

범용 농지에서 코이어 폐배지를 이용한 콩의 생육 및 품질 증대

왕신¹ · 박지우¹ · 이용재¹ · 이광야² · 박종석^{3,4*}

¹충남대학교 바이오 AI 융합학과 대학원생, ²충남대학교 농업과학연구소 연구교수,
³충남대학교 농업생명과학대학 원예학과 교수, ⁴충남대학교 바이오 AI 융합학과 교수

Enhancement of the Growth and Quality of Soybeans Using Wasted Coir Substrates on Multi-purpose Utilization Land

Xin Wang¹, Jiwoo Park¹, Yong Jae Lee¹, Gwang Ya Lee², and Jongseok Park^{3,4*}

¹Graduate Student, Department of Bio-AI Convergence, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Institute of Agricultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Professor, Department of Horticultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁴Professor, Department of Bio-AI Convergence, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract. In recent years, the government has strongly promoted multi-purpose utilization of paddy field. However, poor drainage causes waterlogging stress in upland crops, requiring subsurface drainage technology, resulting in high installation and management costs. To address this issue, a low-cost and high-efficiency technique was developed that utilizes wasted coir substrates which have characteristics of high porosity and good drainage, for upland crop cultivation in paddy fields. Soybeans were grown in both paddy soil and wasted coir slab with two planting densities (80×20 cm and 60×20 cm). The results showed that the coir substrates had better performance than the paddy soil in terms of soil physical and chemical properties and the growth and yield of upland crops are improved. The treatments using wasted coir substrate showed a 41.4% increase in yield and a 21.3% increase in protein content compared to PS treatment. Our findings demonstrate that recycling waste coir substrates to grow upland crops is a positive cultivation strategy to solve some drainage problems in paddy fields. This approach offers a sustainable solution for upland crop production while also addressing the issue of waste management in agriculture.

Additional key words: upland crops, drainage, waterlogging, sustainability, waste re-utilization

서 론

현대인의 농산물 소비 습성과 식생활 변화는 농산물 시장에 많은 영향을 미치고 있다. 특히 쌀은 아시아 지역에서 가장 중요한 식량 자원 중 하나로서 중요성을 갖고 있으나 지난 수십 년 간, 식생활의 변화로 쌀 소비량이 감소되었다(Jeong 등, 2021). 한국의 1 인당 쌀 소비량은 2022년 기준 56.7kg으로 보고되었으며, 이 수치는 전년 대비 약 0.4% 감소하였다(Kim, 2023a). 이에 정부는 논을 밭으로 전환하는 범용화 농지 정책으로 쌀 생산량을 조절하고 밭 작물 재배를 장려하여 농가 소득을 증대 시키고자 중장기 계획을 가지고 있다(Kim, 2022). 따라서 범용농지에서 수도작 이외의 타 작물 재배에 대한 연구가 필요하다.

밭 토양과 비교하여 불투수성인 논 토양은 배수성이 좋지 않기 때문에 범용 농지로 전환 시, 배수 불량으로 인한 작물의 근권부 과습 피해가 나타나고 생산성 저하로 이어진다(Bajgain 등, 2015). 이러한 배수 문제를 해결하기 위하여 정부는 범용 농지로 전환 시 성토기술이나 암거배수(Takeshima 등, 2023)를 설치하여 배수성을 개선시켜 왔다. 그러나 암거배수를 설치할 경우 많은 비용이 필요하고, 설치 후 암거 막힘 현상이 나타날 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 유지관리 기술이 별도로 필요하다. 성토의 경우 성토할 토양이 부족하고 투입 비용이 높을 뿐만 아니라 논 토양의 미생물 활동, 미네랄 농도 및 물리성이 변화될 수 있다(Ren 등, 2019). 이러한 이유로 논을 밭으로 전환하기 어려운 상황이며, 이런 문제를 해결할 재배 기술이 필요하다.

코이어 배지는 주로 코코넛의 껍질에서 추출된 섬유로 만들어지며, 친환경 재료로 코이어 배지의 사용량은 증가하고 있다(Choi 등, 2015). 논 토양과 비교하여 높은 공극률을 가지고

*Corresponding author: jongseok@cnu.ac.kr

Received October 26, 2023; Revised October 28, 2023;

Accepted October 30, 2023

있어 통기성과 배수성이 우수하다(Hwang 등, 2022). 이는 뿌리에 산소 공급을 향상시키고 균일한 수분함량을 유지하는 데 도움이 된다. 코이어 배지는 물을 잘 흡수하고 보유할 수 있는 능력이 뛰어나며, 과습과 건조를 방지할 수 있어, 주로 과채류 수경재배에서 많이 사용되고 있다(He 등, 2022; Lim 등, 2020). 시설 원예 면적이 지속적으로 확대되면서 배지 관련 시설원에 부산물도 증가하고 있으며 2022년 기준 시설 재배면적이 1990년대 대비 2배로 증가했다(Kim, 2023b).

현재 국내의 과채류 시설 재배 농가들은 코이어 또는 암면 배지 등의 재배 후 폐기 시, 자가 재활용 이외에는 외부로 유출 시에는 일반 폐기물로 처리해야 한다. 그러나 많은 농가에서는 이러한 배지들을 파쇄하거나 직접 토양개량제로 활용하여 처리하는 경우가 많다. 이러한 배지들의 중금속 등 유해성분 분석 결과, 고농도의 무기염 이외에 별다른 문제가 없는 것으로 보고되었다(Rhie 등, 2018). 이에, 파프리카를 재배한 후 폐기되는 코이어 슬라브를 활용하여 범용농지에서 콩을 재배할 때, 작물의 성장과 품질에 미치는 영향을 살펴보고자 본 실험을 수행하였다.

재료 및 방법

1. 시험 작물 및 재배 조건

내습성에 강한 메주콩(*Glycine max* ‘대찬’, Nongwoobio Co., Ltd., Korea)을 발 작물로 선정하여 실험에 이용하였다. 실험은 대전광역시(36.22°N, 127.21°E) 소재 논(900m²)에서 실시하였으며, 콩은 2022년 5월 31일에 파종하여 10월 26일까지 약 5개월 동안 재배되었다. 기비량 산정을 위하여 대전광역시 농업기술센터에 의뢰하여 토양 내 비료 성분 분석을 실시한 후, 콩 재배를 위하여 10a당 화학비료 질소 4.7kg, 인산 8.9kg, 칼리 5.6kg을 기비하였다. 범용 농지 재배 시 배수 개선을 위해 실험구의 이랑 높이를 40cm로 조성하였다. 실험에 사용된 코이어 폐배지는 배지 내 존재하는 다량의 염분을 제거하기 위해 파종하기 전 3일간 포수하였다. 무강우 일수가 7일이 넘을 경우에 7일에 1회씩 포장용수량 조건으로 범용농지에 관수하였다. 코이어 배지의 경우 타이머 방식을 이용하여 비가 오지 않은 조건에서 생육 초기에 90mL/plant 기준으로 4-5회, 중기에는 100mL/plant 기준으로 6-7회 관수하였으며 수확 2주 전부터 관수를 중단하였다.

