pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 41, No. 2, pp. 99~110 (2026)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2026.41.2.99

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

직거래 유통 엽채류와 엽경채류의 잔류농약 실태조사 및 위해성 평가

박소희* · **정재훈** · **권현정** · **박동주** · **김꽃봉우리** · **허혜숙** · **박한솔** · **옥연주**
부산광역시 보건환경연구원 엄궁농산물검사소

Monitoring and Risk Assessment of Pesticide Residues on Leafy and Stem Vegetables distributed through Direct Sales

So-Hee Park*, Jae-Hoon Jeong, Hyeon-Jeong Kwon, Dong-Ju Park, Koth-Bong-Woo-Ri Kim, Hye-Sook Heo, Han-Sol Park, Youn-Ju Ok
Office of Eomgung Agricultural Products Inspection, Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan, Korea

(Received January 15, 2026/Revised March 4, 2026/Accepted March 4, 2026)

ABSTRACT - This study investigated the safety of pesticide residues in agricultural products sold through direct transaction applications (apps) and local food markets. Ten leafy vegetables, stalk and stem vegetables found to be unsuitable for pesticide residues by the Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment between 2023 and 2024 were selected for the experiment. The detection rate of pesticide residues in agricultural products collected via the app was 71.4%, 17.6% higher than that in local food markets. The violation rates were 8.2% and 7.7%, respectively, with no statistically significant differences observed. The detection rates for direct transactions of agricultural products, both online and offline, were 66.1% for leafy vegetables and 63.2% for stalk and stem vegetables, with violation rates of 7.1% and 10.5%, respectively. The non-compliant vegetables included lettuce, perilla leaves, chwinamul, crown dailies, scallions, and Chinese chives. The risk assessment results for the seven pesticides that exceeded the maximum residue limits were considered safe. However, the safety management of directly traded produce is less thorough than that of auctioned or hypermarket produce, resulting in a higher rate of pesticide-residue violations. Therefore, institutional improvements are required to eliminate blind spots in the safety of agricultural products.

Key words: Pesticide residues, Agricultural products, Direct sales, Application, Local food

농업 분야의 기술 발달과 급격한 경제성장으로 농산물의 대량 생산 및 광역 유통이 가능해졌고 이로 인해 전국적인 농산물 유통 체계가 형성되었다[1]. 과거 농산물 생산지 주변에서 이루어지던 소비는 복잡해진 유통 시스템에 따라 여러 단계를 거쳐 이루어지게 되었고, 생산자와 소비자의 사회적·물리적 거리를 확대시켜 생산자에게는 경제적 어려움을, 소비자에게는 유통 비용 증가로 인한 가격 상승의 부담을 안겨주게 되었다. 이러한 유통 체계 문제의 대응책으로 농산물 직거래가 등장하였다[2-4].

온라인 직거래 농식품의 거래액은 2017년부터 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 이는 2019년 코로나 펜데믹의 사회적 거리두기 조치가 완화된 이후에도 하락하지 않았다[5]. 이에 농림축산식품부와 식품의약품안전처에서는 국내외 온라인 판매 농산물을 집중 수거하여 잔류농약 등을 검사하며 안전성을 확보하기 위해 노력하고 있다[6]. 편리성과 저렴한 가격이 장점인 온라인 판매의 또 다른 특징은 윤리적 소비에 쉽게 접근할 수 있다는 것이다. 소규모 농산물 유통 애플리케이션은 과잉 공급되거나 상품성이 낮은 농산물을 저렴하게 구매할 수 있도록 생산자와 소비자를 연결하며, 해당 플랫폼을 통한 구매가 영세 농가를 도울 수 있다는 점을 서비스 홍보에 활용하고 있다. 다만, 유통 경로가 짧은 만큼 상품의 잔류물질 관리에 한

*Correspondence to: So-Hee Park, Office of Eomgung Agricultural Products Inspection, Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 47032, Korea
Tel: +82-51-309-8901, Fax: +82-51-327-8603
E-mail: sohee1213@korea.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계가 있을 수 있으며, 유통 과정의 관리 책임이 생산자 중심으로 운영될 경우 먹거리 안전의 사각지대가 발생할 우려가 있다.

로컬푸드 직매장은 장거리 유통 과정을 거치지 않은 지역 농산물을 생산자가 수확-포장-가격 책정-진열까지 전부 수행하여 판매하는 시설을 의미한다[7]. 로컬푸드 농산물은 생산자 및 재배지가 표기되어 있기 때문에 생산자-소비자 간의 신뢰를 바탕으로 한 거래가 가능하며, 경작규모가 작은 중소농들이 안정적인 판매 경로와 소득을 확보할 수 있다. 로컬푸드의 안전성은 출하자의 판매 전 필수교육 수료과 연 1회 이상 보수교육을 수료하는 것으로 관리되고 있다[8]. 전국 로컬푸드 농산물의 잔류농약 안전성 실태조사 결과, 광주(2017년-2019년)에서 372건 중 49건이 검출, 3건에서는 잔류농약 허용 기준을 초과하였다[9]. 부산(2018년)에서는 로컬푸드 농산물 188건 중 11건[10], 경기도 북부(2020년) 유통 직거래 농산물은 207건 중 14건에서 잔류농약이 검출되었고, 1건에서 기준을 초과하였다[11].

농약은 농산물 생산성 향상과 재배 작업의 효율을 위해 필수적이지만 농산물에 일부 잔류하여 인체에 위해를 초래할 수 있다[12,13]. 이를 예방하기 위해 국내에서는 농약의 이론적 일일최대섭취량이 일일섭취허용량의 80%를 초과하지 않는 범위에서 농약 잔류허용기준(maximum residue limits, MRLs)을 설정하고 있다[14]. 또한 2019년부터 농약 허용물질목록 관리제도(positive list system, PLS)를 시행하여[15] 농산물에 MRLs이 설정되지 않은 미등록 농약이 검출될 경우 0.01 mg/kg을 잔류허용기준으로 적용한다. PLS의 시행에 따라 국내 검사기관은 직접 살포로 인한 농약의 잔류뿐만 아니라 비산 오염, 교차오염, 토양오염, 생산자의 관리 부주의 등으로 인한 미세 오염을 적발함으로써 농산물의 안전성을 면밀히 관리하고 있다.

국립농산물품질관리원은 2022-2023년 동안 온라인 직거래 판매 농산물의 안전 관리를 강화하기 위해 전자상거래 및 통신판매 농가를 대상으로 수확 전 농산물의 수거 건수를 확대하여 잔류농약 검사를 시행하였으며[16], 2015년부터 로컬푸드 유통의 활성화를 위해 전국 로컬푸드 직매장 출하 농산물의 사전 안전성 조사를 지원하고 있다[17]. 하지만 온라인 판매 농산물의 안전성 조사는 대부분 대형 오픈마켓이나 대형마트에서 운영하는 종합 쇼핑몰 중심이기 때문에, 소규모 온라인 직거래 농산물의 안전성 모니터링은 사각지대에 속해 있는 실정이다. 그리고 2025년 식품안전관리지침[18]에 따르면 지자체별 로컬푸드 직매장 판매 농산물 안전점검은 연 1회 실시하도록 되어 있지만, 매월 출하되는 로컬푸드 농산물 전체 물량에 대한 안전 관리에는 한계가 있다.

