.

보면, ‘4실 8방’과 ‘3실 6방’이 섞여 있는 형질이 아프리카 원산 자원(약 1.1%)보다 아시아 원산자원(약 8.5%)에서 많았으며, ‘2실 4방’과 ‘3실 6방’이 섞여 있는 형질은 아프리카 원산자원에서 만, ‘2실 4방’과 ‘4실 8방’이 섞여 있는 형질 및 ‘2실 4방’, ‘3실

6방’, ‘4실 8방’이 모두 섞여 있는 형질은 아시아 원산자원에서만 나타났다. 종피색(seed coat color, ScC)의 경우, 전체자원 중 백색 형질(observation: 1)이 약 50.3%으로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 다음으로 담갈색 형질(observation: 3, 약 19.4%),

흑색 형질(observation: 7, 약 15.8%)이 높은 비율을 차지하였다. 그 외에는 갈색(observation: 4) 및 녹색(observation: 8) 형질을 보이는 자원들이 각각 약 7.3%를 차지하였다. 대륙별 종피색의 분포를 보면, 아시아 원산자원은 백색 형질과 흑색 형질이 각각 약 35.2%, 33.8%로 아시아 원산자원의 약 70%를 차지하였으며, 아프리카 원산자원은 백색 형질이 아프리카 원산자원의 약 61.7%를 차지한 반면, 흑색 형질은 약 2.1%로 낮은 비율을 차지하여 아시아 원산자원의 종피색 분포와 차이를 보였다.

양적형질의 조사결과인 Table 3에 따르면, 참깨 유전자원의 개화기(days to flowering, DTF)와 성숙기(days to maturity, DTM)는 각각 44일에서 97일(평균: 63.0일), 90일에서 147일(평균: 122.3일)의 변이를 보였다. 대륙별 개화기와 성숙기를 비교한 결과, 아프리카 원산자원(개화기: 65.7일, 성숙기: 127.0일)이 아시아 원산자원(개화기: 59.4일, 성숙기: 116.1일)보다 개화기와 성숙기의 평균이 길었다( $p < 0.05$ ). 초삭고(height of the first capsule-bearing node, HFC)와 착삭부위장(capsule zone length, CZL)은 각각 12.2 cm에서 211.9 cm (평균: 91.1 cm), 21.6 cm에서 151.4 cm (평균: 77.1 cm)로 매우 큰 변이를 보였다. 대륙별 초삭고와 착삭부위장을 비교한 결과, 초삭고는 아시아 원산자원(평균: 73.1 cm)보다 아프리카 원산자원(평균: 104.6 cm)이, 착삭부위장은 아프리카 원산자원(평균: 73.2 cm)보다 아시아 원산자원(평균: 82.2 cm)이 길었다( $p < 0.05$ ). 삭장(capsule length, CL)과 삭폭(capsule width, CW)은 각각 19.9 mm에서 41.8 mm (평균 27.0 mm), 5.7 mm에서 13.5 mm (평균: 8.0 mm)의 변이를 보였으며, 대륙별 삭장은 아시아 원산자원(평균: 26.6 mm)과 아프리카 원산자원(평균: 27.2 mm)간의 차이가 없었으며, 삭폭은 아시아 원산자원(평균: 8.5 mm)이 아프리카 원산자원(평균: 7.7 mm)보다 길었다( $p < 0.05$ ). 천립중(1000-seed weight, 1000SW)은 1.5 g에서 4.4 g의 변이(평균: 3.0 g)를 보였으며, 대륙별로는 아프리카 원산자원(평균: 3.1 g)이 아시아 원산자원(평균: 2.8 g)보다 천립중이 무거웠다( $p < 0.05$ ).

### 아시아 및 아프리카 원산 참깨 유전자원의 리그난 함량 변이

아시아 및 아프리카 원산 참깨 165자원에 대해 리그난 함량을 분석하고, 원산대륙별 및 원산국별 리그난 함량의 변이를 비교하였다(Table 4, Appendix 4). 분석 결과, 세사민, 세사몰린, 리그난 함량은 각각 0.5 mg/g에서 12.6 mg/g (평균: 3.7 mg/g), 0.1 mg/g에서 3.5 mg/g (평균: 1.6 mg/g), 1.1 mg/g에서 16.1 mg/g (평균: 5.3 mg/g)의 변이를 보였다. 원산대륙별 리그난 함량을 비교한 결과, 아시아와 아프리카 원산자원 간에 세사민, 세사몰린, 리그난 함량의 유의미한 차이가 없었다( $p < 0.05$ ). 원산국별 리그난 함량을 비교한 결과, 세사민 함량은 이집트(3.7 mg/g) 원산자원이 튀르키예(2.6 mg/g) 원산자원보다 높았으며, 세사몰린 함량은 필리핀(2.4 mg/g) 원산자원이 튀르키예(0.6 mg/g) 원산자원보다 높았다( $p < 0.05$ ). 또한, 리그난 함량은 이란(4.9 mg/g), 한국(5.4 mg/g), 대만(5.4 mg/g), 이집트(4.8 mg/g), 모잠비크(6.4 mg/g), 나이지리아(5.8 mg/g), 수단(5.2 mg/g) 원산자원이 튀르키예(3.1 mg/g) 원산자원보다 높았다( $p < 0.05$ ).

### 참깨 농업형질과 리그난 함량 간의 상관관계 분석

참깨 유전자원의 농업형질과 리그난 함량 간의 상관관계 분석결과를 ‘질적형질과 리그난 함량(Table 5)’, ‘양적형질과 리그난 함량(Fig. 1)’, ‘질적형질과 양적형질(Appendix 5)’의 상관관계로 나누어 나타내었다. 질적형질과 리그난 함량 간의 상관관계를 분석한 Table 5에 따르면, 3과성 자원이 1과성 자원보다 높은 세사몰린 함량(1과성: 1.6 mg/g, 3과성: 1.8 mg/g)을 보였으며, 세사민과 리그난 함량은 과성 형질에 따른 함량의 차이가 없었다( $p < 0.05$ ). 실방수에 따른 리그난 함량은 유의미한 차이를 보이지 않았으며, 종피색 형질 중 백색 종피색을 가진 자원이 흑색 종피 자원보다 높은 세사민 함량(백색: 4.1 mg/g, 흑색: 3.1 mg/g)을 보였다( $p < 0.05$ ). 그러나 세사몰린과 리그난 함량은 종피색 형질에 따른 유의미한 차이를 보이지 않았다( $p < 0.05$ ). 양적형질과 리그난 함량 간의 상관관계를 본 Fig. 1에 따르면, 농업형질은 개화기, 성숙기, 초삭고 간에는 높은 양의 상관관계

Table 4. Lignan contents of 165 sesame germplasms including 71 Asia-originated and 94 Africa-originated germplasms

Contents	Germplasm (165)					Asia-originated (71)		Africa-originated (94)	
	Range	Mean±SD	Median	Skewness	Kurtosis	Range	Mean±SD <sup>z</sup>	Range	Mean±SD <sup>z</sup>
Sesamin (mg/g)	0.5-12.6	3.7±1.5	3.67	1.9222	9.7766	0.5-12.6	3.7±1.9 <sup>a</sup>	1.4-6.6	3.6±1.0 <sup>a</sup>
Sesamolins (mg/g)	0.1-3.5	1.6±0.6	1.67	0.2415	0.1785	0.1-3.5	1.7±0.7 <sup>a</sup>	0.5-3.5	1.6±0.6 <sup>a</sup>
Lignan (mg/g)	1.1-16.1	5.3±1.9	5.16	1.6041	7.0335	1.1-16.1	5.4±2.5 <sup>a</sup>	2.5-9.4	5.3±1.3 <sup>a</sup>

<sup>z</sup>Means with the same superscript letter are not significantly different between continents ( $p < 0.05$ ). SD, standard deviation.