2. 실험 처리구

실험은 재식 간격 처리와 범용 농지(paddy soil: PS)/코이어 폐배지(coir substrate: CS) 처리로 두었다. 이랑 조성 후 검정 필름으로 멀칭하였으며 재식 간격은 조간과 주간의 폭을

80×20cm(1L: 1줄 재배) 및 60×20cm(2L: 2줄 재배)의 두 개의 재식 간격 처리와 각각에 대해서 논 토양과 배지경으로 구성했다. 멀칭 위에 칼집을 내어 코이어 배지가 토양 위에 놓일 수 있도록 코이어 배지를 설치하였으며 코이어 배지에서 재배되는 식물의 뿌리가 토양 속에서 잘 성장할 수 있도록 배지 밑 부분에 직경 7cm로 비닐을 잘라 내었다. 따라서 본 실험 처리구는 총 4개로 구성되었으며, 각 처리구를 2반복으로 설계하였다.

코이어 폐배지는 파프리카 농장에서 수경재배용 슬라브 형태의 코이어 배지(100×20×10, Daeyoung GS Co., Ltd., Korea)를 1작기 사용 후 회수하여 실험에 사용하였다. 논 토양과 코이어 배지의 물리화학적 분석을 위하여 실험 포장의 5개 지역에서 표토층(0-20cm)의 토양 시료를 채취하였으며 코이어 폐배지는 임의로 10개의 슬라브에서 시료를 채취하여 분석을 의뢰하였다. 논 토양과 코이어 폐배지의 물리성 분석을 위해 입자 밀도, 용적 밀도 및 공극률을 측정하였고 화학성 분석으로 pH(1:5), EC, 유기물 함량, 유효 인산, 치환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘 함량을 측정하였다.

3. 작물 생육조사

작물 생육 분석을 위해 Fehr와 Caviness(1977)이 제시한 콩의 생육 단계(V4, R2, R8)를 기준으로 파종 후 30일(V4: 제4본엽기) 및 90일인 개화기(R2: 개화성기), 148일인 수확기(R8: 성숙기)에 처리구 별로 2반복으로 각각 5개체씩 생육 조사하였다. 콩을 생육초기단계 및 개화기에 SPAD, 초장, 엽수, 엽면적, 지상부 생체중, 건물중 및 꽃 개수를 조사하였다. 성숙기에 수량구성요소 중에 2개 이상의 마디를 갖는 분지의 개수, 꼬투리 개수 및 수확 후 각 처리구 종자를 탈립하여 100립중을 조사하였다. 휴대용 엽록소 분석기(SPAD-502, Konica Minolta Co., Ltd., Osaka, Japan)를 이용하여 SPAD(Single-photon Avalanche Diode) 값을 측정하였고, 엽면적 측정은 Li-3100(LiCor Co., Ltd., Lincoln, NE, USA)을 이용하였다. 시료의 무게는 전자저울(MW²N, CAS Co., Ltd., Yangju, Korea)로 측정하였다. 수확된 콩 종자의 단백질 함량은 spectrophotometer(EpochTM, Agilent Technologies Co., Ltd., California, USA)를 이용하여 595nm에서 Bradford(1976)가 제시한 흡광도 방식으로 측정하였고, 조지방 함량은 헥산인(Hexane, 95%)을 용매로 하여 Soxhelt Heater(C-SH6, Deayoung Lab Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 추출 전과 추출 후의 무게 차이를 계산하여 구하였다.

4. 통계분석

통계 분석을 위해서 SPSS(Version 26.0.0, SPSS Inc., IL,

USA) 프로그램을 이용하여 분산분석(two-way ANOVA)을 실시하였고 각 처리 간 평균값 간의 유의성 검정을 위해서 Tukey의 다중검정(Tukey's multiple range test) 및 표본T-검정(independent sample t-test) 방법으로 5% 유의수준에서 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 논 토양 및 코이어 폐배지의 물리화학적 특성

본 실험에 사용한 코이어 폐배지와 논 토양의 입자 밀도는 1.47 및 2.49g·cm⁻³, 용적 밀도는 0.07 및 1.25g·cm⁻³, 공극률은 95.2 및 49.8%로 측정되었다(Table 1). 코이어 폐배지와 논 토양의 pH는 각각 5.0 및 6.1이었으며, 이는 농촌 진흥청에서 권장하는 밭 작물의 적정 토양 산도인 pH 6.5 - 7.0보다 낮았다. EC는 코이어 폐배지와 논 토양에서 각각 4.0 및 1.42dS·m⁻¹로 측정되었으며, 폐배지의 EC는 밭 작물의 적정 범위보다 매우 높게 나타났다(Table 1). 코이어 폐배지의 유기물 함량은 80.9%로 측정되었으며, 반면 논 토양은 0.15%로 매우 낮았다. 또한, 유효 인산, 치환성 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺의 함량은 코이어 폐배지가 논 토양보다 높게 측정되었으며, 이는 1년간 파프리카의 수경재배로 사용된 양액이 코이어 폐배지에 누적되어 논 토양보다 높게 측정된 것으로 사료된다.