본 연구에서는 온라인 직거래 애플리케이션 유통 농산물과 부산 지역 내 로컬푸드 직매장에서 판매되는 농산물 중 부적합률이 높은 엽채류와 엽경채류를 중심으로 잔류농약 실태조사를 실시하여 농산물 안전성의 사각지대 해소 및 식품 안전 정책 수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

Materials and Methods

시료 및 분석항목

본 연구에서는 2025년 1월부터 10월까지 직거래 농산물 유통 애플리케이션 7곳에서 판매되고 있는 농산물 49건과 부산 소재 로컬푸드 직매장 3곳에서 판매되고 있는 농산물 26건을 대상으로 실험하였다. 연구에 사용한 농산물은 부산광역시 보건환경연구원 엄궁·반여농산물검사소에서 최근 2년 동안 잔류농약 부적합이 발생한 이력이 있는 엽채류 및 엽경채류 10품목(들깻잎, 머위, 무(잎), 부추, 상추, 시금치, 쑥갓, 엇갈이배추, 취나물, 파)[19]을 선정하여 식품공전 내 다성분 시험법으로 분석 가능한 농약 중 480종(GC-MS/MS 252종, LC-MS/MS 228종)으로 분석하였다(Supplementary Table S1, S2).

시약 및 표준물질

표준품의 희석과 분석에 사용된 acetonitrile 및 methanol은 HPLC grade 이상의 용매로 Merck (Darmstadt, Germany)사 제품을 사용하였으며, water는 Merck 사의 것과 PURELAB®Quest (ELGA LabWater, Lane End, UK)을 이용하여 18.2 MΩ 수준으로 정제된 증류수를 사용하였다. Formic acid는 LC-MS grade로 Thermo Scientific (Waltham, MA, USA)에서 구입하였고, ammonium acetate는 LC-MS grade의 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA) 제품을 사용하였다. 농약 480종에 대한 표준품은 Kemidas (Gunpo, Korea)와 AccuStandard (New Haven, CT, USA) 제품을 사용하였다.

시료 전처리 및 기기 분석 조건

시료는 식품공전 식품 중 잔류농약 시험법인 다성분 시험법 제2법에 따라 quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe (QuEChERS) 전처리법으로 추출 및 정제하였다[20]. 시료는 균질화 후 10 g을 취하여 acetonitrile 10 mL를 넣고 1분간 강하게 흔든 후 무수황산마그네슘 4 g과 염화나트륨 1 g, 구연산이나트륨·1.5수화물 0.5 g, 구연산삼나트륨·2수화물 1 g의 추출 키트(CHROMAtific ENK1-SC, Chromatific, Nastätten, Germany)를 넣어 1분간 교반 후 4°C, 4,000 ×g에서 10분간 원심분리(Avanti J-15R, Beckman coulter, Brea, CA, USA)하였다. 추출된 상층액 6 mL는 무수황산마그네슘 900 mg과 PSA (primary secondary amine) 150 mg가 포함되어 있는 정제 키트(CHROMAtific PM2EN, Chromatific)에 넣어 1분간 혼합 후 4°C, 4000 ×g에서 원심분리하여 정제된 상층액을 0.2 μm PTFE syringe filter (Merck millipore, Burlington, MA, USA)로 여과하여 시험 용액으로 사용하였다.

잔류농약 분석에 사용된 기기는 Agilent Technologies (Santa Clara, CA, USA)의 8890 GC와 7010B GC/TQ(triple quad)가 연결된 GC-MS/MS을 사용하였고, LC-MS/MS는 Waters (Milford, MA, USA)의 ACQUITY UPLC I-Class PLUS와 Xevo TQ-S을 사용하여 분석하였다. 각 기기분석의 세부적인 조건은 Supplementary Table S3, S4와 같다.

유효성 검증

본 연구에서 사용된 시험법의 검증은 직거래 농산물에서 부적합 판정된 농약을 대상으로, 식품·의약품 분야 시험·검사기관 품질관리를 위한 시험방법의 유효성 확인 및 검증 안내서[21] 및 식품공전 잔류농약 분석법 실무해설서(제6판)[22], 식품 등 시험법 마련 표준절차에 관한 가이드라인[23]에 따라 확인하였다. 회수율은 잔류농약이 검출되지 않은 시료에 부적합 농약의 혼합 표준용액을 검출한계의 1배, 10배, 50배가 되도록 처리한 후, 앞서 기술한 전처리법과 동일하게 실험하여 농도별로 3회 반복 분석하였다. 직선성은 표준검량선의 회귀방정식으로부터 얻은 결정계수(coefficient of determination, R^2)로 확인하였으며 표준검량선은 0.0005-0.0030 mg/L 범위로 4단계 농도의 표준용액을 제조하여 3회 반복 측정하였다. 분석 시 무처리 검체를 같은 방법으로 전처리하여 만든 용액으로 matrix-matched calibration을 작성하였다. 잔류허용기준을 초과한 잔류농약 7종(이성질체를 포함하여 총 18항목)에 대한 검출한계(limit of detection, LOD) 및 정량한계(limit of quantitation, LOQ)는 회귀직선으로 얻은 검량선의 기울기(S)와 측정값의 표준편차(σ)로 구하였다.

$$LOD = 3.3 \times (\sigma / S)$$
$$LOQ = 10 \times (\sigma / S)$$

σ=The standard deviation of response
S=The slope of the calibration curve

위해성 평가

잔류농약 허용 기준을 초과한 농약의 위해성 평가는 식품의약품안전처의 인체 적용 제품 위해성 평가 공통지침서[24]에 따라 일일섭취허용량(acceptable daily intake, ADI, mg/kg b.w./day)을 적용하여 수행하였다. 잔류농약 분석에서 얻은 검출 농도에 해당 농산물의 일일평균섭취량을 곱한 후, 한국인 전 연령 평균 체중인 55 kg으로 나누어 일일추정섭취량(estimated daily intake, EDI, mg/kg b.w./day)을 산정하였다. 그리고 EDI를 ADI로 나눈 값에 100을 곱하여 농약의 위해도(hazard index, ADI%)를 산출하였다[24]. 농약별 일일섭취허용량은 농촌진흥청 농약안전정보시스템의 농약특성정보[25]를 사용하였으며 농산물의 일일평균섭취량은 한국보건산업진흥원 국민영양통계[26]를 활용하였다.