Table 5. Lignan contents according to qualitative traits

Qualitative traits	Observations <sup>z</sup>	n	Content (mg/g)		
			Sesamin <sup>y</sup>	Sesamol <sup>y</sup>	Lignan <sup>y</sup>
Number of capsules per axil	1	130	3.7±1.5 <sup>a</sup>	1.6±0.7 <sup>a</sup>	5.3±2.0 <sup>a</sup>
	2	32	3.4±1.0 <sup>a</sup>	1.8±0.4 <sup>b</sup>	5.2±1.3 <sup>a</sup>
	3 <sup>x</sup>	3	4.9±2.0	1.9±1.0	6.8±3.0
Number of locules per capsule	1	154	3.6±1.3 <sup>a</sup>	1.6±0.6 <sup>a</sup>	5.3±1.8 <sup>a</sup>
	4	7	3.7±2.5 <sup>a</sup>	1.8±0.8 <sup>a</sup>	5.5±3.2 <sup>a</sup>
	5 <sup>x</sup>	2	3.6±0.7	1.2±0.2	4.8±0.5
	6 <sup>x</sup>	1	3.6	2.2	5.8
	7 <sup>x</sup>	1	9.8	2.2	12
Seed coat color	1	83	4.1±1.5 <sup>a</sup>	1.8±0.6 <sup>a</sup>	5.8±1.9 <sup>a</sup>
	3	32	3.3±1.6 <sup>ab</sup>	1.5±0.6 <sup>a</sup>	4.8±1.9 <sup>a</sup>
	4	12	3.2±1.0 <sup>ab</sup>	1.3±0.6 <sup>a</sup>	4.5±1.1 <sup>a</sup>
	7	26	3.1±1.1 <sup>b</sup>	1.5±0.5 <sup>a</sup>	4.6±1.4 <sup>a</sup>
	8	12	3.9±1.5 <sup>ab</sup>	1.8±0.8 <sup>a</sup>	5.7±2.1 <sup>a</sup>

<sup>z</sup>Each value follows qualitative trait description in Table 1.

<sup>y</sup>Each value is presented as the mean ± standard deviation, and means with the same superscript letter are not significantly different between observations of qualitative traits (*p* < 0.05).

<sup>x</sup>Observation which is less than 5 accessions was excluded for the test.



Fig. 1. Correlation analysis among quantitative traits and lignan contents. The positive and negative correlation are represented by pink and yellow color, respectively. The correlation is stronger when the hue is darker. Non-significant correlation coefficients (*p* > 0.05) are marked as “X”. DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.

(0.68~0.87)를 보였으며, 착색부위장은 개화기, 성숙기, 초삭고와 모두 음의 상관관계(-0.35~-0.68)를 보였다. 또한, 세사민, 세사몰린, 리그난 함량 간에는 모두 양의 상관관계(0.55~0.96)를 보였다. 농업형질과 리그난 함량 간의 상관관계를 보면, 세사민, 세사몰린, 리그난 함량 모두 개화기, 초삭고와는 양의 상관관계를, 착색부위장, 천립중과는 음의 상관관계를 보였으며, 성숙기, 삭장, 삭폭과는 유의미한 상관관계가 없었다( $p < 0.05$ ). 질적형질과 양적형질 간의 상관관계를 본 Appendix 5에 따르면, 1과성 형질을 가진 자원은 3과성 형질을 가진 자원보다 개화기, 성숙기, 초삭고, 천립중의 평균이 높고, 착색부위장, 삭폭의 평균이 낮았다( $p < 0.05$ ). 2실 4방의 형질을 가진 자원은 ‘4실 8방’과 ‘3실 6방’이 섞여 있는 형질을 가진 자원보다 삭장, 천립중의 평균이 높았으며, 삭폭의 평균이 낮았다( $p < 0.05$ ). 녹색 종피를 가진 자원은 담갈색 종피를 가진 자원보다 개화기, 성숙기, 초삭고의 평균이 높았으며, 담갈색 종피를 가진 자원은 백색 및 녹색 종피를 가진 자원보다 착색부위장의 평균이 높았다( $p < 0.05$ ).

### 참깨 농업형질과 리그난 함량에 대한 주성분 분석

참깨 유전자원의 다양성을 설명하는 주요인을 찾기 위해 양적형질과 리그난 함량에 대한 주성분 분석을 수행했다(Fig. 2, Table 6). 그 결과, 고유값(eigen value)이 1 이상인 주성분은 총 3개였으며, 제1주성분(PC1), 제2주성분(PC2), 제3주성분(PC3)는 각각 전체 변이의 35.8%, 26.1%, 11.7%를 설명하였다(Table 6). 주성분과 농업형질 및 리그난 함량 간의 상관관계를 보면, 제1주성분은 개화기(0.8), 성숙기(0.5), 초삭고(0.8), 세사민 함량(0.6), 세사몰린 함량(0.6), 리그난 함량(0.7)과 양의 상관관계를, 착색부위장(-0.7), 천립중(-0.5)과 음의 상관관계를 보였다. 제2주성분은 개화기(0.5), 성숙기(0.7), 초삭고(0.6), 천립중(0.6)과 양의 상관관계를, 세사민 함량(-0.6), 세사몰린 함량(-0.6), 리그난 함량(-0.6)과 음의 상관관계를 나타내었으며, 제3주성분은 삭장(0.9), 천립중(0.4), 세사민 함량(0.4)과 양의 상관관계를 보였다. 참깨 양적형질 및 리그난 함량 변수에 따른 참깨 유전자원들의 분포를 나타낸 Fig. 2에 따르면, PC1의 양의 방향에 위치한 자원들은 개화기와 성숙기가 길고, 초삭고가 높고, 착색부위장은 짧으며, 천립중이 가볍고, 리그난 함량

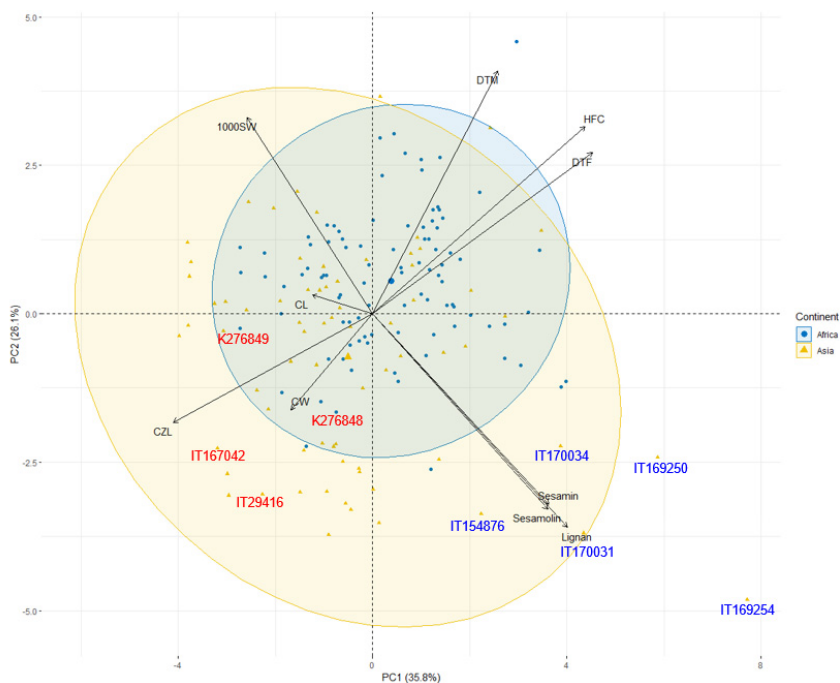


Fig. 2. The biplot of principal component analysis (PCA) of 165 sesame germplasm based on quantitative traits and lignan contents. The accessions indexed as red and blue indicate high-yield and high-lignan candidate accessions, respectively. DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.