물리적 특성, 즉 입자밀도, 용적밀도, 공극률은 작물 뿌리 발달에 미치는 영향을 평가하는 데 중요한 요소이며(Konnerup 등, 2018), 국내의 밭으로 전환 전 논 토양의 토성은 양토, 사질 양토 및 미사질 양토로 보고되었다(Lee 등, 2010). 이런 토성은 점토의 함량이 높고 토양 입자의 크기가 작아 배수성이 낮아진다. 토양의 물리성 분석결과 실험 포장의 토질은 논 토양과 같은 특성을 가지고 있는 미사질 양토였으며, 특성으로 보아 코이어 폐배지의 물리성이 범용 농지 토양에 비해 배수성 및 통기성이 우수한 것으로 판단된다. 화학성의 경우 논 토양은 장기간 물에 잠겨 있어 유기산이 생성될 가능성이 크며, 토

양의 pH가 낮아진다는 선행 연구와 같은 경향을 나타냈다(Okada 등, 2011). 파프리카 1작기를 끝내고 재 사용된 코이어 폐배지는 새 배지와 비교하여 pH가 낮아진 것으로 사료되며, 이는 코이어 폐배지 내에서 반험기성 상태로 코코넛 섬유질이 분해가 진행되어 분해 중간 산물인 옥살산과 같은 산성 물질이 발생한 것으로 판단된다(Lee 등, 2018). EC 및 치환성 양이온 농도가 코이어 폐배지에서 높게 나타났으며, 이는 코이어 폐배지를 재활용 시 잔류 인산 농도가 높아진다는 보고(Lee 등, 2016)와 같은 결과를 나타냈다. 범용 농지의 전환 연한이 길어질수록 토양 내 산소 농도가 높아져 토양 미생물에 의한 유기물 분해가 활발해지며, 유기물 함량이 낮아진다고 보고되었다(Han 등, 2017). 침수처리 후에 식물 체내에 질소, 인산, 칼륨, 칼슘 및 마그네슘 농도가 감소하며, 저산소 스트레스에 의한 뿌리의 영양 흡수 및 전달을 억제했기 때문으로 사료된다(Gao 등, 2011; Trought와 Drew, 1980). 그러나 코이어 폐배지는 작물 근권부에 과습 피해를 예방할 수 있을 뿐만 아니라 작물의 생장에 필요한 영양으로 공급할 수 있다. 따라서 본 연구에서 코이어 폐배지를 사용하여 배수성이 크게 향상되었을 뿐만 아니라 근권부 미생물의 활동에 충분한 유기물을 제공할 수 있는 것으로 생각된다. 작물재배에 필요한 적절한 배수성, 통기성, 양이온 치환능력, pH 및 EC 등에 있어서 파종 전 코이어 폐배지의 포수 처리는 필요한 것으로 판단된다.

2. 콩의 생장 및 품질

콩의 생육 초기(V4), 개화성기(R2), 성숙기(R8)에 생육 조사를 진행하였다. 생육 초기(V4 Stage) 콩의 생장은 1줄 재배와 2줄 재배 처리구를 비교하였을 때, 엽수는 1L-PS 처리구와 비교하여 1L-CS, 2L-CS, 2L-PS 처리구에서 각각 평균 22.4, 19.6 및 20.2개로 증가하였다. 1L-CS와 2L-CS 처리구에서 평균 엽면적은 각각 2,353 및 2,517cm², 생체중은 65.1 및 63.9g/plant, 건물중은 14.4 및 14.9g/plant로 PS 처리구와 비

Table 1. Physical and chemical properties of paddy field and coir substrate used in this study.

Substrate ^z	Physical properties ^y			Chemical properties ^x						
	PD (g·cm ³)	BD (g·cm ³)	TP (%)	pH (1:5)	EC (dS·m ⁻¹)	OM (g·kg ⁻¹)	AP (mg·kg ⁻¹)	Exch. cations (cmol ⁺ ·kg ⁻¹)		
								K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
CS	1.47	0.07	0.952	5.0	4	809.30	5181.80	17.54	91.44	30.95
PS	2.49	1.25	0.498	6.1	1.42	15	102	0.25	2.7	0.5
OP	-	-	-	6.5-7.0	<2	20-30	150-250	0.45-0.55	6.0-7.0	2.0-2.5

^zCS: coir substrate, PS: paddy soil, OP: optimal range from Daejeon Agricultural Technology Center.

^yPD: particle density, BD: bulk density, TP: total porosity.

^xOM: Organic matter, AP: Available P₂O₅.

교하여 유의적으로 증가하였다. 근권부 조건과 재식 간격의 상호작용(SUB×PD)에서 콩의 엽수에 유의한 차이가 있었다. 재식 간격에 관계없이 근권부 조건(SUB)의 CS와 PS 처리구를 비교했을 때 SPAD는 41.2 및 37.5, 엽수는 21.0 및 16.9개, 엽면적은 2,435.2 및 1,407.4cm², 생체중과 건물중은, 각각 65.1 및 38.0g/plant, 14.6 및 8.2g/plant로 CS 처리구에서 증가하였다. 그러나, 근권부 조건에 관계없이 재식 간격(PD)의 경우 유의한 차이가 없었다(Table 2).

개화성기(R2 Stage) 콩의 1L-CS 처리에서 엽수 98.8개, 엽면적 21,038cm², 생체중 645.7g/plant 및 건물중 109.2g/plant로, 나머지 처리구와 비교하여 증가하였다. 근권부 조건과 재식 간격의 상호작용(SUB×PD)에서 콩의 초장에는 유의한 차이가 있었다. 재식 간격에 관계없이 근권부 조건(SUB)의 CS와 PS 처리구를 비교했을 때, SPAD의 평균값은 각각 41.6과 37.6, 주당 엽수는 83.6과 57.1개, 엽면적은 17,045과 9,139 cm², 생체중은 563.7 및 298.5g/plant, 건물중은 90.7 및 56.9g/plant, 꽃 개수는 330.3 및 192.5개로 CS 처리구에서 유의적으로 증가하였다. 근권부 조건에 관계없이 재식 간격(PD)의 경우 엽수는 각각 평균 47.2 및 56.4개로 2줄 처리구에서 증가하였지만, 건물중은 각각 평균 83.7 및 63.9g/plant로

1L 처리구에서 유의적으로 증가하였다(Table 3).

수확기(R8 Stage) 콩의 1L-CS 처리구에서 꼬투리 수 116.6개, 수확량 445.0kg/10a, 조단백 함량 46.2%로 나머지 처리구와 비교하여 증가하였다. 근권부 조건과 재식 간격의 상호작용(SUB×PD)에서 콩의 꼬투리 수, 수확량 및 조단백 함량에 유의한 차이가 있었다. 재식 간격에 관계없이 근권부 조건(SUB)의 CS와 PS 처리구를 비교했을 때, 평균 분지수는 각각 7.3과 6.1개, 꼬투리 수는 101.9와 85.4개, 수확량은 392.1과 277.2kg/10a, 조단백 함량은 42.6과 35.1%로 CS 처리구에서 유의적으로 증가하였다. 근권부 조건에 관계없이 재식 간격(PD)의 경우 꼬투리 수는 각각 평균 102.5와 84.8개로, 두 줄 처리구와 비교하여 한 줄 처리구에서 꼬투리 수가 유의적으로 증가하였다(Table 4).