Results and Discussion

유효성 검증

본 연구에서 부적합 판정된 잔류농약 7종 18항목의 검출한계(LOD)는 0.0004-0.0032 mg/kg, 정량한계(LOQ)는 0.0014-0.096 mg/kg, 결정계수(R^2)의 값은 0.9902-0.9999으로 양호한 직선성을 보였다(Table 1). 또한 잔류농약이 검출되지 않은 상추 검체에 조제한 표준용액을 약 0.01 mg/kg, 0.1 mg/kg, 0.5 mg/kg의 농도가 되도록 첨가하여 회수율 시험을 실시하였을 때, 회수율은 85.9-116.8%, 상대표준편차(RSD)는 1.2-24.1%로 나타나 본 실험을 수행하기에 적합한 것으로 나타났다.

유통 플랫폼에 따른 잔류농약 분석 결과

직거래 애플리케이션으로 유통되고 있는 농산물 49건과 부산지역 내 로컬푸드 농산물 26건의 잔류농약 검사를 수행한 결과는 Table 2와 같다. 유통 플랫폼에 따른 잔류농약 검출 건수는 애플리케이션이 35건(71.4%), 로컬푸드 직매장이 14건(53.8%)으로 애플리케이션에서 수거한 농산물의 검출률이 17.6% 더 높았다. 잔류농약 허용 기준을 초과한 시료는 애플리케이션에서 4건(8.2%), 로컬푸드 직매장 2건(7.7%)으로 유통 플랫폼에 따른 부적합률은 큰 차이를 보이지 않았다.

잔류허용기준 이내의 검출은 적정 농약 사용에 해당하므로, 단순 검출률만으로 안전성 수준을 단정하기에는 한계가 있다. 주문이 들어오면 즉시 수확하여 배송해야 하는 애플리케이션 판매 농산물의 특성상 자체 물류센터를 통한 거래인 온라인 종합 쇼핑몰·대형마트 온라인 매장에 비해 발주량이 일정하지 않다[27]. 이는 검출률의 차이가 유통 플랫폼별 관리 체계의 차이에서 기인할 가능성을 시사하며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 한편 조사 대상 농산물 중 애플리케이션에서 구매한 쪽파 1건에서 잔류농약 기준 초과가 확인되었다. 해당 농산물의 생산자를 추적한 결과, 도매시장에서 경매를 통해 낙찰된 제품으로, 다수의 생산자가 재배한 물량이 혼합된 상태였기 때문에 개별 생산자를 특정하는 데 한계가 있었다. 이러한 사례는 직거래의 기준이 명확하게 정립되어 있지 않고 이에 대한 제재가 부재하기 때문에 발생할 수 있는 문제로 판단된다. 이로 인해 부적합 농산물 생산자에 대한 적절한 조치가 이루어지지 않아, 추후 동일한 부적합 농산물이 반복적으로 출하 및 유통될 가능성이 있다. 이러한 먹거리 유통의 사각지대를 해소하기 위해 직거래 농산물에 대한 기준 확립 및 판매 농산물에 대한 안전 관리 강화가 필요할 것으로 생각된다.

농산물 품목별 잔류농약 분석 결과

조사 대상 직거래 농산물 75건 중 49건(65.3%)에서 잔

Table 1. Verification parameters of violated pesticides

Pesticides	Recovery(%) (Mean±RSD[1)])			LOD[2)] (mg/kg) (n=7)	LOQ[3)] (mg/kg) (n=7)	Linearity (R^2)
	0.01 mg/kg	0.1 mg/kg	0.5 mg/kg			
Etridiazole	86.5±7.7	98.7±5.0	103.9±3.3	0.0028	0.0086	0.9989
Methabenzthiazuron	114.9±3.3	107.0±4.9	104.1±5.1	0.0009	0.0029	0.9983
Methomyl	106.9±9.7	110.2±0.8	105.2±1.5	0.0027	0.0082	0.9944
Pendimethalin	88.5±19.4	85.9±16.6	90.2±5.6	0.0032	0.0096	0.9985
Phorate	107.4±9.9	105.7±1.5	91.6±17.8	0.0023	0.0069	0.9955
Phorate oxon	111.3±6.3	109.7±2.7	106.3±2.6	0.0006	0.0017	0.9999
Phorate oxon sulfone	107.1±4.7	109.9±4.0	107.5±2.1	0.0004	0.0014	0.9996
Phorate oxon sulfoxide	106.4±8.8	109.0±6.6	105.6±4.3	0.0006	0.0019	0.9988
Phorate sulfone	112.8±4.7	116.6±3.3	101.8±10.4	0.0007	0.0022	0.9996
Phorate sulfoxide	113.2±4.4	110.6±2.3	107.7±1.5	0.0005	0.0016	0.9994
Tebuconazole	93.8±24.1	92.6±20.2	86.6±8.3	0.0024	0.0074	0.9991
Terbufos	116.2±2.6	98.8±17.2	98.2±3.0	0.0031	0.0094	0.9981
Terbufos oxon	111.7±7.0	111.7±6.8	106.4±3.1	0.0021	0.0063	0.9902
Terbufos oxon sulfone	112.4±5.2	109.3±5.6	106.2±1.2	0.0008	0.0023	0.9988
Terbufos oxon sulfoxide	109.2±4.8	112.4±4.8	104.7±5.1	0.0006	0.0019	0.9991
Terbufos sulfone	113.3±3.9	111.7±2.6	105.6±3.1	0.0005	0.0014	0.9999
Terbufos sulfoxide	108.6±5.7	116.1±3.3	101.7±4.2	0.0005	0.0016	0.9991
Thiodicarb	111.1±3.0	116.8±2.3	105.3±2.3	0.0014	0.0041	0.9997

[1)]RSD: Relative standard deviation.
[2)]LOD: Limit of detection.
[3)]LOQ: Limit of quantification.

Table 2. Results of pesticides in agricultural products

Agricultral products (n=75)		Direct sales application			Local food markets		
		No. of samples	No. of detected (%)	No. of violated (%)	No. of samples	No. of detected (%)	No. of violated (%)
Leafy vegetables (n=56)	Lettuce	9	4 (44.4)	1 (11.1)	7	4 (57.1)	-
	Perillia leaves	8	7 (87.5)	1 (12.5)	-	-	-
	Chwinamul	6	5 (83.3)	1 (16.7)	-	-	-
	Korea cabbage	5	4 (80.0)	-	4	2 (50.0)	-
	Young raddish	3	3 (100.0)	-	1	-	-
	Spinach	5	3 (60.0)	-	3	1 (33.3)	-
	Crown daisy	3	2 (66.7)	-	1	1 (100.0)	1 (100.0)
	Coltsfoot	1	1 (100.0)	-	-	-	-
Root and stem vegetables (n=19)	Leek	4	3 (75.0)	-	5	2 (40.0)	-
	Scallions	3	3 (100.0)	1 (33.3)	1	1 (100.0)	-
	Chinese chive	2	-	-	4	3 (75.0)	1 (25.0)
Total		49	35 (71.4)	4 (8.2)	26	14 (53.8)	2 (7.7)

류농약이 검출되었으며 엽채류 56건 중 37건(66.1%), 엽경채류 19건 중 12건(63.2%)에서 검출되었다(Table 2). 품목별로는 엽채류에서 상추 8건, 들깻잎 7건, 취나물 5건, 엇갈이배추 6건, 무(잎) 3건, 시금치 4건, 쑥갓 3건, 머위 1건, 엽경채류는 대파 5건, 쪽파 4건, 부추 3건에서 잔류농약이 검출되었다. 기준을 초과하여 부적합으로 판정한

