The Effect of Mulching and Non-Mulching on Soil Erosion, Nutrient Loss, and C factor Using Lysimeter under Double Cropping System

Sorakon Suwanmanon¹ and Ki In Kim^{2*}

¹Researcher, Department of Horticultural Science, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

²Associate Professor, Department of Horticultural Science, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

*Corresponding author: rollingkim@mokpo.ac.kr

ABSTRACT

Received: November 16, 2021

Accepted: November 22, 2021

ORCID

Sorakon Suwanmanon

<https://orcid.org/0000-0002-6162-6109>

Ki In Kim

<https://orcid.org/0000-0003-3084-3650>

Evaluating soil erosion becomes critical because of climate changes, sporadic and localized raining events over years in Korea. The objective of this study was to evaluate the amount of soil erosion and to calculate C factor under different crop management system. Six lysimeters were installed with 13% slope at Muan, Jeon-Nam, Korea. Four crops, onion, sesame, garlic, and sweet potatoes were grown consecutively. Treatments were with and without mulching for onion, and with and without mulching and control (no crop) for the others. All crops grew better under mulching than non-mulching treatments. The amount of eroded soil under mulching treatment reduced 2,280, 8,076, 2,337, 2,262.9 kg ha⁻¹ for onion, sesame, garlic, and sweet potatoes, respectively compared to under non-mulching treatment. Losses in soil and nutrient are the main reasons of economic disadvantage. Economic loss due to soil loss was 45,610 won ha⁻¹ for onion, 161,520 won ha⁻¹ for sesame, and 46,740 won ha⁻¹ for garlic if estimated soil value was 20,000 won ton⁻¹. Nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) from runoff water was less observed under mulching treatments compared to non-mulching treatments. Overall, the contribution of economic loss for onion without mulching was 30% from soil loss and 70% from nutrient, while its loss with mulching was 42% from soil loss and 58% from nutrient. The contribution of economic loss for sesame without mulching was 90% from soil loss and 10% from nutrient, while its loss with mulching was 94% from soil loss and 6% from nutrient. For sesame current C factor without mulching was 0.34, while calculated C factor for sesame under mulching was 0.25. These results indicate that the amount of soil erosion and nutrient loss can be decreased under different crop management system. Especially, covering crops, such as mulching is important to reduce the amount of soil erosion if more frequent unexpected climate change events happen.

Keywords: C factor, Lysimeter, Nutrient loss, Soil erosion, USLE

Contribution of economical loss due to soil loss and nutrient loss under mulching and non-mulching treatment during onion, sesame, and garlic cultivation.

Crop	Total economical loss (Won)		Contribution of economical loss (%)			
	Mulching		Mulching			
			No		Yes	
	No	Yes	Soil loss	Nutrient loss	Soil loss	Nutrient loss
Onion	256,360	78,810	30	70	42	58
Sesame	281,300	98,710	90	10	94	6
Garlic	232,240	61,160	27	74	25	75

Introduction

토양침식은 토양의 이동 (Lupia-Palmieri, 2004)에 따른 유효토심 감소, 양분유출, 작물생산량 감소 등 다양한 요인들이 유기적으로 연결되어 있어 환경오염과 식량안보에 영향을 미치고 있다 (Stocking, 2003). 최근 들어 기후변화에 따른 다양한 농업환경 변화 (OECD, 2001)가 토양침식과 더불어 발생하고 있다. 토양침식량은 Universal Soil Loss Equation (USLE) 모델, Geographic Information System (GIS) Soil & Water Assessment Tool (SWAT) 모델, GIS-USLE 모델 등 다양한 모델식에 의해 추정되고 있고 또한 실험을 통한 실제 측정량으로 토양유실량을 산정하고 있다. FAO & ITPS 보고 (FAO & ITPS, 2015)에 의하면 모델식에 의한 토양침식량의 범위는 $2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 부터 $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이고 실측에 의한 토양침식량의 범위는 $8 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 부터 $50 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 으로 토양침식측정량은 모델식에 의한 추정정보보다 훨씬 더 높다고 보고하였다. 베트남 중부지역의 보강 상류쪽의 GIS SWAT 모델을 활용한 연평균 토양침식 예측량은 2007년 $92.33 \text{ ton ha}^{-1}$, 2010년 $85.41 \text{ ton ha}^{-1}$, 2005년 $76.79 \text{ ton ha}^{-1}$ 였고 10년 평균 (2000년부터 2010년) 토양 침식량은 $62.50 \text{ ton ha}^{-1}$ 였고 25% 이상의 경사도인 경우 토양침식량은 2007년 $153.48 \text{ ton ha}^{-1}$ 로 예측되었다 (Phuong et al., 2017). 토양침식에 의한 전 세계 작물생산량 감소량은 0.4%에 이른다고 추정하였고 이로 인한 양분유실까지 고려하면 훨씬 더 심각하다고 보고하였다. 이에 따라 모델식에서 예측한 토양유실량과 작물재배지에서 실측한 토양침식량이 일치하는지에 대한 검증작업을 추가적으로 진행해야 할 것이다.