과습한 조건에서 잎의 기공 전도도가 떨어지고 기공 저항성이 증가하며, 광합성이 제한되므로 탄소 동화작용과 엽록소 함량이 감소된다(Pan 등, 2021). SPAD값은 상대적 엽록소 농도를 판단하는 지표로서(Bullock와 Anderson, 1998) 과습 피해로 인해 콩의 SPAD값은 무처리구와 비교하여 습해된 처리구에서 30 - 50% 감소한 것으로 보고되었다(Ploschuk 등, 2022). 콩의 영양생장(V5-V8) 단계에 과습피해로 인해 생산

Table 2. The growth parameters of soybean (*Glycine max*) at V4 stage under coir substrate and paddy soil with two planting densities.

Treatments		Growth parameters ^x					
PD ^z	SUB ^y	SPAD	SL (cm/plant)	LN (per plant)	LA (cm ² /plant)	FW (g/plant)	DW (g/plant)
1L	CS	41.2±0.55 a ^w	16.9±1.49 a	22.4±0.87 a	2353.2±84.98 a	65.1±2.88 a	14.4±0.94 a
	PS	36.4±0.42 b	18.6±0.50 a	13.6±1.21 b	1207.4±34.11 b	43.2±2.96 b	9.3±0.41 b
2L	CS	41.1±1.25 a	18.4±0.68 a	19.6±1.86 a	2517.2±142.53 a	63.9±2.51 a	14.9±0.72 a
	PS	38.7±0.78 ab	19.8±1.89 a	20.2±1.24 a	1607.4±118.35 b	32.8±2.40 b	7.1±0.50 b
<i>Main Effects</i>							
SUB	CS	41.2±2.04 a	17.6±2.58 a	21.0±3.40 a	2435.2±262.03 a	65.0±5.82 a	14.6±1.79 a
	PS	37.5±1.79 b	19.2±2.97 a	16.9±4.33 b	1407.4±279.57 b	38.0±7.89 b	8.2±1.53 b
PD	1L	38.9±2.73 a	17.7±2.52 a	18.0±5.14 a	1780.3±619.12 a	54.7±13.57 a	11.9±3.09 a
	2L	39.9±2.55 a	19.1±3.07 a	19.9±3.35 a	2062.3±553.35 a	48.4±17.19 a	11.0±4.31 a
<i>Significance of treatments</i>							
SUB		***	NS	**	***	***	***
PD		NS	NS	NS	*	*	NS
SUB×PD		NS	NS	**	NS	NS	NS

^zPD: planting density; 1L: 80×20 cm; 2L: 60×20 cm.

^ySUB: substrate; CS: coir substrate; PS: paddy soil.

^xSL: Stem length; LN: Leaf number; LA: Leaf area; FW: Fresh weight; DW: Dry weight.

^wAll data are expressed as mean ± standard error (*n* = 5). Different letters are significantly different (*p* < 0.05) according to Tukey's multiple range test.

NS, *, **, *** Non-significant or significant at *p* < 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

Table 3. The growth parameters of soybean (*Glycine max*) at R2 stage under coir substrate and paddy soil with two planting densities.

Treatments		Growth parameters ^x						
PD ^z	SUB ^y	SPAD	SL (cm/plant)	LN (per plant)	LA (cm ² /plant)	FW (g/plant)	DW (g/plant)	FN (per plant)
1L	CS	42.0±0.57 a ^w	49.2±2.03 ab	98.8±3.29 a	21038.4±420.94 a	645.7±27.05 a	109.2±1.38 a	359.4±47.35 a
	PS	36.2±0.66 c	45.2±1.39 b	57.4±2.77 b	9042.8±643.86 c	299.1±14.71 c	58.3±2.20 c	167.0±33.93 b
2L	CS	41.2±0.86 ab	56.3±1.97 a	68.4±2.20 b	13052.2±485.54 b	481.7±26.28 b	72.3±4.12 b	301.2±32.05 a
	PS	38.9±0.59 b	56.4±1.80 a	56.8±4.04 b	9236.8±521.93 c	298.0±6.09 c	55.5±23.32 c	218.0±17.46 b
<i>Main Effects</i>								
SUB	CS	41.6±1.60 a	52.8±5.64 a	83.6±17.08 a	17045.3±4316.73 a	563.7±103.10 a	90.7±20.49 a	330.30±48.93 a
	PS	37.6±1.95 b	50.8±6.81 a	57.1±7.31 b	9139.8±1239.78 b	298.5±23.73 b	56.9±6.12 b	192.50±37.01 b
PD	1L	39.1±3.34 a	47.2±4.23 b	78.1±22.74 a	15040.6±6425.39 a	472.4±188.37 a	83.7±27.09 a	263.20±108.59 a
	2L	40.1±1.94 a	56.4±3.98 a	62.6±9.19 a	11144.5±2274.41 a	389.9±104.87 a	63.9±11.85 b	259.60±50.15 a
<i>Significance of treatments</i>								
SUB		***	NS	***	***	***	***	***
PD		NS	***	***	***	**	***	NS
SUB×PD		*	NS	***	***	**	***	***

^zPD: planting density; 1L: 80×20 cm; 2L: 60×20 cm.

^ySUB: substrate; CS: coir substrate; PS: paddy soil.

^xSL: Stem length; LN: Leaf number; LA: Leaf area; FW: Fresh weight; DW: Dry weight; FN: Flower number.

^wAll data are expressed as mean ± standard error ($n = 5$). Different letters are significantly different ($p < 0.05$) according to Tukey's multiple range test.

NS, *, **, ***Non-significant or significant at $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

Table 4. The yield and quality of soybean (*Glycine max*) at R8 stage under coir substrate and paddy soil with two planting densities.