농산물은 총 6건(8.0%)이었으며 엽채류 56건 중 4건(7.1%), 엽경채류 19건 중 2건(10.5%)으로 해당 상품의 판매를 즉시 중지할 것을 통보하였다. 엽채류는 상추 1건, 들깻잎 1건, 취나물 1건, 쑥갓 1건, 엽경채류는 쪽파 1건, 부추 1건이 기준을 초과하였다. 2024년도 부산광역시 보건환경연구원에서 조사한 관내 유통 농산물의 잔류농약 부적합률[19]과 비교하였을 때, 부적합률은 엽채류 2.5%(38건/1,514건), 엽경채류 3.3%(9건/276건)로 직거래 농산물의 잔류농약 부적합률이 도매시장 및 일반 유통 농산물보다 높은 것으로 나타났다. 따라서, 소규모 직거래 농산물 생산자의 농약 사용에 대한 교육 및 관리를 강화함으로써 보다 안전한 농산물이 공급될 수 있는 관리 체계가 마련되어야 할 것으로 사료된다.

부적합 농산물의 농약 성분별 검출 현황

조사 대상 농산물 중 잔류 허용 기준을 초과한 농산물은 6건으로 해당 시료에서 검출된 잔류농약 목록은 Table 3과 같다. 부적합 판정 잔류농약 중 methomyl, pendimethalin, methabenzthiazuron은 검출된 농산물의 MRLs이 존재하지 않기 때문에 PLS에 따라 모두 0.01 mg/kg을 기준으로 적용하여 부적합 판정하였다.

상추의 경우 methomyl이 기준의 500배가 넘는 5.114 mg/

Table 3. List of pesticides detected from unsuitable agricultural products

Agricultral products	Pesticides detected	Conc. of detection (mg/kg)	MRLs[1)] (mg/kg)	Functional class of pesticide
Lettuce	Methomyl*	5.114	0.01(PLS[2)])	Insecticide
	Deltamethrin	0.011	0.7	Insecticide
	Cyclaniliprole	0.230	20	Insecticide
	Cyenopyrafen	0.280	10	Insecticide
	Imidacloprid	0.013	7.0	Insecticide
Perillia leaves	Etridiazole*	0.654	0.1	Fungicide
	Fluopyram	0.037	0.1	Fungicide
	Diniconazole	0.021	0.3	Fungicide
	Benthiavalicarb-isopropyl	0.769	10	Fungicide
	Mandipropamid	0.201	25	Fungicide
	Acetamiprid	0.096	10	Insecticide
	Flutolanil	2.704	30	Fungicide
Chwinamul	Tebuconazole*	1.465	0.05	Fungicide
	Chlorfenapyr	0.087	3.0	Insecticide
	Fluxametamide	0.425	6.0	Insecticide
	Terbufos	0.339	0.5	Insecticide
	Azoxystrobin	0.015	7.0	Fungicide
Crown daisy	Pendimethalin*	0.062	0.01(PLS)	Herbicide
Scallions	Phorate*	0.645	0.05	Insecticide
	Methabenzthiazuron*	0.088	0.01(PLS)	Herbicide
	Pyrimethanil	1.695	3.0	Fungicide
	Tebuconazole	0.025	3.0	Fungicide
	Famoxadone	0.909	2.0	Fungicide
	Picarbutrazox	0.098	3.0	Fungicide
Chinese chive	Terbufos*	0.205	0.05	Insecticide
	Indoxacarb	0.012	3.0	Insecticide
	Carbendazim	0.194	10	Fungicide

[1)]MRLs: Maximum residue limits.
[2)]PLS: Positive list system.
*Pesticides violated.

kg으로 검출되었다. Methomyl은 carbamate 계 살충제로 곤충의 신경 조직 손상을 유발하여 방제를 유도하지만 포유류 및 인간에게도 치명적인 간 독성과 신경 독성이 있기 때문에 많은 유럽 국가에서 사용이 금지되어 있다[28]. Methomyl은 급성 중독으로 인한 인명 피해 사례가 국내에서 지속적으로 보고되어 온 고위험 물질로[29,30] 2011년부터 등록이 취소된 만큼 사용에 주의가 필요한 성분이다[31]. 등록이 취소되었거나 사용이 금지된 농약 성분이 여전히 농산물에서 기준을 초과하였다는 점은 PLS 제도 도입만으로는 실효성 있는 관리가 충분하지 않음을 보여준다. 이는 공중보건 및 농업 종사자의 안전과도 직결되는 문제이다. 단순한 잔류허용기준 초과 사례가 아니라, 사용 금지 농약의 제도적 관리 공백을 보여주는 사례로 해석할 필요가 있다. 본 연구에서 확인된 methomyl 검출 사례는 사용 금지 농약에 대한 불법 유통 및 사용을 원천적으로 차단할 수 있는 예방적 관리체계 강화의 필요성을 뒷받침한다. Pendimethalin은 쑥갓에 MRLs이 없어 PLS 기준이 적용되지만 서울 및 경기도 보건환경연구원 조사에 따르면 최근까지도 기준의 5-6배가 검출되는 등[32] 부적합이 계속 발생하고 있다. Pendimethalin은 마늘과 양파 등의 재배를 방해하는 잡초인 개쑥갓의 제초에 사용되는 경우가 있다[33].

엽경채류 중 쪽파에서 phorate 0.645 mg/kg, methabenzthazuron 0.088 mg/kg 검출되어 조사 대상 농산물 중 유일하게 2종의 검출 농약이 MRLs을 초과하였고, 부추에서는 terbufos가 0.205 mg/kg 검출되어 부적합으로 판정되었다. phorate와 terbufos는 거세미나방류, 벼룩잎벌레 등 토양 해충 방제에 사용되는 살충제로 각 시료에 대한 MRLs 또한 존재한다. 하지만 작물 정식 전 토양에 1회 살포하도록 명시되어 있으나 재배 중 추가 살포로 인해 잔류허용기준을 초과한 사례가 있다[34]. 농촌진흥청은 전국에서 phorate 및 terbufos의 부적합 발생률이 급증함에 따라 2022년 안내 책자를 배포하여 농약 안전 사용 기준 준수를 독려하고 있다. Methabenzthazuron은 제초제로 분류되며 현재 마늘과 풋마늘에만 잔류허용기준이 있다. 주로 잡초의 뿌리를 통해 흡수되어 광합성을 억제함으로써 잡초를 제거하며, 토양 내 분해 속도가 매우 느려 3-6개월 동안 잔류하는 경우가 있다[35]. 2025년 전북에서 대파에 부적합이 발생한 것으로 보아[32], 미등록 작물인 파에 사용하는 경우가 종종 있는 것으로 판단되므로 대체 농약을 안내하는 등 공공기관의 지도 및 안내가 필요한 것으로 사료된다.