토양침식에 관한 우려와 관심은 우리나라의 경우도 예외는 아니다. 특히 우리나라는 전 국토의 약 65%가 산악지형으로 구성되어 있을 뿐만 아니라 경사도 2% 이상의 경사지가 75%를 차지하고 있다. 우리나라 전역의 토양 유실량은 연간 50백만톤 정도이며, 이중 농경지 토양 유실은 56%를 차지한다. 단위 면적 당 연간 토양 유실량은 밭에서 41.0 MT ha^{-1} , 과수원 11.1 MT ha^{-1} , 임야 3.5 MT ha^{-1} 로 밭의 토양침식 위험성이 가장 높다 (Jung et al., 2004). Heo et al. (2008)은 GIS-USLE 시스템을 평가하기 위해 전라남도 지역의 고당지역에서 2년간 (1999년과 2000년) 1,285개의 개별포장에서 평가를 하였고 평균경사도는 14%였다. 이 연구기간동안 24시간동안 내린 최대 강우량은 154.6 mm 였고 평균 토양침식량은 5 ton ha^{-1} 였고 경사도가 토양침식에 가장 크게 관여하는 인자라 하였다.

최근 들어 기후변화로 인한 강우의 지역별 편차는 급격히 증가하고 있고, 이로 인한 가뭄, 홍수와 같은 자연재해, 토양침식, 양분용탈, 비점오염 증가, 농작물 생산량 감소 등 사회·경제적 손실이 증가하고 있다. 토양은 금전적으로 환산이 불가능한 유한의 자원이므로 토양침식 저감을 통한 식량안보 및 지속가능한 농업환경 유지에 대한 관심이 점점 더 커지고 있다 (Chang and Yun, 1994). 우리나라의 경우 기후변화와 연계하여 생기는 계절별, 연도별, 지역별 강수량의 편차가 약 19%에 달하는 등 농경지 토양침식의 위험성이 매우 크기 때문에 우심지역에 대한 영농 및 정책적 실행이 필요하다. 현재 토양 침식량 예측은 미국농무성 (USDA)에서 1930년부터 축적된 농업환경 데이터를 바탕으로 개발한 범용토양침식공식 (USLE)을 널리 사용하고 있지만 (Wischmeier, 1960; Wischmeier and Smith, 1978), 우리나라의 경우 강우와 토양특성, 토지이용, 지형특성 등 상이한 지역특이성을 가지고 있어 적용 시 큰 오차가 발생된다. 더욱이 최근 들어 발생하는 기후변화에 따른 그 오차 폭이 증가할 것으로 예상되기 때문에 한반도 강우변동과 토지이용에 따른 식생피복 인자를 고려한 중·장기적 토양침식 위험성과 환경영향 평가기법 도입이 필요하다.

우리나라에서 발생하는 비점오염원 중 가장 큰 비중을 차지하는 토양침식은 수자원의 약 50%를 차지하고 있는 하천수, 댐용수, 지하수 등 농업용수의 품질을 저하시키는 것은 물론 이를 정화하기 위한 비용발생, 레저산업 활동 제한, 생태계 교란 등 막대한 경제적 비용 지출로 이어져 이를 저감하기 위한 기술적 접근과 관리방안, 정책제안 등을 필요로 한다. 현재까지 우리나라에서는 토양 침식 저감을 위한 많은 연구가 이루어져 왔고 일정한 면적과 경사도를 갖춘