Table 6. Principal component analysis of quantitative traits and lignan contents in sesame germplasm, eigen values, and percentage of variation for three principal components

Principal components	PC1	PC2	PC3
Eigen value	3.6	2.6	1.2
Percentage of variance (%)	35.8	26.1	11.7
Cumulative percentage of variance (%)	35.8	61.9	73.6
DTF <sup>z</sup>	0.8	0.5	0.1
DTM <sup>z</sup>	0.5	0.7	0.1
HFC <sup>z</sup>	0.8	0.6	0.1
CZL <sup>z</sup>	-0.7	-0.3	0.1
CL <sup>z</sup>	-0.2	0.1	0.9
CW <sup>z</sup>	-0.3	-0.3	0.2
1000SW <sup>z</sup>	-0.5	0.6	0.4
Sesamin	0.6	-0.6	0.4
Sesamolin	0.6	-0.6	-0.1
Lignan	0.7	-0.6	0.3

<sup>z</sup>DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.

이 높은 특성을 가지며, PC2의 양의 방향에 위치한 자원들은 개화기와 성숙기가 길며, 초삭고가 높고, 천립중이 무겁고, 리그난 함량이 낮은 특성을 가짐을 알 수 있었다. 또한, Fig. 2에서 대륙별로 함께 유전자원을 그룹핑한 결과, 아시아 원산자원이 아프리카 원산자원보다 넓게 그룹 지어져, 농업형질 및 리그난 함량 측면에서 아시아 원산자원의 다양성이 아프리카 원산자원보다 높음을 알 수 있었다.

**참깨 농업형질과 리그난 함량에 대한 군집 분석**

참깨 농업형질과 리그난 함량에 대한 군집 분석을 수행하였다(Fig. 3, Appendix 6). 그 결과, 참깨 유전자원은 각각 67자원(군집 1), 34자원(군집 2), 64자원(군집 3)의 총 3개의 군집으로 나뉘었다. 군집별 농업형질의 특성을 살펴보면, 군집 1은 개화기, 성숙기, 초삭고의 평균이 높고, 착삭부위장, 삭장, 삭폭, 천립중의 평균이 낮은 특성을 보였으며, 군집 2는 개화기, 성숙기, 초삭고, 천립중의 평균이 낮고, 착삭부위장, 삭장, 삭폭, 천립중의 평균이 높은 특성을 보였다. 군집 3은 개화기, 성숙기, 초삭고의 평균이 군집 1과 군집 2의 중간 정도의 수치를 보였으며, 착삭부위장, 삭장, 삭폭, 천립중의 평균이 높았다. 또한, 세사민, 세사몰린, 리그난 함량 모두 군집 1, 2가 군집 3보다 높은 특성을 보였다. 이를 통해, 군집 1은 수량성이 낮고 리그난이 높은 특성을, 군집 2는 수량성이 높고 리그난 함량이 높은 특성을, 군

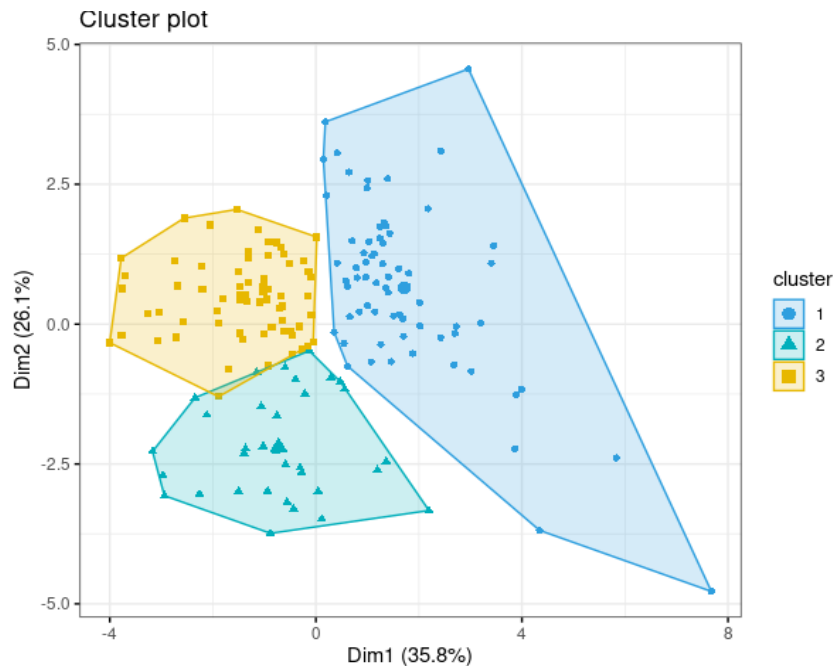


Fig. 3. Clustering of 165 sesame germplasm based on quantitative traits and lignan contents.



집3은 수량성은 군집 1과 3의 중간 정도이며 리그난 함량이 낮은 특성을 지님을 알 수 있었다.

## 고 찰

### 참깨 다수성 및 고리그난 우수자원 발굴

본 연구의 농업형질과 리그난 함량 분석결과를 기반으로 다수성 형질을 가진 자원들과 리그난 함량이 높은 자원들을 선발한 결과는 Table 7과 같다. 다수성 형질 자원은 개화기와 성숙기가 전체자원의 평균인 63.0일, 122.3일보다 짧고, 3과성 형질을 보이며, 초삭고는 전체자원의 평균인 91.1 cm보다 낮고, 착삭부 위장은 전체자원의 평균인 77.1 cm보다 길며, 천립중은 전체자원의 평균인 3.0 g보다 무거운 자원으로 선발하였다. 삭장과 삭폭 형질은 다른 형질들에 비해 참깨 유전자원의 전체 다양성에 영향을 미치는 정도가 적어 제외하였다(Table 6). 그 결과, 총 4자원(IT29416, IT167042, K276848, K276849)이 다수성 후보 자원으로 선발되었다. 고리그난 우수자원은 세사민과 세사몰린의 합인 리그난 함량이 가장 높은 상위 5개 자원으로 선발하였다. 그 결과, 리그난 함량이 9.6 mg/g 이상인 자원인 IT169254 (16.1 mg/g), IT170031 (12.0 mg/g), IT169250 (11.1 mg/g), IT154876 (10.0 mg/g), IT170034 (9.6 mg/g)가 선발되었다. 선발된 우수자원들은 Fig. 2의 PCA biplot에서도 확인할 수 있다.

본 연구에서는 다수성 및 고리그난 참깨 품종 육성에 활용될 수 있는 자원을 발굴하고자 농업유전자원센터에서 보유하고 있는 아시아, 아프리카 원산 참깨 165자원에 대해 농업형질 및 리그난 함량을 평가하였다. 그 결과, 참깨 유전자원은 다양한 농업형질을 나타내었다(Table 2, Table 3). 본 연구에서 평가한 농업형질 변이는 Furat and Uzun (2010)과 Gedifew (2022)의 연구결과보다 높았다. 이는 Furat and Uzun (2010)과 Gedifew (2022)는 각각 터키, 에티오피아 지역에 한정되어 수집된 참깨 유전자원 집단을 평가한 반면에, 본 연구는 아시아 및 아프리카의 다양한 국가에서 수집된 자원을 평가하였기 때문이라고 생각된다. 본 연구에서 세사민과 세사몰린 함량은 각각 0.5 mg/g에서 12.6 mg/g, 0.1 mg/g에서 3.5 mg/g의 넓은 변이를 나타내었으며(Table 4), 해당 결과는 Morris *et al.* (2021) (세사민: 0.55–8.98 mg/g, 세사몰린: 1.04–6.30 mg/g), Rangkadilok *et al.* (2010) (세사민: 0–7.3 mg/g, 세사몰린: 0–2.5 mg/g), Wang *et al.* (2013) (세사민: 0.82–11.05 mg/g, 세사몰린: 1.35–6.96 mg/g)의 변이폭과 유사하였다.