Treatments		Branch No.	Pods No.	100 seeds weight	Yield	Crude protein	Crude fat
PD ^z	SUB ^y	(per plant)	(per plant)	(g/plant)	(kg/10a)	(%)	(%)
1L	CS	7.4±0.24 a ^x	116.6±3.89 a	30.9±0.47 a	445.0±18.59 a	46.2±0.63 a	23.0±0.26 a
	PS	6.2±0.37 ab	88.4±5.47 b	31.1±1.30 a	286.8±6.83 bc	34.3±0.14 c	22.7±0.51 a
2L	CS	7.2±0.20 ab	87.2±4.68 b	30.4±1.12 a	339.2±14.48 b	39.0±0.48 b	22.5±0.49 a
	PS	6.0±0.45 c	82.4±2.09 b	30.1±0.77 a	267.7±11.81 c	35.8±0.20 c	22.8±0.41 a
<i>Main Effects</i>							
SUB	CS	7.3±0.48 a	101.9±17.96 a	30.7±1.83 a	392.1±65.87 a	42.6±3.96 a	22.8±0.88 a
	PS	6.1±0.88 b	85.4±9.29 b	30.6±2.32 a	277.2±22.69 b	35.1±0.87 b	22.8±0.98 a
PD	1L	6.8±0.92 a	102.5±17.92 a	31.0±2.07 a	365.9±88.46 a	40.3±6.31 a	22.9±0.87 a
	2L	6.6±0.97 a	84.8±8.05 b	30.2±2.03 a	303.5± 46.88 a	37.4±1.84 a	22.7±0.98 a
<i>Significance of treatments</i>							
SUB		**	**	NS	***	***	NS
PD		NS	**	NS	***	***	NS
SUB×PD		NS	*	NS	**	***	NS

^zPD: plant density; 1L: 80×20 cm; 2L: 60×20 cm.

^ySUB: substrate; CS: coir substrate; PS: paddy soil.

^xAll data are expressed as mean ± standard error ($n = 5$). Different letters are significantly different ($p < 0.05$) according to Tukey's multiple range test.

NS, *, **, ***Non-significant or significant at $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

량이 25 – 60% 감소된 것으로 보고되었으며, 생식생장(R1-R3) 단계에서 습해가 발생하면 생산량이 약 55 – 60% 정도 감소된다고 보고되었다(Ploschuk 등, 2022). 개화기에 습해로 인한 피해는 기공이 닫혀 화서부터 시들기 시작되며, 수분 흡수가 어려워 꽃 개수가 감소된다. 따라서 수확량에 대한 영향은 주로 꼬투리 수의 감소로 나타났으나 종자의 무게에는 큰 영향을 미치지 않았다(Wollmer 등, 2018). 본 실험 지역 대전시의 연평균 강수량은 1271.7mm이며 그 중에 연 강수량의 57% 약 719.3mm가 6월에서 8월까지 집중적으로 비가 내린다. 즉, 지역의 강우 특성은 콩의 영양생장 후기부터 생식생장기에 이르는 과도기에 집중되어 있다. 꼬투리 착생시작기(R3)에 콩의 낙화(落花) 또는 낙과(落果) 현상을 관찰하였다(Fig. 1B). 콩의 뿌리는 토양에서 질소를 흡수하여 자체 성장과 발달을 유도하는 것으로 알려져 있으며, 이를 두과 작물의 뿌리와 공생하는 근류균의 질소고정(nitrogen fixation) 능력이라고 한다(Jung 등, 2008). 근류균은 토양의 수분함량에 민감하며 장기간 과습된 조건에서 근류균의 수량 및 질소고정 능력을 심각하게 제한되어 수확량이 크게 감소된다(Harper, 1994). 근류균의 생존을 유지하기 위해 피트(peat) 및 코이어 더스트(coir dust)를 이용하여 콩을 재배한 결과 코이어 더스트 처리구에서 근류균 수량의 증가와 더불어 콩의 수확량도 증가한

것으로 보고되었다(Seneviratne 등, 1999). 본 연구에 CS와 PS처리구에서 콩의 생육 초기에 지상부의 발달이 차이가 나타났으며(Table 2), 개화기에 꽃 개수 CS처리구에서 PS처리구보다 2배로 증가하였다(Table 3). 수확기에 콩 분지수와 꼬투리 수가 증가가 수확량 증가로 나타났으며, 이는 범용 농지에서 코이어 폐배지의 재활용을 통해 콩의 습해 피해를 경감할 수 있는 것으로 판단된다.

과습 피해는 작물의 성장과 발육에 영향을 미치며, 식물 체내에 여러 복잡한 생리적 변화를 유발한다. 토양 과습 조건에서 식물의 뿌리 세포가 호기성 호흡이 어려워지면서 혐기성 호흡으로 전환되며, 세포 내에 포도당과 같은 탄수화물을 소모되어 알코올이나 알데히드가 생성된다(Perata와 Alpi, 1993). 그러나 식물의 세포 내에 알코올 및 알데히드가 과도하게 축적되면 세포에 독성을 일으켜 식물의 정상적인 성장 및 발육을 억제한다(Yordanova 등, 2004). 또한, 이러한 저산소 스트레스로 인해 완전히 환원되지 않은 전자가 산소와 결합하여 활성산소(reactive oxygen species, ROS) 농도가 상승되며(Andrade 등, 2018), 식물 세포 손상, 지질 과산화(lipid peroxidation) 및 메틸글리옥산(methylglyoxal) 함량이 증가한다(Zhou 등, 2020). Yasumoto 등(2011)은 지하수위가 높은 경우 해바라기(*Helianthus annuus*)의 수확량과 품질이 저