라이시미터를 활용하여 양분 및 토사유출량 등을 조사하였다 (Lee et al., 2006; Cho et al., 2010). 우리나라의 토양침식 위험성을 판단하기 위한 강우침식인자 및 토양침식인자 등의 지표 데이터는 매우 제한적 (Kim et al., 2012)이거나 기후변화 변동에 적절히 대응하지 못하고 있는 실정이다. Park et al. (2011)은 기상청 산하 전국 60개 지점의 30년 자료 (1981 - 2010년) 중 60분 단위 강우량 자료를 활용하여 강우침식인자를 전국단위로 산정하여 토양침식현황 보고 하였다. 하지만 범용토양유실공식에서 요구하는 강우자료인 경우 최근 기후변화 등을 고려할 경우 지역별 강우강도 및 패턴이 다양해지고 있어, 이 때문에 발생하는 USLE 산정치의 불완전성으로 인해 각 나라별로 미국 Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)과 웹기반 Water Erosion Prediction Project (WEPP), 독일 USLE기반 Allgemeine boden abtrags gleichung (ABAG), 한국형 침식평가 모델 (K-USLE) 등을 사용하여 지속적으로 발전시키고 있다. 기후변화로 인한 토양침식 저감을 위해서는 피복과 나지 유무 등도 매우 중요한 인자로서 평가되어야 한다. Doetterl et al. (2016)은 토양침식으로 인한 토양유기물 함량 감소와 그로 인한 탄소순환의 문제점들에 대하여 보고하였다. Van Oost et al. (2007)은 경운과 물에 의한 토양침식으로 인해 $0.12 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 의 손실량을 보고하였다. 우리나라 남부지역인 경우 국지성 호우 등에 의한 강우강도 변화와 동계작물 양파 (*Allium cepa* L.), 마늘 (*Allium sativum* L.) 및 하계작물 참깨 (*Sesamum indicum* L.), 고구마 (*Ipomoea batatas* L.) 재배 등 작부체계 변화에 따른 토양침식 연구 등이 수행되어야 하며 문순기후대에 위치한 우리나라 강우강도와 패턴, 다양한 식생피복에 따른 다수 지역에서의 지역별 정량적 토양침식 위험성의 평가가 이루어져야 한다. 본 연구의 목적은 라이시미터를 활용하여 남부지역의 밭작물 식생피복인자 및 토양침식으로 인해 발생하는 침식량과 양분유출량을 평가하고자 한다.

Materials and Methods

시험포 설치 본 실험은 전라남도 무안군 청계면 목포대학교 실습포장에 경사 13%인 6개의 라이시미터 ($1.2 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$)를 활용하여 자연강우에 의한 토양유실량을 측정하였고 재배작물로는 동계작물 (양파, 마늘)과 하계작물 (참깨, 고구마)를 연구년도 별로 재배하였다 (Table 1). 실험처리로 양파는 무멀칭과 멀칭 처리를 하였고, 마늘, 참깨, 고구마는 무멀칭, 멀칭, 무작물의 3처리로 하여 작물생육 및 유거수에 의한 토양유실량을 측정하였다.

Table 1. Summary of crop rotations with several treatments using lysimeter.

Year/Season	Crop	Mulching		Control (no crop)	Crop cultivation period
2017 winter	Onion	Yes	No	No	2017. 11. 7 - 2018. 5. 21
2018 summer	Sesame	Yes	No	Yes	2018. 6. 28 - 2018. 9. 12
2018 winter	Garlic	Yes	No	Yes	2018. 10. 18 - 2019. 6. 6
2019 summer	Sweet potatoes	Yes	No	Yes	2019. 6. 19 - 2019. 10. 4

토양이화학성 분석 토양침식과 양분유출 산정은 매 강우시 발생하는 유거수의 전체량 측정 및 유거수 시료 500 mL를 채수하여 100°C 에서 건조 후 토양유실량을, 유거수에 의한 양분유출량을 산정하기 위해 유거수의 N-P-K분석을 실시하였다. 각각의 재배작물은 농촌진흥청 국립농업과학원 작물별 시비처방 기준에 따라 요소-용성인비-염화加里 비료 (Table 2)를 소요량을 계산하여 시비하였으며 마늘과 양파는 다비작물로 표준질소시비량은 참깨 질소 시비량의 9배에 달하였다. 시험재배 토양의 물리화학성 분석 결과 토성은 양토였으며 토양 화학성은 토양 pH 6.3, 유기물

10 g kg⁻¹, 유효인산 141 g kg⁻¹ (Table 3)이었다.