참깨 유전자원의 농업형질은 원산지 대륙에 따라 분포 및 평균의 차이를 보였다(Table 2, Table 3). 특히, 본 연구에서는 개화기 및 성숙기가 아시아 원산자원보다 아프리카 원산자원에서

Table 7. Selected sesame germplasm with high-yield agronomic traits and high-lignan contents

High-yield agronomic traits (4)	DTF (< 63.0 days)	DTM (< 122.3 days)	NCPA <sup>z</sup> (= 2)	HFC (< 91.1 cm)	CZL (> 77.1 cm)	1000SW (> 3.0 g)
IT29416	49	97	2	31.6	90.2	3.1
IT167042	47	106	2	29.0	143.3	3.1
K276848	54	121	2	57.8	127.4	3.3
K276849	49	121	2	24.0	104.4	3.3
High-lignan contents (5)	Sesamin <sup>y</sup> (mg/g)	Sesamol <sup>y</sup> (mg/g)	Lignan <sup>y</sup> (≥ 9.6 mg/g)			
IT169254	12.6±0.2	3.4±0.1	16.1±0.2			
IT170031	9.8±0.1	2.2±0.01	12.0±0.1			
IT169250	7.9±0.3	3.2±0.1	11.1±0.4			
IT154876	7.1±0.2	2.9±0.1	10.0±0.2			
IT170034	7.0±0.1	2.5±0.04	9.6±0.1			

<sup>z</sup>Each value follows qualitative trait description in Table 1.

<sup>y</sup>Each value is presented as the mean ± standard deviation.

DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; NCPA, number of capsules per axil; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; 1000SW, 1000-seed weight.

길었는데, 이러한 대륙별 개화기 및 성숙기 차이는 참깨 자원들이 대륙별 재배 환경에 적응한 결과로 생각된다. 참깨는 단일조건(광: 10시간, 암: 14시간)에서 개화가 촉진되는 전형적인 단일식물(short-day plant)이나, 다양한 위도의 지역에서 재배되면서 해당 지역의 일장에 적응하는 자원들이 선발 및 재배되어 왔다(Kumazaki *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2018). 이와 같이, 아시아 및 아프리카 원산 참깨 유전자원들은 각 대륙 위도의 일장에서 적응하도록 재배되어왔을 것이며, 아프리카 대륙은 아시아 대륙보다 상대적으로 위도가 낮다. 따라서, 저위도의 단일조건에 적응한 아프리카 원산자원이 상대적으로 고위도인 한국의 장일 조건에서 개화가 미루어졌고, 이로 인해 성숙기도 미루어졌음을 추론해볼 수 있다. 참깨의 개화기, 식물구조, 수량 간의 관계를 연구한 Sabag *et al.* (2021)에서는 개화기가 길어질수록 영양생장 기간이 길어져 초장(plant height), 초삭고가 길어지고, 식물체당 분지수가 많아지는 반면, 생식지수(reproductive index, 초장대비 꼬투리를 생산할 수 있는 주경 길이의 비율), 식물체당 종자수량, 식물체당 종자수, 천립중이 낮아짐을 보여 주었다. 이러한 개화기 및 식물구조 간의 관계성은 본 연구결과와 부분적으로 일치하였다. Table 3에 따르면, 개화기가 상대적으로 길었던 아프리카 원산자원이 아시아 원산자원에 비해 초삭고는 길고, 착삭부위장은 짧아 Sabag *et al.* (2021)의 결과와 일치하였으나, 천립중은 아프리카 원산자원이 아시아 원산자원보다 무거워 Sabag *et al.* (2021)의 결과와 일치하지 않았다. 이러한 결과의 차이는 본 연구에서 사용한 참깨 유전자원 집단의 농업형질 간의 상관관계와 관련이 있다고 생각된다. 농업형질 간의 상관관계를 분석한 Fig. 1에 따르면, ‘개화기-초삭고’ 간에는 양의 상관관계(0.87)를, ‘개화기-착삭부위장’ 간에는 음의 상관관계(-0.68)를 보이며, ‘개화기-천립중’ 간의 상관관계는 통계적으로 유의하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 참깨 유전자원 집단에서 개화기와 천립중 간의 상관관계가 유의하지 않았기에, 개화기에 따른 천립중의 경향성이 Sabag *et al.* (2021)과 달랐을 것이라고 생각된다. 또한, 리그난 함량은 농업형질과 다르게 대륙별 차이를 보이지 않았는데(Table 4), 이러한 결과는 아시아, 아프리카 및 아메리카 원산 대륙별 리그난 함량의 차이가 없었다는 Andargie *et al.* (2021)과 유사했다. 이는 오랜 기간 전세계적으로 재배된 참깨 유전자원들이 무역 등을 통해 이동되면서 대륙간의 차이가 적어졌기 때문이라고 생각된다.

참깨 유전자원의 질적형질과 리그난 함량 간의 상관관계 분석 결과, 과성에 따른 세사몰린 함량 및 종피색에 따른 세사민

함량이 상관관계가 있음을 알 수 있었다(Table 5). 특히, 종피색과 관련하여 본 연구에서는 백색 종피 자원이 흑색 종피 자원보다 세사민 함량이 높았으며, 다른 종피색 간에는 유의미한 차이가 없었다. 해당 결과는 종피색과 리그난 함량 간에 상관관계를 분석한 Kim *et al.* (2014)의 결과와 부분적으로 일치하였다. Kim *et al.* (2014)은 백색, 노란색, 갈색, 흑색 종피 자원별 세사민, 세사몰린, 리그난 함량을 비교한 결과, 세사민 함량과 리그난 함량은 백색, 갈색, 흑색 종피 자원 순서대로 고함량이었고, 세사몰린 함량은 백색 종피 자원이 흑색 종피 자원보다 높다고 보고하였다. 반면에, Dar *et al.* (2019)는 흑색 종피 자원이 백색, 갈색 종피 자원보다 세사민, 세사몰린, 리그난 함량이 높았다고 보고하였다. 이와 같이, 종피색에 따른 리그난 함량의 경향성은 분석하는 참깨 집단에 따라 차이가 있어, 종피색 형질과 리그난 함량 간에는 고도로 유의한 상관관계를 가지지 않는다고 생각된다. 또한, 양적형질과 리그난 함량 간의 상관관계 분석 결과(Fig. 1)에 따르면, 리그난 함량이 높은 자원들은 개화기가 길고, 초삭고는 높은 반면에, 착삭부위장은 짧고, 천립중이 가벼운 경향이 있어, 리그난 함량과 수량성 관련 농업형질들이 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 참깨 리그난 함량과 수량과의 상관관계를 분석한 Kim *et al.* (2014)에서도 리그난 함량과 수량 간에는 음의 상관관계가 있다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 다수성 농업형질을 지닌 자원과 리그난 고함유 자원들을 각각 선발하였으며(Table 7), 선발된 자원들은 다수성 및 고리그난 참깨 품종 육성 시 육종소재로 활용될 수 있을 것이다.