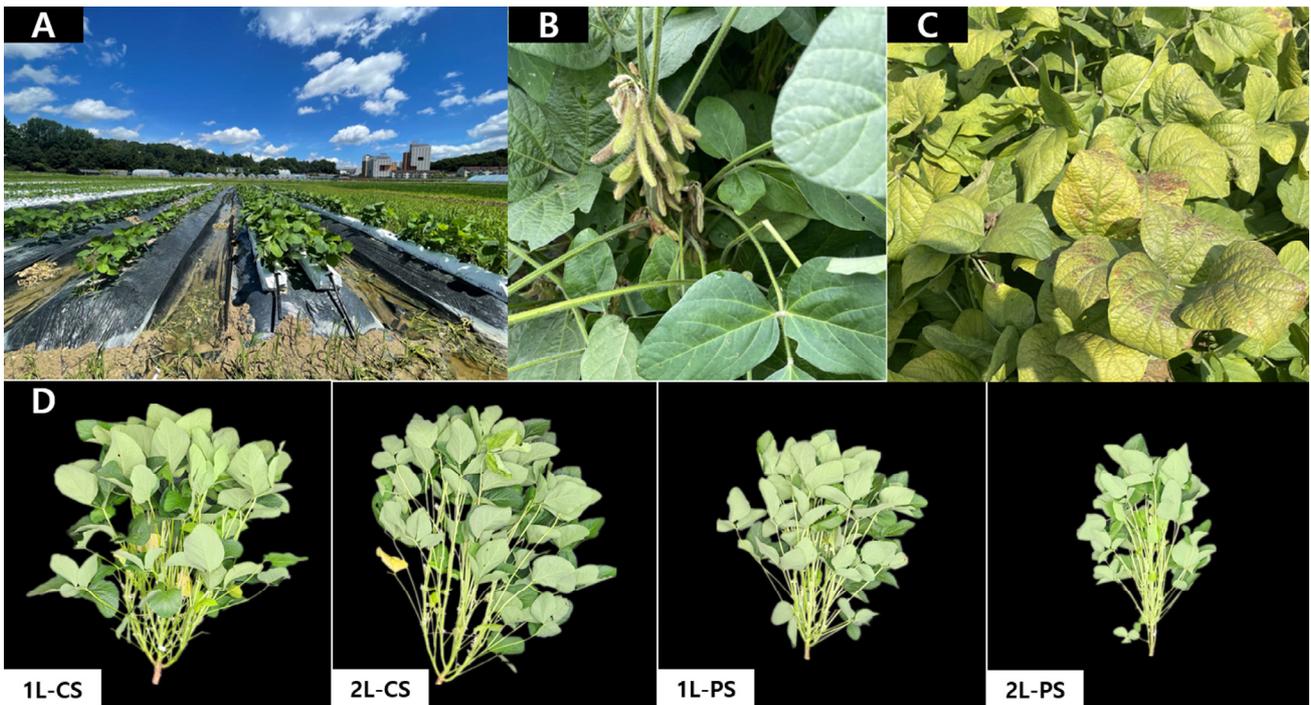


Fig. 1. Images of soybean (*Glycine max*) at the different growth stages and the experiment field. (A), the experiment field; (B), damaged soybean pods at the R3 stage; (C), foliar chlorosis or browning occurs at the R4 developmental stage; (D), representative images of each treatment at the R2 stage.

하되고 종자의 총 유질 함량이 감소한다는 것을 발표했으며, Liu 등(2009)은 홍수 발생의 경우 좁보리사초(*Carex pumila*)의 잎에 조단백과 조지방 함량은 감소한 것으로 보고하였다. 본 실험에서 콩의 PS 처리구에서 단백질 함량은 감소한 것으로 나타났다(Table 4). ROS의 산화 손상을 방지하기 위해 식물체 내에 superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD), catalase(CAT) 등 효소를 생성하여 제거할 수 있다(Pan 등, 2021). 그러나 장기간 혐기성 환경에서는 효소 활성이 저해되며, 세포 막의 인지질은 과산화되면서 MDA(malodialdehyde) 함량이 증가하게 되고 따라서 세포 막의 투과성 떨어지고 잎이 황변, 노화가 가속된다(Irfan 등, 2010; Puyang 등, 2015; Wollmer 등, 2018). 본 실험에서 콩의 꼬투리 착생성기(R4)부터 수확기 전반에 걸쳐 PS 처리구에서 잎의 황변 또는 갈변 현상을 보였다(Fig. 1C). 이는 장마기에 침수피해를 받은 것으로 판단된다. 침수 피해는 작물의 생장 및 수확량을 감소시킬 뿐만 아니라 단백질 함량을 감소시킨다. 침수된 토양에서 호기성 세균이 질산태 질소 또는 아질산태 질소를 호흡계의 전자수용체로 이용하여 기체 상태인 N₂ 또는 N₂O로 방출된다(Holtan-Hartwig 등, 2002; Saito 등, 2008). Uchida 등(2014)의 실험 결과에서 토양을 침수 처리 후에 탈질소 세균의 다양성이 증가하여 많은 N₂O가 방출되었다. 이에 따라 질소는 용탈 및 탈질작용을 통해 손실되며, 토양에서 질소 영양을 흡수하기 어려워지면서 식물의 질소 대사에 영향을 미친다. 질소는 아미노산, 단백질, 핵산, 지질, 엽록소 및 기타 대사산물의 합성에 관여하며, 식물 체내에 질소 함량 부족으로 인해 이런 대사산물의 함량을 감소시킨다(Wang 등, 2014). 옥수수(*Zea mays* L.)의 단백질 함량은 침수 처리 시간이 길어질수록 감소하는 경향을 보였으나 습해 발생 시 질소비료를 시비 처리 후에 단백질 함량이 증가한 것을 보였다(Kaur 등, 2017). Yordanova와 Popova(2001)은 보리(*Hordeum vulgare*) 침수처리 72시간 후에 잎의 가용성 단백질 함량이 감소하였으며, 동부콩(*Vigna unguiculata* L.)은 침수 처리 후에 종자 중 단백질 함량이 감소되는 것으로 보고되었다(Olorunwa 등, 2023). 본 실험에서 콩의 경우 PS 처리구에서 침수 피해로 조단백 함량 저하를 확인하였으며, 이러한 결과는 콩의 질소 흡수가 주로 근류균의 질소 고정작용에 의존하여 저산소 조건에 질소 흡수가 더 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 범용농지에서 코이어 폐배지를 활용하여 콩을 재배하였다. 기존에 범용농지를 위해 배수로를 개선하거나 암거배수 공사를 해야 했지만, 시설재배 부산물인 코이어 폐배지를 활용할 경우 논 토양의 불량한 배수성을 극복하여 생산성을 증가시키고 작물의 품질도 향상시킬 수 있다고 판단된다. 그러나 시설원예의 부산물인 코이어 폐배지를 범용농지

에 활용할 수 있도록 경제성 분석뿐만 아니라 법적 및 제도적 뒷받침이 필요하다. 또한, 코이어 폐배지를 조달해야 하고 관수시설이 필요한 번거로움과 경제적 추가 비용이 발생된다. 이에 대한 정확한 분석을 통해 보다 경제적이며 농가가 수익을 창출할 수 있는 방안을 강구하는 것이 필요하다.