Table 2. Fertilizer recommendation rate for onion, sesame, garlic, and sweet potatoes.

Crop	N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	K ₂ O (kg ha ⁻¹)
Onion	240	77	154
Sesame	29	31	32
Garlic	250	77	128
Sweet potatoes	5.5	6.3	15.6

Table 3. Physicochemical properties of the soil used for the experiment in 2018.

Soil texture	pH (1:5)	Organic matter (g kg ⁻¹)	Avail. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cation (cmol _c kg ⁻¹)		
				K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Loam	6.3	10	141	1.5	9.9	2.8

작물생육조사 작물 피복도 및 경장 측정은 작물파종 후 수확까지 일주일 간격으로 실시하였다. 피복도에 따른 작물생육수준은 휴한기, 파종기 (작물피복도의 10%), 신장기 (작물 피복도의 50%), 성숙기 (작물 피복도의 75%), 수확기로 분류하였다. 토양침식과 양분유출의 경제적 가치로 환산하기 위하여 토양은 성토 시 순수 토양의 단가 기준으로 1톤 당 20,000원 그리고 시중판매 비료 중 요소비료 (46-0-0) 20 kg 기준 20,000원, 용과린 (0-20-0) 20 kg 기준 24,000원, 황산가리 (0-0-50) 10 kg 기준 20,000원으로 적용하였다. 강우침식인자 산정은 기상청 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/>)의 전국 58개 기상청 관측소 자료 중 목포관측소에서 측정된 강우데이터를 이용하였다.

토양유실량 산정 농경지 토양의 연평균 단위 면적당 토양유실량은 토양유실예측공식 (universal soil loss equation (USLE) 공식을 사용하였다 (Wischmeier and Smith, 1978; Renard, 1997).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Eq. 1})$$

A는 단위 면적당 연간 토양 유실량 (MT ha⁻¹ year⁻¹)으로 나타내며 이를 산정하기 위해 5개 인자를 필요로 한다. R은 강우강도 (rainfall energy factor), K는 토양침식성인자 (soil erodibility factor), LS는 경사 및 경사장인자 (slope length and steepness factor), C는 작물피복 및 관리인자 (cover and management factor), P는 토양보전인자 (supporting conservation practice factor)이다. 강우침식인자 산정은 Park et al. (2011)이 수행한 방법을 사용하였고 강우인자 산정시 15분 이내에 6.35 mm 이상의 강우가 발생한 경우 독립된 1회의 강우로 계산 (Jung et al., 1983)하였으나 본 연구에서는 15분 이내 6.35 mm 이상의 강우사상은 발생빈도와 해당 강우에 대한 강우운동에너지 값이 매우 적어 강우인자에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단하여 60분 단위 강우자료를 사용하였다. Park et al. (2011)의 연구에서 산정한 강우침식인자와 같은 지점과 기간에 발생한 누적연간강우량 및 일일최대강우량 (기상자료개방포털)을 비교함으로써 직접적이고 직관적인 강우침식인자의 산정을 고려하였다. 강우침식인자는 1년 동안 강우사상별로 강우운동에너지의 총합으로 계산하고 아래의 식을 통하여 계산하였다 (Eqs. 2 - 5).

USLE에서 강우인자의 산출은 다음의 과정에 따른다.

$$R_{(\text{year})} = \sum (E \cdot I_{30}) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$R_{(\text{single event})} = E \cdot I_{30} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$E = \sum (e \cdot I \cdot t) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$e = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서, $R_{(\text{year})}$ 은 각각의 단일강우 사상의 강우침식성인자값을 합한 연간 강우침식성인자값이고, $R_{(\text{single event})}$ 은 단일 강우에 대한 강우침식성인자값이다. I_{30} 은 단일 강우에서 뽑아낸 30분 최대 강우로서 30분 최대 강우에 곱하기 2를 하여 대입한다 (mm hr^{-1}), E 는 단일강우에 대한 에너지의 총합이고, e 는 단일 강우의 시간 단위별 운동에너지이며, I 는 단일 강우의 시간 단위별 강우를 에너지값을 구하기 위해 1시간 단위로 환산한 값이다 (mm hr^{-1}). t 는 개별 강우의 시간 단위별 지속된 시간 (hr)이다.