## 적 요

본 연구에서는 다수성 및 고리그난 참깨 품종 육성에 활용될 수 있는 자원을 발굴하고자 아시아 및 아프리카 원산 참깨 165자원을 대상으로 농업형질 조사와 리그난 함량 분석을 수행하였다. 그 결과, 참깨 유전자원은 다양한 농업형질을 보였으며, 세사민, 세사몰린, 리그난 함량은 각각 0.5~12.6 mg/g, 0.1~3.5 mg/g, 1.1~16.1 mg/g의 높은 변이를 보였다. 대륙 원산에 따른 농업형질을 분석한 결과, 대부분의 농업형질이 아시아 원산자원과 아프리카 원산자원 간에 차이를 나타냈다. 아시아 원산자원이 아프리카 원산자원에 비해 개화기와 성숙기가 짧고, 초삭고가 낮고, 착삭부위장이 길며, 천립중이 가벼운 특성을 보였다. 그러나 대륙 원산에 따른 리그난 함량의 차이는 보이지 않았다. 농업형질과 리그난 함량 간의 상관관계를 분석한 결과, 리그난 함량은 개화기, 초삭고 형질과 양의 상관관계를, 착삭부위

장, 천립중 형질과 음의 상관관계를 보여, 수량성 관련 농업형질과 리그난 함량은 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 농업형질과 리그난 함량에 대한 주성분 분석결과, 세 개의 주성분이 전체 변이의 73.6%를 설명하였다. 대부분의 농업형질과 리그난 함량이 세 개의 주성분과 높은 상관관계를 보여, 본 연구에서 평가한 농업형질 및 리그난 함량은 참깨 165자원의 다양성을 설명하는 주요인으로 판단되었다. 또한, 농업형질과 리그난 함량에 대한 군집 분석 결과, 수량성이 낮고 리그난이 높은 군집 1 (67자원), 수량성이 높고 리그난 함량이 높은 군집 2 (34자원), 수량성이 군집 1과 3의 중간 정도이며 리그난 함량이 낮은 군집 3 (64자원)으로 나눌 수 있었다. 최종적으로, 참깨 165자원에 대한 농업형질 및 리그난 함량 분석 결과를 기반으로 다수성(IT29416, IT167042, K276848, K276849) 및 고리그난(IT169254, IT170031, IT169250, IT154876, IT170034) 우수자원을 각각 발굴하였다. 선발된 우수자원은 다수성 및 고리그난 참깨 품종 육성 시 유용한 육종소재로 활용될 것으로 기대된다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01422701)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

## References

Agidew, M.G., A.A. Dubale, M. Atlabachew and W. Abebe. 2021. Fatty acid composition, total phenolic contents and antioxidant activity of white and black sesame seed varieties from different localities of Ethiopia. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 8:14.

Andargie, M., M. Vinas, A. Rathgeb, E. Möller and P. Karlovsky. 2021. Lignans of Sesame (*Sesame indicum* L.): A Comprehensive Review. *Molecules* 26(4):883.

Ashri, A. 1998. Sesame breeding. *Plant Breed. Rev.* 16:179-228.

Bedigian, D. and J.R. Harlan. 1986. Evidence for cultivation of sesame in the ancient world. *Econ. Bot.* 40:137-154.

Borchani, C., S. Besbes, C.H. Blecker and H. Attia. 2010. Chemical characteristics and oxidative stability of sesame seed, sesame paste, and olive oils. *J. Agr. Sci. Tech.* 12:585-

596.

Dar, A.A., P.K. Kancharla, K. Chandra, Y.S. Sodhi and N. Arumugam. 2019. Assessment of variability in lignan and fatty acid content in the germplasm of *Sesame indicum* L. *J. Food Sci. Technol.* 56(2):976-986.

Dossa, K., D. Diouf, L. Wang, X. Wei, Y. Zhang, M. Niang, D. Fonceka, J. Yu, M.A. Mmadi, L.W. Yehouessi, B. Liao, X. Zhang and N. Cisse. 2017. The emerging oilseed crop *Sesame indicum* Enters the “Omics” era. *Front. Plant Sci.* 8:1154.

Dossou, S.S.K., X. Fang-tao, K. Dossa, Z. Rong, Z. Ying-zhong and W. Lin-hai. 2023. Antioxidant lignans sesamin and sesamol in sesame (*Sesame indicum* L.): A comprehensive review and future prospects. *J. Integr. Agric.* 22(1):14-30.

FAOSTAT. 2021. Crops and Livestock Products. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (accessed on 7 March 2023).

Furat, S. and B. Uzun. 2010. The use of agro-morphological characters for the assessment of genetic diversity in sesame (*Sesame indicum* L.). *Plant Omics* 3(3):85-91.

Gandhi, A.P. 2009. Simplified process for the production of sesame seed (*Sesame indicum* L) butter and its nutritional profile. *As. J. Food Ag-Ind.* 2(1):24-27.

Gedifew, S. 2022. Characterization and evaluation of sesame (*Sesame indicum* L.) accessions. *I.J.A.N.S.* 15(3):226-239.

IPGRI and NBPGR. 2004. Descriptors for Sesame (*Sesame* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy and National Bureau of Plant Genetic Resources, New Delhi, India. pp. 1-63.

Jung, T.D., J.M. Kim, S.I. Choi, S.H. Choi, B.Y. Cho, J.H. Lee, S.J. Lee, S.J. Park, I.Y. Heo and O.H. Lee. 2017. Method validation for determination of lignan content in fermented sesame by bioconversion. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 46(5):646-652 (in Korean).

Kim, H.M., J.M. Lee, J.Y. Park, S. Lee, S. Han, H.Y. Kim, D. Son, S.Y. Choi and S. Lee. 2008. Phytosterols and lignans from the sesame dregs of *Sesame indicum*. *Korean J. Plant Res.* 21(6):420-426.

Kim, S.U., K.W. Oh, M.H. Lee, B.K. Lee, S.B. Pae, C.D. Hwang, M.S. Kim, I.Y. Baek and J.D. Lee. 2014. Variation of lignan content for sesame seed across origin and growing environments. *Korean J. Crop Sci.* 59(2):151-161 (in Korean).

Kumazaki, T., Y. Yamada, S. Karaya, T. Tokumitsu, T. Hirano, S. Yasumoto, K. Katsuta and H. Michiyama. 2008. Effects of day length and air temperature on stem growth and flowering

- in sesame. *Plant Prod. Sci.* 11(2):178-183.
- Morris, J.B., M.L. Wang and B.D. Tonniss. 2021. Variability for oil, protein, lignan, tocopherol, and fatty acid concentrations in eight sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Ind. Crops Prod.* 164:113355.
- Rangkadilok, N., N. Pholphana, C. Mahidol, W. Wongyai, K. Saengsooksree, S. Nookabkaew and J. Satayavivad. 2010. Variation of sesamin, sesamol and tocopherols in sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds and oil products in Thailand. *Food Chem.* 122(3):724-730.
- Sabag, I., G. Morota and Z. Peleg. 2021. Genome-wide association analysis uncovers the genetic architecture of tradeoff between flowering date and yield components in sesame. *BMC Plant Biol.* 21:549.
- Teklu, D.H., H. Shimelis and S. Abady. 2022. Genetic improvement in sesame (*Sesamum indicum* L.): Progress and outlook: A review. *Agronomy* 12:2144.
- Wang, L., Y. Zhang, P. Li, W. Zhang, X. Wang, X. Qi and X. Zhang. 2013. Variation of sesamin and sesamol contents in sesame cultivars from China. *Pak. J. Bot.* 45(1):177-182.
- Wei, X., K. Liu, Y. Zhang, Q. Feng, L. Wang, Y. Zhao, D. Li, Q. Zhao, X. Zhu, X. Zhu, W. Li, D. Fan, Y. Gao, Y. Lu, X. Zhang, X. Tang, C. Zhou, C. Zhu, L. Liu, R. Zhong, Q. Tian, Z. Wen, Q. Weng, B. Han, X. Huang and X. Zhang. 2015. Genetic discovery for oil production and quality in sesame. *Nat. Commun.* 6:8609.
- Wu, D., X.P. Wang and W. Zhang. 2019. Sesamol exerts anti-proliferative and apoptotic effect on human colorectal cancer cells via inhibition of JAK2/STAT3 signaling pathway. *Cell. Mol. Biol.* 65(6):96-100.
- Yol, E., M. Basak, S. Kızıl, S.J. Lucas and B. Uzun. 2021. A high-density SNP genetic map construction using ddRAD-seq and mapping of capsule shattering trait in sesame. *Front. Plant Sci.* 12:679659.
- Zhou, R., P. Liu, D. Li, X. Zhang and X. Wei. 2018. Photoperiod response-related gene *SiCOL1* contributes to flowering in sesame. *BMC Plant Biol.* 18:343.