적 요

우리나라 정부는 논·밭 범용화 사업을 적극적으로 추진하고 있다. 그러나 범용 농지의 배수 불량을 해결하기 위한 암거 배수 등의 기술이 필요하여 설치 및 관리 비용이 높아진다. 본 연구는 논 배수 불량과 관련된 문제를 해결하기 위한 코이어 폐배지를 활용하여 유망하고 지속 가능한 접근 방식을 제시할 수 있다. 콩을 논 토양 및 코이어 폐배지에서 두 재식 간격(80×20cm 및 60×20cm)으로 재배하였다. 공극률과 우수한 배수성을 특징으로 하는 코이어 배지를 재활용함으로써, 토양의 물리적 특성과 작물 생산성 및 품질을 모두 향상시키는 데 우수한 결과를 도출했다. PS 처리구와 비교하여 CS 처리구에서 수확량이 41.4% 증가하였고, 단백질 함량은 21.3% 증가하였다. 기존의 논·밭 범용 농지 전환을 위한 높은 초기투자 비용 및 유지비용을 줄일 수 있는 해당 기술은 국내외 농가에 높은 경제성과 환경 친화적인 범용 농지 재배 기술을 제공하고 범용 농지가 가지고 있는 배수 불량 문제를 해결하며 농업 폐기물 관리에 기여함으로써 다양한 사회적 솔루션을 제공할 수 있다. 이는 현대 농업에서 지속 가능한 농업과 진화하는 농업에 의거한 경종적 방법을 제시한다.

추가주제어: 밭작물, 배수, 습해, 지속가능성, 폐기물 재활용

사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 영농환경 변화에 따른 논·밭 범용활용 기반 조성 및 용수 공급 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었음(322077-3).

Literature Cited

- Andrade C.A., K.R.D. de Souza, M. de Oliveira Santos, D.M. da Silva, and J.D. Alves 2018, Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging. *Sci Hortic* 232:40-45. doi:10.1016/j.scienta.2017.12.048
- Bajgain R., Y. Kawasaki, Y. Akamatsu, Y. Tanaka, H. Kawamura, K. Katsura, and T. Shiraiwa 2015, Biomass production and

- yield of soybean grown under converted paddy fields with excess water during the early growth stage. *Field Crop Res* 180:221-227. doi:10.1016/j.fcr.2015.06.010
- Bullock D., and D. Anderson 1998, Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *J Plant Nutr* 21:741-755. doi:10.1080/01904169809365439
- Choi E.-Y., Y.-H. Yoon, K.-Y. Choi, and Y.-B. Lee 2015, Environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor. *Hortic Environ Biotechnol* 56:167-177. doi:10.1007/s13580-015-0036-y
- Fehr W., and C. Caviness 1977, Stages of soybean development. Iowa Agriculture and Economics Experiment Station Special Report 80. Iowa State University, Ames, IA, USA.
- Gao H., Y. Jia, S. Guo, G. Lv, T. Wang, and L. Juan 2011, Exogenous calcium affects nitrogen metabolism in root-zone hypoxia-stressed muskmelon roots and enhances short-term hypoxia tolerance. *J Plant Physiol* 168:1217-1225. doi:10.1016/j.jplph.2011.01.022
- Han K., H. Cho, H. Cho, H. Lee, J. Ok, M. Seo, K. Jung, Y. Zhang, and Y. Seo 2017, Effects of alternative crops cultivation on soil physico-chemical characteristics and crop yield in paddy fields. *Korean J Environ Agric* 36:67-72. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2017.36.2.11
- Harper J. 1994, Nitrogen metabolism. In KJ Boote, JM Bennett, TR Sinclair, GM Paulsen, eds, *Physiology and Determination of Crop yield*. ASA, CSSA, and SSSA Books, Madison, WI, USA, pp 285-302. doi:10.2134/1994.physiologyanddetermination.c19
- He L., X. Ding, H. Jin, H. Zhang, J. Cui, J. Chu, R. Li, Q. Zhou, and J. Yu 2022, Comparison of rockwool and coir for greenhouse cucumber production: chemical element, plant growth, and fruit quality. *Heliyon* 8. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e10930
- Holtan-Hartwig L., M. Bechmann, T.R. Høyås, R. Linjordet, and L.R. Bakken 2002, Heavy metals tolerance of soil denitrifying communities: N₂O dynamics. *Soil Biol Biochem* 34:1181-1190. doi:10.1016/S0038-0717(02)00055-X
- Hwang J., S. Yun, J. Kwon, M. Park, D. Lee, H. Lee, S. Lee, S. Lee, and Y. Hong 2022, Effects of coir substrate application and substrate volume on the growth and yields of strawberry in a hydroponically cultured system. *J Bio-Env Con* 31:163-169. (in Korean) doi:10.12791/ksbec.2022.31.3.163
- Irfan M., S. Hayat, Q. Hayat, S. Afroz, and A. Ahmad 2010, Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging. *Protoplasma* 241:3-17. doi:10.1007/s00709-009-0098-8
- Jeong O.Y., H.S. Park, M.K. Baek, W.J. Kim, G.M. Lee, C.M. Lee, M. Bombay, M.B. Ancheta, and J.H. Lee 2021, Review of rice in Korea: current status, future prospects, and comparisons with rice in other countries. *J Crop Sci Biotechnol* 24:1-11. doi:10.1007/s12892-020-00053-6
- Jung G., T. Matsunami, Y. Oki, and M. Kokubun 2008, Effects of waterlogging on nitrogen fixation and photosynthesis in supernodulating soybean cultivar Kanto 100. *Plant Prod Sci* 11:291-297. doi:10.1626/ppls.11.291
- Kaur G., B.A. Zurweller, K.A. Nelson, P.P. Motavalli, and C.J. Dudenhoeffer 2017, Soil waterlogging and nitrogen fertilizer management effects on corn and soybean yields. *Agron J* 109:97-106. doi:10.2134/agronj2016.07.0411
- Kim J. 2023a, Has rice consumption reached a turning point? Available via <https://www.krei.re.kr/krei/selectBbsNttView.do?key=109&bbsNo=75&nttNo=161689> Accessed 05 March 2023 (in Korean)
- Kim D. 2023b, Increasing number of by-products from facility cultivation are 'processed in secret'... Urgent need for system improvement. Available via <https://seogh.nonghyup.com/user/indexSub.do?siteId=seogh&framePath=unknowncomBoard&command2=boardView&handle2=2079396&configSeq=2079396&boardSeq2=5417653> Accessed 10 April 2023 (in Korean)
- Kim K. 2022, An analysis of the economic effects of the pilot project for multiple-purpose utilization of paddy fields focusing on income and welfare changes. *J Korean Soc Rural Plan* 28:71-85. (in Korean) doi:10.7851/ksrp.2022.28.2.071
- Konnerup D., G. Toro, O. Pedersen, and T.D. Colmer 2018, Waterlogging tolerance, tissue nitrogen and oxygen transport in the forage legume *Melilotus siculus*: a comparison of nodulated and nitrate-fed plants. *Ann Bot* 121:699-709. doi:10.1093/aob/mcx202
- Lee G., E. Park, Y. Park, K. Yeo, H. Rhee, and J. Kang 2016, Effect of recycled coir organic substrates on vegetable crop growth. *J Environ Sci Int* 25:1077-1085. (in Korean) doi:10.7584/JKTAPPI.2018.02.50.1.3
- Lee K., D. Lee, G. Suh, S. Noh, S. Min, and D. Chung 2018, Changes of the physical structure and chemical properties of cocopeat influenced by the changes of the components of cocopeat. *J Korea TAPPI* 50:3-10. (in Korean) doi:10.7584/JKTAPPI.2018.02.50.1.3
- Lee Y., S.-T. Lee, J. Heo, M.-G. Kim, K.-P. Hong, W.-D. Song, C.-W. Rho, J.-H. Lee, W.-T. Jeon, B.-G. Ko, K.-A. Roh, and S.-K. Ha 2010, Monitoring of chemical properties from paddy soil in gyeongnam province. *Korean J Soil Sci Fert* 43:140-146. (in Korean)
- Lim M.Y., S.H. Choi, H.J. Jeong, and G.L. Choi 2020, Characteristics of domestic net type melon in hydroponic spring cultivars using coir substrates. *Hortic Sci Technol* 38:78-86. (in Korean) doi:10.7235/HORT.20200008
- Liu S., S. Zhou, H. Zheng, X. Zhu, and J. Yang 2009, Restoration dynamics after waterlogging of *Carex thunbergii* on leaf physiological indexes and above-ground nutritions. *Acta Pratac Sin* 18:83-88. doi:10.11686/cyxb20090213
- Okada H., S. Niwa, S. Takemoto, M. Komatsuzaki, and M. Hiroki