위해성 평가

직거래 농산물에서 부적합 판정된 잔류농약 7종에 대한 위해성 평가를 실시하여 그 결과를 Table 4에 나타냈다. 산출된 %ADI (Hazard index)는 0.0004-16.9429%이며, 일반적으로 %ADI가 100%를 넘을 경우 위해하다고 판단하므로[36] 본 연구에서 부적합 판정된 잔류농약 성분들의 섭취 수준은 안전하다고 할 수 있다. 쪽파에서 검출된 phorate가 16.9429%로 가장 높았으나 한국인 평균 체중을 적용하였을 때 섭취 시의 위해성은 낮은 것으로 나타났다. 이는 MRLs을 초과하더라도 농약의 위해도는 일일섭취허용량, 농산물 일일섭취추정량 등을 고려하여 판단하므로 해당 농산물에 대한 위해성은 낮은 수준으로 평가될 수 있음을 의미한다. 또한, 농산물은 일반적으로 세척하여 섭취하므로 농약의 잔류량을 크게 줄일 수 있어[37]실제 위해성은 더 낮아질 것으로 예상된다.

다만 개인의 기호, 지역적 특성, 계절에 따라 농산물의 섭취량이 달라짐으로써 일일섭취추정량이 증가함에 따라 위해도가 높아질 수 있어 주의가 필요하다. 또한 일부 부적합 시료에서 검출된 methomyl 및 phorate와 같은 고독성 농약은 만성 노출 평가 결과만으로 인체 위해성을 충분히 설명하기에는 한계가 있다. 단기간 노출에 의한 급성 독성이 문제가 될 수 있으며, 특히 잔류허용기준을 초과한 농산물을 일시에 다량 섭취할 경우 급성 위해 가능성을 배제할 수 없다는 점에서 추가적인 검토가 필요하다. 그리고 1종의 농약에 대한 위해성은 알려진 경우가 많지

Table 4. Risk assessment of pesticides violated in agricultural products

Pesticide violated	Samples	Conc. of detection (mg/kg)	Food daily intake (g/day)	ADI[1] (mg/kg b.w./day)	EDI[2] (mg/kgb.w./day)	%ADI[3]
Methomyl	Lettuce	5.114	6.81	0.03	0.0006332	2.1107
Etridiazole	Perillia leaves	0.654	2.15	0.017	0.0000256	0.1506
Tebuconazole	Chwinamul	1.465	0.79	0.03	0.0000210	0.0700
Pendimethalin	Crown daisy	0.062	0.4	0.13	0.0000005	0.0004
Phorate	Scallions	0.645	10.11	0.0007	0.0001186	16.9429
Methabenzthiazuron	Scallions	0.088	10.11	0.004	0.0000162	0.4050
Terbufos	Chinese chive	0.205	2.4	0.0006	0.0000089	1.4833

[1]Acceptable daily intake.
[2]Estimated daily intake=average concentration (mg/kg)×food daily intake (g/day)/55 kg/1000.
[3]%Acceptable daily intake (Hazard index)=(EDI/ADI)×100.

만, 다수의 농약을 혼합하여 살포한 경우 그 상호작용으로 인한 위해성은 예측이 어려우므로[38] 지속적인 모니터링 및 교육, 제도적 정비를 통해 잔류농약 안전성에 대한 관리가 필요하다고 판단된다.

국문요약

2025년 1월에서 10월까지 농식품 직거래 애플리케이션과 부산지역 내 로컬푸드 직매장에서 수거한 엽채류 및 엽경채류 농산물 75건을 대상으로 식품공전 식품 중 잔류농약 시험법인 다성분 시험법 제2법을 이용하여 잔류농약 480종의 모니터링을 진행하였다. 유통 플랫폼에 따른 분석 결과, 직거래 애플리케이션 판매 농산물 49건 중 35건(71.4%), 로컬푸드 직매장 판매 농산물 26건 중 14건(53.8%)에서 잔류농약이 검출되었고, 각각 4건(8.2%)과 2건(7.7%)의 농산물에서 부적합이 발생한 것으로 나타났다. 조사 대상 직거래 농산물 전체 품목별 잔류농약 분석 결과, 엽채류 56건 중 37건(66.1%), 엽경채류 19건 중 12건(63.2%)에서 잔류농약이 검출되었고, 엽채류 4건(7.1%), 엽경채류 2건(10.5%)에서 잔류허용기준을 초과하였다. 이는 2024년도 부산 내 경매 및 유통 농산물의 부적합률(엽채류 2.5%, 엽경채류 3.3%)보다 높은 것으로 나타났다. 부적합이 발생한 품목은 상추 1건, 들깻잎 1건, 취나물 1건, 쑥갓 1건, 쪽파 1건, 부추 1건이었으며 이중 PLS 기준을 초과한 품목은 상추(methomyl), 쑥갓(tebuconazole), 쪽파(methabenzthiazuron)였다. 부적합이 발생한 농약 7종에 대한 위해성 평가 결과, ADI%는 0.0004-16.9429%이었으며 모두 안전한 것으로 나타났다. 하지만 섭취 환경 및 기호와 2종 이상 검출된 농약들의 상호작용에 따라 위해성이 증가할 수 있어 지속적인 관리 및 모니터링이 수행되어야 할 것으로 생각된다. 코로나19 이후 온라인을 통한 농산물 판매 경로가 다양해지고 있는 만큼, 사각지대에 놓인 소규모 플랫폼 판매 농산물의 안전한 유통을 위해서는 잔류농약 등 안전성 검사 강화, 생산자 및 판매자의 체계적 관리 등 제도적 개선이 필요할 것으로 사료된다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

So-Hee Park https://orcid.org/0009-0006-0663-8779
Jae-Hoon Jeong https://orcid.org/0009-0006-7896-0126
Hyeon-Jeong Kwon https://orcid.org/0000-0002-3371-6131
Dong-Ju Park https://orcid.org/0009-0001-5645-3768
Koth-Bong-Woo-Ri Kim https://orcid.org/0009-0001-3041-8235
Hye-Sook Heo https://orcid.org/0009-0005-2715-3132
Han-Sol Park https://orcid.org/0000-0003-1288-4600
Youn-Ju Ok https://orcid.org/0009-0007-7219-9740