(Received 10 March 2023 ; Revised 17 May 2023 ; Accepted 17 May 2023)

Appendix 1. List of 165 sesame accessions used in this study

Asia continent	
Country of origin (9)	Accession No. (71)
Islamic Republic of Iran	IT169600
	IT169616
	IT169728
	IT169746
	IT169747
	IT169750
	IT169756
	IT169758
	IT169945
	IT169947
Japan	IT28914
	IT169575
	IT169578
	IT169800
	IT169801
Kingdom of Thailand	IT137587
	IT137589
	IT137594
	IT154876
	IT170031
	IT170033
People's Republic of China	IT170034
	IT169337
	IT169365
Republic of India	IT170020
	IT169131
	IT169441
	IT169442
	IT169457
	IT169512
	IT28892
	IT29100
	IT29416
	Republic of Korea
K276839	
K276840	
IT29469	
IT29940	

## Appendix 1. Continued

Asia continent	
Country of origin (9)	Accession No. (71)
Republic of Korea	IT29971
	IT103159
	IT103367
	IT103957
	IT104246
	IT104927
	IT105793
	IT113593
	K276841
	K276842
	IT160628
Republic of the Philippines	IT169250
	IT169251
	IT169254
	IT169255
Republic of Türkiye	IT169236
	IT169244
	IT169248
	IT169406
	IT169420
	IT169643
Taiwan, Province of China	IT30449
	IT146141
	IT146142
	IT146143
	IT166731
	IT166733
	IT166734
	IT167042
	IT169626
	IT169627
IT169628	
IT169629	
Africa continent	
Country of origin (6)	Accession No. (94)
Arab Republic of Egypt	IT165634
	IT169148

Appendix 1. Continued

Africa continent	
Country of origin (6)	Accession No. (94)
Arab Republic of Egypt	IT169149
	IT169152
	IT169155
	IT169156
	IT169160
	IT169172
	IT169174
	IT169177
	IT169180
	IT169211
	IT169212
	IT169213
	IT169214
	IT169215
	IT169216
	IT169223
	IT169224
	IT169230
	IT169231
	IT169731
	IT169734
	IT169735
	IT169740
IT169743	
Ethiopia	IT169579
	IT169614
	IT169615
Federal Republic of Nigeria	IT169532
	IT169533
	IT169534
	IT169997
	IT169998
	IT169999
	IT170000
	IT170001
IT170002	
IT170003	

Appendix 1. Continued

Africa continent	
Country of origin (6)	Accession No. (94)
Federal Republic of Nigeria	IT170004
	IT170006
	IT170008
	IT170009
	IT170011
	IT170012
	IT170013
	IT170014
	K276847
	K276848
	IT170016
	IT170017
	IT170018
IT170019	
Republic of Mozambique	IT169622
	IT169623
	IT169624
	IT169625
	IT169725
	IT169726
	IT169727
Republic of the Sudan	IT170030
	IT170077
	IT170078
	IT170079
	IT170080
	IT170081
	IT170082
	IT170083
	IT170084
	K276849
	K276850
	IT170094
	IT170100
	IT170102
IT170103	
IT170104	



Appendix 1. Continued

Africa continent	
Country of origin (6)	Accession No. (94)
	IT170106
	IT170107
	IT170108
	IT170109
	IT170110
	IT170111
Republic of the Sudan	IT170114
	IT170115
	IT170122
	IT170123
	K276851
	K276852
	IT170134
	IT170135
	IT167146
The Republic of Kenya	K276843
	K276844
	IT167148

Appendix 2. Qualitative traits of 165 sesame germplasms based on countries of origin

Qualitative traits	Observation <sup>z</sup>	Asia continent (71)										Africa continent (94)																						
		CHN	IND	IRN	JPN	KOR	PHL	THA	TUR	TWN	EGY	ETH	KEN	MOZ	NGA	SDN																		
		(3)	(5)	(10)	(5)	(19)	(4)	(7)	(6)	(12)	(26)	(3)	(4)	(7)	(24)	(30)																		
Number of capsules per axil	1	0.8	5	3.8	10	7.7	2	1.5	11	8.5	4	3.1	5	3.8	6	4.6	4	3.1	24	18.5	2	1.5	4	3.1	5	3.8	18	13.8	29	22.3				
	2	6.3	0	0.0	0	0.0	3	9.4	8	25.0	0	0.0	1	3.1	0	0.0	7	21.9	1	3.1	1	3.1	1	3.1	0	0.0	2	6.3	6	18.8	1	3.1		
	3	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	33.3	0	0.0	1	33.3	1	33.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
Number of locules per capsule	1	1.3	5	3.2	10	6.5	5	3.2	15	9.7	2	1.3	6	3.9	6	3.9	6	3.9	12	7.8	24	15.6	3	1.9	4	2.6	7	4.5	23	14.9	30	19.5		
	2	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	3	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	4	14.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	42.9	2	28.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	14.3	0	0.0		
	5	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	100.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	100.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	7	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	100.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
Seed coat color	1	2.4	1	1.2	1	1.2	0	0.0	10	12.0	3	3.6	2	2.4	0	0.0	6	7.2	17	20.5	0	0.0	0	0.0	2	2.4	4	4.8	16	19.3	19	22.9		
	2	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	3	0.0	0	0.0	2	6.3	3	9.4	5	15.6	0	0.0	1	3.1	3	9.4	0	0.0	8	25.0	2	6.3	1	3.1	0	0.0	1	3.1	0	0.0	1	3.1	6	18.8
	4	0.0	0	0.0	3	25.0	1	8.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	25.0	0	0.0	0	0.0	1	8.3	1	8.3	1	8.3	1	8.3	1	8.3	1	8.3		
	5	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	7	3.8	4	15.4	4	15.4	0	0.0	4	15.4	1	3.8	4	15.4	0	0.0	6	23.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	3.8	1	3.8	0	0.0		
	8	0.0	0	0.0	0	0.0	1	8.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	8.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	8.3	5	41.7	4	33.3		

<sup>z</sup>Each value follows qualitative trait description in Table 1.

CHN, People's Republic of China; IND, Republic of India; IRN, Islamic Republic of Iran; JPN, Japan; KOR, Republic of Korea; PHL, Republic of the Philippines; THA, Kingdom of Thailand; TUR, Republic of Türkiye; TWN, Taiwan Province of China; EGY, Arab Republic of Egypt; ETH, Ethiopia; KEN, The Republic of Kenya; MOZ, Republic of Mozambique; NGA, Federal Republic of Nigeria; SDN, Republic of the Sudan.