- 2011, How different or similar are nematode communities between a paddy and an upland rice fields across a flooding–drainage cycle? *Soil Biol Biochem* 43:2142-2151. doi:10.1016/j.soilbio.2011.06.018
- Olorunwa O.J., B. Adhikari, S. Brazel, R. Bheemanahalli, T.C. Barickman, and K.R. Reddy 2023, Waterlogging stress reduces cowpea (*Vigna unguiculata* L.) genotypes growth, seed yield, and quality at different growth stages: implications for developing tolerant cultivars under field conditions. *Agric Water Manag* 284:108336. doi:10.1016/j.agwat.2023.108336
- Pan J., R. Sharif, X. Xu, and X. Chen 2021, Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects. *Front Plant Sci* 11:627331. doi:10.3389/fpls.2020.627331
- Perata P., and A. Alpi 1993, Plant responses to anaerobiosis. *Plant Sci* 93:1-17. doi:10.1016/0168-9452(93)90029-Y
- Ploschuk R., D. Miralles, and G. Striker 2022, A quantitative review of soybean responses to waterlogging: agronomical, morpho-physiological and anatomical traits of tolerance. *Plant Soil* 475:237-252. doi:10.1007/s11104-022-05364-x
- Puyang X., M. An, L. Xu, L. Han, and X. Zhang 2015, Antioxidant responses to waterlogging stress and subsequent recovery in two Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) cultivars. *Acta Physiol Plant* 37:1-12. doi:10.1007/s11738-015-1955-z
- Ren T., R. Bu, S. Liao, M. Zhang, X. Li, R. Cong, and J. Lu 2019, Differences in soil nitrogen transformation and the related seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under paddy-upland and continuous upland rotations. *Soil Tillage Res* 192:206-214. doi:10.1016/j.still.2019.05.008
- Rhie Y.H., S. Kang, J.M. Choi, and J. Kim 2018, Physical and chemical properties of bottom ash and coir dust mix used as horticultural substrates. *Hortic Sci Technol* 36:161-171. doi:10.12972/kjhst.20180017
- Saito T., S. Ishii, S. Otsuka, M. Nishiyama, and K. Senoo 2008, Identification of novel Betaproteobacteria in a succinate-assimilating population in denitrifying rice paddy soil by using stable isotope probing. *Microbes Environ* 23:192-200. doi:10.1264/jsme2.23.192
- Seneviratne G., L. Holm, and E. Ekanayake 1999, Effect of peat and coir dust-based rhizobial inoculants on the nodulation, plant growth and yield of soybean (*Glycine max* [L.] Merrill cv PB 1.
- Takeshima R., S. Murakami, Y. Fujiwara, K. Nakano, R. Fuchiyama, T. Hara, T. Shima, and T. Koyama 2023, Subsurface drainage and raised-bed planting reduce excess water stress and increase yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Field Crop Res* 297:108935. doi:10.1016/j.fcr.2023.108935
- Trought M., and M. Drew 1980, The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) II. Accumulation and redistribution of nutrients by the shoot. *Plant Soil* 56:187-199.
- Uchida Y., Y. Wang, H. Akiyama, Y. Nakajima, and M. Hayatsu 2014, Expression of denitrification genes in response to a waterlogging event in a Fluvisol and its relationship with large nitrous oxide pulses. *FEMS Microbiol Ecol* 88:407-423. doi:10.1111/1574-6941.12309
- Wang M., Q. Shen, G. Xu, and S. Guo 2014, New insight into the strategy for nitrogen metabolism in plant cells. *Int Rev Cell Mol Biol* 310:1-37. doi:10.1016/B978-0-12-800180-6.00001-3
- Wollmer A.C., B. Pitann, and K.H. Mühling 2018, Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality. *J Agron Crop Sci* 204:165-174. doi:10.1111/jac.12244
- Yasumoto S., Y. Terakado, M. Matsuzaki, and K. Okada 2011, Effects of high water table and short-term flooding on growth, yield, and seed quality of sunflower. *Plant Prod Sci* 14:233-248. doi:10.1626/pp.14.233
- Yordanova R., and L. Popova 2001, Photosynthetic response of barley plants to soil flooding. *Photosynthetica* 39:515-520.
- Yordanova R.Y., K.N. Christov, and L.P. Popova 2004, Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding. *Environ Exp Bot* 51:93-101. doi:10.1016/S0098-8472(03)00063-7
- Zhou W., F. Chen, Y. Meng, U. Chandrasekaran, X. Luo, W. Yang, and K. Shu 2020, Plant waterlogging/flooding stress responses: from seed germination to maturation. *Plant Physiol Biochem* 148:228-236. doi:10.1016/j.plaphy.2020.01.020