References

1. Lee, D., Factors affecting the farmer-to-consumer direct marketing and its influence on the sale increase of agricultural products. *J. Rural Dev.*, **39**, 89-116 (2016).
2. Kim, J.D., 2009. Food crisis and local food, Ehu Publishing, Goyang, Korea, pp. 18-25.
3. Hong, K.W., Kim, J.Y., Kim, Y.S., The conceptualization of the local food, a Korean case. *Korean J. Bus. Adm.*, **22**, 1629-1649 (2009).
4. Ilbery, B., Maye, D., Alternative (shorter) food supply chains and specialist livestock products in the Scottish-English borders. *Environ. Plan. A*, **37**, 823-844 (2005).
5. Oh, N.H., Kim, S.H., 2026. Current status and challenges of public wholesale markets and online distribution, Korea Rural Economic Institute, Naju, Korea, pp. 6-8.
6. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), (2025, December 4). The government is conducting safety inspections of agricultural products sold online. Retrieved from https://www.mafra.go.kr/home/5109/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGaG9tZSUyRjc5MiUyRjU3MTkzMSUyRmFydGNsVmlldy5kbyUzRnBhc3N3b3JkJTNEJTI2aXNWaWV3TWluZSUzRGZhbHNlJTI2YmJzT3BlbldyZFNlcSUzRCUyNmJic0NsU2VxJTNEJTI2cGFnZSUzRDElMjZzcmNoQ29sdW1uJTNEc2olMjZyb3clM0QxMCUyNnNyY2hXcmQlM0QlRUMlOTglQTglRUIlOUQlQkMlRUMlOUQlQjgrJUVEJThDJTkwJUVCJUE3JUE0KyVFQiU4NiU4RCVFQyU4MiVCMCVFQiVBQyVCQyUyNnJnc0VuZGRlU3RyJTNEJTI2cmdzQmduZGVTdHIlM0QlMjY%3D
7. Yu, C.J., Um, J.B., A study on the effect of store attributes of local food on user satisfaction. *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **23**, 230-236 (2022).
8. Korea Agro-Fisheries and Food Trade Corporation, (2025, December 2). Direct sales market aftercare guidelines. Retrieved from https://www.baroinfo.com/front/M000000046/board/view.do?articleId=AC00005065
9. Kim, J.P., Cho, S.J., Song, N.J., Han, Y.J., Kim, H.H., Cho, B.S., Chung, J.K., Kim, S.H., Survey on pesticide residues and risk assessment in agricultural products at local food markets in Gwangju. *Korean J. Pestic. Sci.*, **25**, 20-30 (2021).
10. Lee, J.Y., A study on pesticide residues and heavy metals of local food agricultural products in Busan. *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment*, **28**, 377-378 (2019).
11. Lim, J.H., Park, P.H., Lim, B.G., Ryu, K.S., Kang, M.S., Song, S.H., Kang, N.H., Yoo, N.Y., Kim, J.E., Kang, C.W., Kim, Y.H., Seo, J.H., Choi, O.K., Yoon, M.H., Monitoring and risk assessment of pesticide residues in farmers' market

produce in northern Gyeonggi-do. *J. Food Hyg. Saf.*, **35**, 243-251 (2020).
12. Lee, H.J., Choe, W.J., Lee, J.Y., Cho, D.H., Kang, C.S., Kim, W.S., Monitoring of ergosterol biosynthesis inhibitor(EBI) pesticide residues in commercial agricultural products and risk assessment. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **38**, 1779-1784 (2009).
13. Wang, S., Wang, Z., Zhang, Y., Wang, J., Guo, R., Pesticide residues in market foods in Shaanxi Province of China in 2010. *Food Chem.*, **138**, 2016-2025 (2013).
14. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2025. Principles for the establishment criteria for foods, 4th ed, Cheongju, Korea, pp. 149.
15. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2017. Positive list system, Cheongju, Korea, pp. 1-15.
16. National Agricultural Products Quality Management Service (NAQS), (2025, December 5). Strengthening safety management of agricultural products sold directly through online transactions. Retrieved from https://www.naqs.go.kr/hp/bbs/boardDetail.do?bbsSn=283&pstSn=64773&curPage=1&pageSize=10&searchUseYn=N&menuId=MN30511&menuTypeStvl=BBS&upMenuId=MN20360&hghrkMenuId=MN10001&gnrlzGroupLevelStvl=06020020000000&menuNm=%EB%B3%B4%EB%8F%84%EC%9E%90%EB%A3%8C&upMenuTypeCd=DIR&tmptNm=defaultContents&searchCondition=title&searchKeyword=%EC%A7%81%EA%B1%B0%EB%9E%98
17. National Agricultural Products Quality Management Service (NAQS), (2025, December 5). NAQS supports the promotion of direct local food distribution. Retrieved from https://www.naqs.go.kr/hp/bbs/boardDetail.do?bbsSn=283&pstSn=46796&curPage=1&pageSize=10&searchUseYn=N&menuId=MN30511&menuTypeStvl=BBS&upMenuId=MN20360&hghrkMenuId=MN10001&gnrlzGroupLevelStvl=06020020000000&menuNm=%EB%B3%B4%EB%8F%84%EC%9E%90%EB%A3%8C&upMenuTypeCd=DIR&tmptNm=defaultContents&searchCondition=title&searchKeyword=%EC%A7%81%EA%B1%B0%EB%9E%98
18. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2024. 2025 Food safety management guidelines, Part II, Cheongju, Korea, pp. 122.
19. Lee, Y.J., 2025. 2024 Busan metropolitan city agricultural pesticide residue annual report, Office of Eomgung Agricultural Products Inspection, Institute of Health and Environment, Busan, Korea, pp. 11-28.
20. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, November 28). Food code. Retrieved from https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC
21. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2021. Validation and verification guidelines for test methods for quality control of testing inspection agencies in the food and drug field, Cheongju, Korea, pp. 9-17.
22. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2023. Practical guide to pesticide residue analysis, 6th ed, Cheongju, Korea, pp. 213-222.
23. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), 2025. Guidelines for standard procedures for preparation of test methods for food, etc, Cheongju, Korea, pp. 8-16.
24. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS), (2025, November 30). Common guidelines for risk assessment of human products. Retrieved from https://mfds.go.kr/brd/m_210/view.do?seq=14977&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=9.
25. Rural Development Administration (RDA), (2025, December 8). Pesticide safety information system: physicochemical properties information. Retrieved from https://psis.rda.go.kr/psis/saf/evl/chmstry/chmstryChartrLst.ps?menuId=PS00376
26. Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), (2025, November 30). National nutrition statistics. Retrieved from https://www.khidi.or.kr/kps/dhraStat/result2?menuId=MENU01653&gubun=age1&year=2023&category=&schText
27. Gwon, W.G., Park, S.H., Hwang, S.J., Jeong, E.J.., Cho, H.K., Hwang, J.Y., Yu, J.W., Kim, S.H., Park, S.H., Monitoring of pesticide residues in leafy vegetables from online markets. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **56**, 635-643 (2024).
28. Lin, Z., Zhang, W., Pang, S., Huang, Y., Mishra, S., Bhatt, P., Chen, S., Current approaches to and future perspectives on methomyl degradation in contaminated soil and water environments. *Molecules*, **25**, 738 (2020).
29. Seol, I.U., Yang, H.J., Kim, D.W., Park, Y.S., Kim, S.H., Case reports of homicidal methomyl poisoning (N=3). *Korean J. Forensic Sci.*, **14**, 72-75 (2013).
30. Lee, J.B., Park, S.Y., Park, D.E., Yang, W.K., Woo, S.H., The case of pesticide poisoning from a soft drink containing methomyl. *Korean J. Forensic Sci*., **17**, 14-19 (2016).
31. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), (2025, December 11). Collect all highly toxic pesticides, including methomyl, held by farmers. Retrieved from https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156118309#:~:text=%E2%9D%8D%20%EC%9D%B4%EB%9F%B0%20%EB%AC%B8%EC%A0%9C%EC%A0%90%EC%9C%BC%EB%A1%9C%20%EB%A9%94%EC%86%8C%EB%B0%80%EC%9D%84%20%ED%8F%AC%ED%95%A8%ED%95%9C%209%EC%A2%85%EC%9D%98%20%EA%B3%A0%EB%8F%85%EC%84%B1,2012%EB%85%84%EB%B6%80%ED%84%B0%20%EC%83%9D%EC%82%B0%EC%9D%B4%20%EC%A4%91%EB%8B%A8%EB%90%98%EC%97%88%EC%9C%BC%EB%A9%B0%2C%202015%EB%85%84%2011%EC%9B%94%EB%B6%80%ED%84%B0%20%EC%82%AC%EC%9A%A9%EC%9D%B4%20%EC%A0%84%EB%A9%B4
32. Food Safety Korea, (2025, December 4). Unsuitable for domestic food. Retrieved from https://www.foodsafetykorea.go.kr/portal/fooddanger/testUnfitDom.do?menu_no=4409&menu_grp=MENU_NEW02
33. Rural Development Administration (RDA), (2025, December 4). Herbicide application before invasive weed Senecio vulgaris L. blooms. Retrieved from https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEn-