Appendix 3. Quantitative traits of 165 sesame germplasms based on countries of origin

Quantitative traits	Asia continent (71)										Africa continent (94)									
	CHN (3)	IND (5)	IRN (10)	JPN (5)	KOR (19)	PHL (4)	THA (7)	TUR (6)	TWN (12)	EGY (26)	ETH (3)	KEN (4)	MOZ (7)	NGA (24)	SDN (30)					
DTF <sup>z</sup> (d)	58.7± 5.7 <sup>b</sup>	62.6± 5.8 <sup>ab</sup>	64.6± 4.4 <sup>ab</sup>	53.4± 10.5 <sup>b</sup>	53.7± 3.3 <sup>b</sup>	83.3± 13.7 <sup>a</sup>	69.0± 9.8 <sup>ab</sup>	49.3± 3.9 <sup>b</sup>	57.2± 7.4 <sup>b</sup>	59.7± 5.3 <sup>b</sup>	73.7± 19.0 <sup>ab</sup>	69.0± 18.8 <sup>ab</sup>	66.7± 8.6 <sup>ab</sup>	66.3± 7.0 <sup>ab</sup>	69.0± 6.5 <sup>ab</sup>					
DTM <sup>z</sup> (d)	123.7± 2.3 <sup>ab</sup>	129.6± 9.2 <sup>a</sup>	121.3± 4.4 <sup>ab</sup>	115.2± 11.0 <sup>ab</sup>	102.7± 11.0 <sup>b</sup>	136.5± 9.1 <sup>a</sup>	122.3± 11.8 <sup>ab</sup>	116.5± 5.0 <sup>ab</sup>	115.1± 10.2 <sup>ab</sup>	121.8± 5.0 <sup>ab</sup>	124.0± 0.0 <sup>ab</sup>	128.8± 12.4 <sup>a</sup>	128.1± 10.7 <sup>a</sup>	128.7± 8.3 <sup>a</sup>	130.0± 7.4 <sup>a</sup>					
HFC <sup>z</sup> (cm)	79.6± 37.7 <sup>ab</sup>	91.4± 21.9 <sup>ab</sup>	97.3± 20.7 <sup>ab</sup>	43.7± 36.9 <sup>b</sup>	51.8± 16.5 <sup>b</sup>	130.5± 42.0 <sup>a</sup>	106.4± 20.5 <sup>ab</sup>	41.5± 14.6 <sup>b</sup>	67.0± 32.6 <sup>ab</sup>	87.8± 18.9 <sup>ab</sup>	103.9± 50.8 <sup>ab</sup>	115.2± 65.6 <sup>ab</sup>	119.1± 33.5 <sup>a</sup>	102.4± 27.2 <sup>ab</sup>	116.4± 21.5 <sup>a</sup>					
CZL <sup>z</sup> (cm)	73.7± 10.2 <sup>a</sup>	68.8± 18.3 <sup>a</sup>	83.1± 29.6 <sup>a</sup>	105.7± 38.3 <sup>a</sup>	85.2± 11.1 <sup>a</sup>	69.2± 13.2 <sup>a</sup>	51.1± 28.3 <sup>a</sup>	111.4± 14.7 <sup>a</sup>	82.3± 26.8 <sup>a</sup>	82.0± 19.1 <sup>a</sup>	56.3± 30.5 <sup>a</sup>	78.8± 37.6 <sup>a</sup>	73.2± 40.7 <sup>a</sup>	73.1± 28.4 <sup>a</sup>	66.7± 18.5 <sup>a</sup>					
CL <sup>z</sup> (mm)	9.1 <sup>a</sup>	2.0 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>	3.1 <sup>a</sup>	2.5 <sup>a</sup>	3.6 <sup>a</sup>	2.9 <sup>a</sup>	1.3 <sup>a</sup>	2.0 <sup>a</sup>	2.5 <sup>a</sup>	1.5 <sup>a</sup>	1.2 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>	2.3 <sup>a</sup>	2.2 <sup>a</sup>					
CW <sup>z</sup> (mm)	8.1± 0.7 <sup>abc</sup>	7.6± 0.8 <sup>abc</sup>	7.6± 0.8 <sup>abc</sup>	9.1± 2.0 <sup>abc</sup>	9.6± 2.2 <sup>abd</sup>	9.7± 2.6 <sup>abc</sup>	7.2± 0.6 <sup>c</sup>	7.7± 0.4 <sup>abc</sup>	8.3± 1.1 <sup>abc</sup>	8.4± 0.8 <sup>ab</sup>	7.9± 0.6 <sup>abc</sup>	8.3± 0.9 <sup>abc</sup>	8.2± 1.0 <sup>abc</sup>	7.6± 0.9 <sup>abc</sup>	7.1± 0.6 <sup>cd</sup>					
1000SW <sup>z</sup> (g)	2.9± 0.4 <sup>ab</sup>	3.5± 0.1 <sup>a</sup>	3.1± 0.3 <sup>ab</sup>	2.9± 0.4 <sup>ab</sup>	2.6± 0.3 <sup>ab</sup>	2.4± 1.0 <sup>ab</sup>	2.2± 0.5 <sup>b</sup>	3.5± 0.8 <sup>a</sup>	2.9± 0.2 <sup>ab</sup>	3.3± 0.4 <sup>a</sup>	3.0± 0.4 <sup>ab</sup>	3.7± 0.5 <sup>a</sup>	3.0± 0.4 <sup>ab</sup>	2.8± 0.4 <sup>ab</sup>	2.9± 0.3 <sup>ab</sup>					

<sup>z</sup>Each value is presented as the mean ± standard deviation, and means with the same superscript letter are not significantly different between countries of origin ( $p < 0.05$ ). DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight; CHN, People's Republic of China; IND, Republic of India; IRN, Islamic Republic of Iran; JPN, Japan; KOR, Republic of Korea; PHL, Republic of the Philippines; THA, Kingdom of Thailand; TUR, Republic of Türkiye; TWN, Taiwan Province of China; EGY, Arab Republic of Egypt; ETH, Ethiopia; KEN, The Republic of Kenya; MOZ, Republic of Mozambique; NGA, Federal Republic of Nigeria; SDN, Republic of the Sudan.

Appendix 4. Lignan contents of 165 sesame germplasms based on countries of origin

Contents	Asia continent (71)										Africa continent (94)					
	CHN (3)	IND (5)	IRN (10)	JPN (5)	KOR (19)	PHL (4)	THA (7)	TUR (6)	TWN (12)	EGY (26)	ETH (3)	KEN (4)	MOZ (7)	NGA (24)	SDN (30)	
Sesamin <sup>z</sup> (mg/g)	4.0± 0.7 <sup>ab</sup>	2.3± 1.2 <sup>ab</sup>	3.7± 1.0 <sup>ab</sup>	2.6± 0.9 <sup>ab</sup>	3.5± 1.6 <sup>ab</sup>	7.3± 4.0 <sup>ab</sup>	5.3± 2.7 <sup>ab</sup>	2.6± 0.5 <sup>b</sup>	3.5± 0.7 <sup>ab</sup>	3.7± 0.7 <sup>a</sup>	2.9± 0.8 <sup>ab</sup>	3.4± 0.7 <sup>ab</sup>	4.6± 1.3 <sup>ab</sup>	3.8± 1.2 <sup>ab</sup>	3.4± 0.9 <sup>ab</sup>	
Sesamolin <sup>z</sup> (mg/g)	2.1± 0.5 <sup>ab</sup>	1.2± 0.3 <sup>ab</sup>	1.3± 0.3 <sup>ab</sup>	1.4± 1.0 <sup>ab</sup>	1.9± 0.6 <sup>ab</sup>	2.4± 1.1 <sup>a</sup>	2.1± 0.6 <sup>ab</sup>	0.6± 0.2 <sup>b</sup>	1.9± 0.4 <sup>ab</sup>	1.1± 0.4 <sup>ab</sup>	1.6± 0.1 <sup>ab</sup>	1.1± 0.4 <sup>ab</sup>	1.8± 0.5 <sup>ab</sup>	2.0± 0.4 <sup>ab</sup>	1.8± 0.4 <sup>ab</sup>	
Lignan <sup>z</sup> (mg/g)	6.1± 1.1 <sup>ab</sup>	3.4± 1.4 <sup>ab</sup>	4.9± 1.0 <sup>a</sup>	4.0± 1.6 <sup>ab</sup>	5.4± 2.2 <sup>a</sup>	9.6± 5.0 <sup>ab</sup>	7.3± 3.2 <sup>ab</sup>	3.1± 0.5 <sup>b</sup>	5.4± 0.9 <sup>a</sup>	4.8± 0.9 <sup>a</sup>	4.5± 0.8 <sup>ab</sup>	4.5± 0.9 <sup>ab</sup>	6.4± 1.7 <sup>a</sup>	5.8± 1.6 <sup>a</sup>	5.2± 1.0 <sup>a</sup>	