USLE에서 토양유실율 (soil loss ratio)은 경운을 하고 나지상태로 지속된 조건을 필요로 하며 토양침식에 대해 특정한 피복과 관리 영농하에서의 토양유실의 비로 평가한다. 본 연구를 통해 실측한 강우강도, 토양유실량, 작물피복도 등은 경작지에서 재배한 작물과 나지상태에서의 토양유실량, 각 생육시기별 강우인자값 등을 고려하여 작물에 따른 식생피복인자 (C)를 계산하였고 작물의 생육시기별로 나지상태의 토양유실량에 대해서 경작상태의 토양유실량에 대한 비에 각 생육기별 강우인자의 비를 곱하여 얻어진 값이다 (Eqs. 6 - 8). USLE에서 제안한 토양유실율 (soil loss ratio)은 경작지에서 재배한 작물인자 (C)를 각 작물의 생육시기별로 조사하여 각 생육기별 강우인자를 포함하여 식생피복인자를 비교·분석하였다.

$$C = \sum C_i \cdot R_i = C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_3 R_3 + C_4 R_4 + C_5 R_5 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$C_i = \frac{\text{각 생육시기별 작물재배구의 토양유실량}}{\text{동일기간동안 나지구의 토양유실량}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$R_i = \frac{\text{각 생육시기별 강우인자값}}{\text{작물재배기간동안 강우인자값}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Results and Discussion

강우량 및 강우강도 전라남도 목포시의 강우량 및 강우강도는 2017년 강우량 518 mm 및 강우강도 1,439 MJ $\text{mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 2018년 강우량 1,639 mm, 강우강도 3,688 MJ $\text{mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$, 2019년 강우량 1,066 mm, 강우강도 3,356 MJ $\text{mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$ 이었다. 기상청 산하 목포지점의 1981 - 2010년 (30년)의 강우침식인자 (R -factor), 연간누적강우량,

일일최대강우량은 $3,049 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $1,163.56 \text{ mm y}^{-1}$, 122.01 mm d^{-1} 이었고 2011 - 2018 (8년)년간 강우침식인자 (R-factor)는 $2,462 \pm 1,239 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ y}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이었다 (Park et al., 2011).

작물 생육 및 경장 변화 동계작물인 양파와 마늘은 이듬해 4월과 5월에 생육이 왕성하였으며 하계작물인 참깨는 파종 후 7월 중순과 8월 중순에 걸쳐 한달 간 경장이 급격히 성장하였고 고구마인 경우 7월 한달 간 경장의 생육이 왕성하였다. 피복 처리한 작물의 경장이 무피복처리에 비하여 높은 경향을 가진다 (Fig. 1). 이는 피복처리가 수분보유 및 토양온도 상승을 통해 작물생육에 긍정적인 영향을 주었고 이러한 결과는 동계작물 수확 이후 하계작물 파종시기를 결정할 때 후작작물의 정식 또는 파종할 시기 조절이 작물 경장에 영향을 미치는 중요한 시기인 것으로 판단된다.

Fig. 1. Averaged onion, sesame, garlic, and sweet potatoes height (cm) under mulching and non-mulching treatments.

작물재배시 피복처리에 따른 토양침식량 변화 동계작물인 양파는 생육기온이 상승하는 4월과 5월에 급격히 성장하며 피복도가 증가하였다. 양파인 경우 파종기로 구분되는 2017년 12월에는 피복도가 2%였으나 신장기인 4월에는 25 - 35%로 피복도가 증가하였으며 성숙기인 5월에는 60%까지 피복도가 증가하였다 (Table 4). 양파재배기간 중 특이할 만한 사항은 양파의 경장이 일정기간 생육이 진행한 후에 수확기에 접어들면 양파잎이 지면으로 쓰러져 피복도를 높여주었다. 양파 재배시 강우에 따른 전체 토양유실량은 피복처리한 경우 ha 당 1.57톤, 무피복처리인 경우 ha 당 3.717톤이 발생하여 피복처리한 경우가 무피복처리에 비하여 토양유실량이 감소하였다.