try&dataNo=100000748843
34. Rural Development Administration (RDA), Pesticide Safety Information System (PSIS), (2025, December 4). Precautions for using pesticides containing terbufos and phorate. Retrieved from https://psis.rda.go.kr/psis/share/bbs/noticeDtl.ps?menuId=PS00282&nttSn=62
35. Kim, J.E., Kim, J.H., Lee, Y.D., Im, C.H., Heo, J.H., Jung, Y.H., 2020. The latest pesticide science, Sigmapress, Seoul, Korea, pp. 1-109.
36. Chun, O.K., Kang, H.G., Estimation of risks of pesticide exposure by food intake to Koreans. *Food Chem. Toxicol.*, **41**, 1063-1076 (2003).
37. Krol, W.J., Arsenault, T.L., Pylypiw, H.M., Incorvia Mattina, M.J., Reduction of pesticide residues on produce by rinsing. *J. Agric. Food Chem.*, **48**, 4666-4670 (2000).
38. Kim, N.H., Lee, J.S., Kim, O.H., Choi, Y.H., Han, S.H., Kim, Y.H., Kim, H.S., Lee, S.R., Lee, J.M., Yu, I.S., Jung, K., Monitoring of pesticide residues and risk assessment on agricultural products marketed in the northern area of Seoul in 2013. *J. Food Hyg. Saf.*, **29**, 170-180 (2014).

Supplementary Table

Supplementary Table S1. List of 252 pesticides analyzed by GC-MS/MS

Alachlor	Cinmethylin	Etoxazole	Isopropalin	Pretilachlor	Thiometon
Aldrin & Dieldrin	Clomazone	Etridiazole	Isoprothiolane	Prochloraz	Thionazin
Allidochlor	Coumaphos	Fenamidone	Isopyrazam	Procymidone	Tolclofos-methyl
Ametryn	Cyanophos	Fenarimol	Isotianil	Prodiamine	Triadimefon
Anilofos	Cyflufenamid	Fenbuconazole	Isoxadifen-ethyl	Profenofos	Tri-allate
Aramite	Cyhalofop-butyl	Fenchlorphos	Kresoxim-methyl	Profluralin	Triazophos
Aspon	Cyprazine	Fenclorim	Leptophos	Prohydrojasmon	Tridiphane
Atrazine	Cyprodinil	Fenfuram	Lindane	Prometon	Trifloxystrobin
Azaconazole	Deltamethrin	Fenitrothion	Mefenpyr-diethyl	Prometryn	Triflumizole
Benfluralin	Desmetryn	Fenobucarb	Mepanipyrim	Propachlor	Trifluralin
Benfuresate	Dialifor	Fenothiocarb	Mepronil	Propanil	Vinclozolin
Benodanil	Diallate	Fenoxanil	Metalaxyl	Propazine	Zoxamide
Benzoylprop-ethyl	Diazinon	Fenpropathrin	Methidathion	Propetamphos	
BHC(α, β, δ)	Dichlobenil	Fenpropimorph	Methoprotryne	Propham	
Bifenthrin	Dichlofenthion	Fenpyrazamine	Methoxychlor	Propiconazole	
Boscalid	Dichlormid	Fenson	Methyl trithion	Propisochlor	
Bromobutide	Diclobutrazol	Fenthion	Metolachlor	Propyzamide	
Bromophos-ethyl	Diclofop-methyl	Fipronil	Metribuzin	Prothiofos	
Bromophos-methyl	Dicloran	Flamprop-isopropyl	MGK-264	Pyracarbolid	
Bromopropylate	Dicofol	Fluacrypyrim	Monolinuron	Pyraclofos	
Bupirimate	Dicrotophos	Fluazifop-butyl	Myclobutanil	Pyraflufen-ethyl	
Buprofezin	Diethatyl-ethyl	Fluchloralin	Nitrothal-isopropyl	Pyrazophos	
Butachlor	Diethofencarb	Flucythrinate	Nonachlor	Pyridalyl	
Butafenacil	Difenoconazole	Fluensulfone	Nuarimol	Pyrifenox	
Butralin	Diflufenican	Flufenpyr-ethyl	Oxadiazon	Pyriftalid	
Butylate	Dimepiperate	Flumetralin	Oxadixyl	Pyrimethanil	
Cadusafos	Dimethachlor	Flumioxazin	Oxyfluorfen	Pyriminobac-methyl	
Carbophenothion	Dimethametryn	Fluopyram	Paclobutrazol	Quinalphos	
Carboxin	Dimethenamid	Fluquinconazole	Parathion	Quinoxyfen	
Chlorbenside	Dimethomorph	Flurochloridone	Parathion-methyl	Quintozene	
Chlorbufam	Dimethylvinphos	Flusilazole	Penconazole	Silafluofen	
Chlordane	Diniconazole	Flutianil	Pendimethalin	Simeconazole	
Chlorethoxyfos	Dinitramine	Fluxapyroxad	Penflufen	Simetryn	
Chlorfenapyr	Dioxathion	Fonofos	Pentachlorobenzonitrile	Spiromesifen	
Chlorfenson	Diphenamid	Formothion	Penthiopyrad	Spiroxamine	
Chlorflurenol-methyl	Diphenylamine	Halfenprox	Pentoxazone	Sulfotep	
Chlornitrofen	Dithiopyr	Heptachlor	Permethrin	Tebuconazole	
Chlorobenzilate	Endosulfan	Heptenophos	Perthane	Tebufenpyrad	
Chloroneb	Endrin	Hexythiazox	Phenthoate	Tebupirimfos	
Chloropropylate	EPN	Indanofan	Phosalone	Tecnazene	
Chlorothalonil	Epoxiconazole	Indoxacarb	Phosmet	Tefluthrin	
Chlorpropham	EPTC	Ipconazole	Phosphamidone	Terbacil	
Chlorpyrifos	Etaconazole	Iprobenfos	Phthalide	Terbumeton	
Chlorpyrifos-methyl	Ethalfluralin	Iprodione	Picoxystrobin	Terbutryn	
Chlorthal-dimethyl	Ethion	Isazofos	Piperonyl butoxide	Tetrachlorvinphos	
Chlorthion	Ethofumesate	Isofenphos	Pirimicarb	Tetraconazole	
Chlorthiophos	Ethoprophos	Isofenphos-methyl	Pirimiphos-ethyl	Tetradifon	
Chlozolinate	Ethychlozate	Isoprocarb	Pirimiphos-methyl	Thifluzamide	