<sup>z</sup>Each value is presented as the mean ± standard deviation, and means with the same superscript letter are not significantly different between countries of origin ( $p < 0.05$ ). CHN, People's Republic of China; IND, Republic of India; IRN, Islamic Republic of Iran; JPN, Japan; KOR, Republic of Korea; PHL, Republic of the Philippines; THA, Kingdom of Thailand; TUR, Republic of Türkiye; TWN, Taiwan Province of China; EGY, Arab Republic of Egypt; ETH, Ethiopia; KEN, The Republic of Kenya; MOZ, Republic of Mozambique; NGA, Federal Republic of Nigeria; SDN, Republic of the Sudan.

Appendix 5. Quantitative traits according to qualitative traits

Qualitative traits	Observations <sup>z</sup>	n	Quantitative traits							
			DTF <sup>y</sup> (d)	DTM <sup>y</sup> (d)	HFC <sup>y</sup> (cm)	CZL <sup>y</sup> (cm)	CL <sup>y</sup> (mm)	CW <sup>y</sup> (mm)	1000SW <sup>y</sup> (g)	
Number of capsules per axil	1	130	65.4±9.3 <sup>a</sup>	124.2±11.5 <sup>a</sup>	101.2±30.4 <sup>a</sup>	71.9±23.3 <sup>b</sup>	26.9±2.5 <sup>a</sup>	7.9±1.2 <sup>b</sup>	3.0±0.5 <sup>a</sup>	
	2	32	53.9±6.0 <sup>b</sup>	114.6±10.5 <sup>b</sup>	51.4±25.5 <sup>b</sup>	97.6±25.9 <sup>a</sup>	27.3±3.4 <sup>a</sup>	8.8±1.8 <sup>a</sup>	2.8±0.3 <sup>b</sup>	
	3 <sup>x</sup>	3	57.3±2.9	123.7±2.1	77.0±6.0	81.7±12.9	26.1±2.2	8.2±0.9	3.0±0.4	
Number of locules per capsule	1	154	62.9±9.4 <sup>a</sup>	122.5±11.7 <sup>a</sup>	91.6±34.6 <sup>a</sup>	77.3±26.3 <sup>a</sup>	27.1±2.6 <sup>a</sup>	7.9±1.1 <sup>b</sup>	3.0±0.5 <sup>a</sup>	
	4	7	67.7±16.5 <sup>a</sup>	124.9±12.0 <sup>a</sup>	87.7±48.9 <sup>a</sup>	74.5±14.6 <sup>a</sup>	23.2±2.4 <sup>b</sup>	11.2±1.7 <sup>a</sup>	2.4±0.3 <sup>b</sup>	
	5 <sup>x</sup>	2	59.0±5.0	119.5±6.5	85.0±5.8	76.3±18.5	27.9±0.3	8.0±1.0	3.1±0.6	
	6 <sup>x</sup>	1	49.0	97.0	31.6	90.2	26.6	13.4	3.1	
	7 <sup>x</sup>	1	65.0	113.0	111.6	46.4	26.2	6.8	1.8	
Seed coat color	1	83	63.9±9.0 <sup>ab</sup>	122.6±12.1 <sup>ab</sup>	93.8±31.5 <sup>ab</sup>	73.4±22.8 <sup>b</sup>	27.1±2.9 <sup>a</sup>	7.9±1.2 <sup>a</sup>	2.9±0.5 <sup>a</sup>	
	3	32	58.2±9.7 <sup>b</sup>	117.8±9.8 <sup>b</sup>	73.4±36.2 <sup>b</sup>	89.8±26.9 <sup>a</sup>	27.2±2.1 <sup>a</sup>	8.5±2.0 <sup>a</sup>	3.0±0.5 <sup>a</sup>	
	4	12	63.2±13.5 <sup>ab</sup>	126.0±11.4 <sup>ab</sup>	98.5±49.2 <sup>ab</sup>	81.8±30.0 <sup>ab</sup>	27.5±1.6 <sup>a</sup>	8.0±0.6 <sup>a</sup>	3.3±0.6 <sup>a</sup>	
	7	26	63.4±9.7 <sup>ab</sup>	121.3±12.3 <sup>ab</sup>	90.7±32.5 <sup>ab</sup>	75.2±28.3 <sup>ab</sup>	25.8±2.9 <sup>a</sup>	7.9±1.1 <sup>a</sup>	2.9±0.4 <sup>a</sup>	
	8	12	68.5±5.1 <sup>a</sup>	131.1±7.8 <sup>a</sup>	112.8±25.3 <sup>a</sup>	68.0±17.5 <sup>b</sup>	27.0±2.6 <sup>a</sup>	8.1±1.1 <sup>a</sup>	3.2±0.5 <sup>a</sup>	

<sup>z</sup>Each value follows qualitative trait description in Table 1.

<sup>y</sup>Each value is presented as the mean ± standard deviation, and means with the same superscript letter are not significantly different between observations of qualitative traits ( $p < 0.05$ ).

<sup>x</sup>Observation which is less than 5 accessions was excluded for the test.

DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.

Appendix 6. Quantitative traits and lignan contents according to clusters

Cluster	n	Quantitative traits										Lignan contents		
		DTF (d)	DTM (d)	HFC (cm)	CZL (cm)	CL (mm)	CW (mm)	1000SW (g)	Sesamin (mg/g)	Sesamolol (mg/g)	Lignan (mg/g)			
1	67	72.0±7.3 <sup>a</sup>	130.2±8.9 <sup>a</sup>	123.3±18.8 <sup>a</sup>	56.0±15.3 <sup>b</sup>	26.4±2.6 <sup>b</sup>	7.4±1.1 <sup>b</sup>	2.8±0.5 <sup>b</sup>	4.0±1.8 <sup>a</sup>	1.9±0.5 <sup>a</sup>	5.9±2.1 <sup>a</sup>			
2	34	53.7±4.7 <sup>c</sup>	107.7±11.5 <sup>c</sup>	53.6±22.3 <sup>c</sup>	90.4±18.2 <sup>a</sup>	27.0±2.2 <sup>ab</sup>	8.9±1.6 <sup>a</sup>	2.7±0.3 <sup>b</sup>	4.2±1.0 <sup>a</sup>	2.1±0.4 <sup>a</sup>	6.3±1.2 <sup>a</sup>			
3	64	58.6±5.5 <sup>b</sup>	121.9±5.3 <sup>b</sup>	77.3±23.4 <sup>b</sup>	92.1±22.5 <sup>a</sup>	27.6±2.9 <sup>a</sup>	8.2±1.2 <sup>a</sup>	3.3±0.4 <sup>a</sup>	3.0±1.0 <sup>b</sup>	1.1±0.4 <sup>b</sup>	4.2±1.1 <sup>b</sup>			

All values are presented as the mean ± standard deviation, and means with the same superscript letter are not significantly different between clusters ( $p < 0.05$ ). DTF, days to flowering; DTM, days to maturity; HFC, height of the first capsule-bearing node; CZL, capsule zone length; CL, capsule length; CW, capsule width; 1000SW, 1000-seed weight.