Supplementary Table S2. List of 228 pesticides analyzed by LC-MS/MS

Abamectin	Cymoxanil	Hexaconazole	Oryzalin	Spinetoram
Acephate	Cyproconazole	Hexaflumuron	Oxadiargyl	Spinosad
Acetamiprid	Daimuron	Hexazinone	Oxamyl	Spirodiclofen
Aldicarb	Demeton S Methyl	Imazalil	Oxathiapiprolin	Spirotetramat
Allethrin	Demeton S Methylsulphon	Imibenconazole	Oxaziclomefone	Sulfentrazone
Ametoctradin	Dichlorvos	Imicyafos	Oxycarboxin	Sulfoxaflor
Amisulbrom	Diclosulam	Imidacloprid	Oxydemeton-methyl	Sulprofos
Amitraz	Diflubenzuron	Inabenfide	Pebulate	Tebufenozide
Azamethiphos	Dimethoate	Ipfencarbazone	Pencycuron	Tebufloquin
Azinphos-methyl	Dinotefuran	Iprovalicarb	Penoxsulam	Tebuthiuron
Azoxystrobin	Disulfoton	Isoproturon	Phenmedipham	Teflubenzuron
Benalaxyl	Diuron	Isoxaben	Phenothrin	Tepraloxydim
Bendiocarb	Dodine	Isoxathion	Phorate	Terbufos
Bensulide	Emamectin benzoate	Lenacil	Phosfolan	Terbuthylazine
Benthiavalicarb-isopropyl	Esprocarb	Linuron	Phoxim	Tetraniliprole
Benzobicyclon	Ethaboxam	Lufenuron	Picarbutrazox	Thenylchlor
Benzoximate	Ethiofencarb	Malaoxon	Picolinafen	Thiabendazole
Benzyladenine	Etofenprox	Malathion	Piperophos	Thiacloprid
Bistrifluron	Etrimfos	Mandestrobin	Probenazole	Thiamethoxam
Bixafen	Famoxadone	Mandipropamid	Promecarb	Thiazopyr
Bromacil	Fenamiphos	Mecarbam	Propamocarb	Thidiazuron
Butocarboxim	Fenazaquin	Mefenacet	Propagite	Thiobencarb
Cafenstrole	Fenhexamid	Mefentrifluconazole	Propoxur	Tiadinil
Carbaryl	Fenoxaprop-ethyl	Mephosfolan	Proquinazid	Tolfenpyrad
Carbendazim	Fenoxycarb	Metaflumizone	Prosulfocarb	Triafamone
Carbetamide	Fenpyroximate	Metamifop	Pydiflumetofen	Triazamate
Carpropamide	Fensulfothion	Metamitron	Pyflubumide	Tribufos
Chlorantraniliprole	Fentrazamide	Metconazole	Pyraclonil	Tricyclazole
Chlorfenvinphos	Ferimzone	Methabenzthiazuron	Pyraclostrobin	Triflumuron
Chlorfluazuron	Flonicamid	Methamidophos	Pyraziflumid	Trimethacarb
Chloridazone	Fluazinam	Methiocarb	Pyrazolate	Triticonazole
Chlorobenzuron	Flubendiamide	Methomyl	Pyrazoxyfen	Uniconazole
Chlorotoluron	Fludioxonil	Methoxyfenozide	Pyribencarb	Valifenalate
Chloroxuron	Flufenacet	Metobromuron	Pyribenzoxim	Vamidothion
Chromafenozide	Flufenoxuron	Metolcarb	Pyributicarb	Vernolate
Clofentezine	Fluometuron	Metominostrobin	Pyridaben	XMC
Clomeprop	Fluopicolide	Metrafenone	Pyridaphenthion	
Clothianidin	Flupoxam	Mevinphos	Pyrifluquinazon	
Crotoxyphos	Flupyradifurone	Monocrotophos	Pyrimidifen	
Crufomate	Fluridone	Napropamide	Pyrimisulfan	
Cyanazine	Flusulfamide	Neburon	Pyriofenone	
Cyantraniliprole	Fluthiacet-methyl	Nitenpyram	Pyroquilon	
Cyazofamid	Flutolanil	Norea	Quinoclamine	
Cyclaniliprole	Flutriafol	Norflurazon	Saflufenacil	
Cycloate	Fluxametamide	Novaluron	Secbumeton	
Cycloprothrin	Fomesafen	Ofurace	Sedaxane	
Cyenopyrafen	Forchlorfenuron	Omethoate	Sethoxydim	
Cyflumetofen	Fosthiazate	Orysastrobin	Simazine	

Supplementary Table S3. GC-MS/MS conditions for analysis of pesticide residues

GC-MS/MS			
Instrument	GC (8890)-MS/MS (7010B, Triple Quad), Aglient		
Column	DB-5MS UI (30 m×250 μm×0.25 μm)		
Flow rate	1.2 mL/min (He)		
Injection vol.	1 μL		
Inlet temp.	260°C		
Oven temp.	Rate (°C/min)	Temp. (°C)	Hold (min)
	Initial	60	0
	20	180	0
	5	300	5
Split mode	Splitless		
MS source temp.	260°C		
MS quad temp.	150°C		
Ionization mode	Electron ionization (EI)		

Supplementary Table S4. LC-MS/MS conditions for analysis of pesticide residues

LC-MS/MS			
Instrument	LC (ACQUITY UPLC I-Class PLUS)-MS/MS (Xevo TQ-S micro)		
Column	CORTECS UPLC C18 1.6 μm (2.1 mm×100 mm)		
Flow rate	0.2 mL/min		
Injection vol.	2 μL		
Mobile phase	A: 0.1% Formic acid, 5 mM Ammonium acetate in water B: 0.1% Formic acid, 5 mM Ammonium acetate in methanol		
Gradient	Time (min)	A (%)	B (%)
	0.0	95	5
	0.65	95	5
	2.00	60	40
	8.00	30	70
	11.00	20	80
	15.00	0	100
	17.00	0	100
	19.00	95	5
Oven temperature	40°C		
Collision gas	N_2		
Ionization mode	Electrosopray ionization (ESI), Positive 3,000 V Electrosopray ionization (ESI), Negative 3,000 V		