Table 4. Onion growth stage and rainfall intensity and the amount of soil loss under mulching and non-mulching in winter of 2017.

Onion growth stage	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹)	The amount of soil loss (kg ha ⁻¹)	
			Mulching	
			Yes	No
Transplanting	20.7	21.6	134.9	173.4
	21.6	14.6	368.3	793.5
	56.3	99.0	579.5	1,209.4
Elongation	44.4	73.9	203.5	337.4
	20.4	17.2	12.0	42.2
	66.3	136.5	102.1	211.1
	21.3	19.8	12.5	90.7
	17.2	8.0	126.7	836.9
	26.9	34.9	14.2	11.0
	26.9	19.1	17.8	12.3
Total	322	444.6	1,571.5	3,717.8

2018년 하계작물인 참깨는 양파 수확 이후 후작으로 종자 파종하였고 강우에 의한 토양유실은 참깨 생육시기 중 파종기와 수확기에만 발생하였다. 참깨의 피복도는 파종기에 2%였으나 수확기인 8월에는 95%였으며 이 기간 중 강우강도는 최소 15.5부터 최대 1,007.0 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹로 변동폭이 굉장히 컸다 (Table 5).

Table 5. Sesame growth stage and rainfall intensity and the amount of soil loss under mulching, non-mulching, and control (no crop) in summer of 2018.

Sesame growth stage	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹)	The amount of soil loss (kg ha ⁻¹)		
			Mulching		Control
			Yes	No	
Sowing	24	54.1	1,505.5	4,458.8	2,103.8
	112	764.7	338.0	2,398.3	1,745.9
	17	15.5	65.8	792.3	589.0
Maturation	153	1,007.0	1,872.3	2,298.5	8,582.6
	30	70.8	416.6	1,207.6	2,469.6
	18	26.8	143.4	218.7	795.8
	41	339.4	163.8	341.1	1,229.3
Harvesting	80	600.8	126.7	992.9	2,257.0
Total	475	2,879.1	4,632.1	12,708	19,773.0

2차년도 동계작물인 마늘의 경우 하계작물인 참깨 수확 이후 후작으로 마늘을 종자 파종하였고 강우강도에 의한 토양유실은 파종기, 성숙기, 수확기에 발생하였다. 마늘 재배기간 중 강우강도는 최소 4.5부터 최대 264.7 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹였다 (Table 6). 마늘 재배 기간 발생한 토양유실량은 무피복 0.947 ton ha⁻¹, 피복인 경우 0.757 ton ha⁻¹, 나지인 경우 3.094 ton ha⁻¹이었고 마늘피복재배시 토양침식량이 가장 낮았다.

Table 6. Garlic growth stage and rainfall intensity and the amount of soil loss under mulching, non-mulching, and control (no crop) in winter of 2019.

Garlic growth stage	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹)	The amount of soil loss (kg ha ⁻¹)		
			Mulching		Control
			Yes	No	
Sowing	133.2	255.3	688.6	770.5	2,819.4
	27.1	7.8	4.9	7.2	36.6
Elongation	17.9	4.5	17.4	15.9	53.1
	16.8	10.5	23.5	28.7	14.1
	32.9	42.2	12.1	48.9	75.0
Maturation	36.7	70.1	1.5	15.9	30.6
	63.8	163.9	1.2	9.9	37.7
Harvesting	52.6	105.6	1.4	7.2	5.1
	68.8	264.7	7.1	43.2	23.0
Total	449.8	924.6	757.7	947.4	3,094.6

3차년도 하계작물인 고구마는 동계작물인 마늘 수확 이후 후작으로 재배하였고 토양유실은 고구마 생육시기 중 신장기, 성숙기, 수확기에 발생하였다. 고구마 재배기간 중 강우강도는 14.2부터 최대 516.7 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹이었다 (Table 7). 고구마 재배기간 중 토양유실량은 피복처리 0.371 ton ha⁻¹, 무피복처리 2.633 ton ha⁻¹, 나지 (무작물) 2.725 ton ha⁻¹이었고 고구마재배시 피복처리가 무피복과 나지인 경우에 비해 토양침식량이 가장 많이 감소하였다. 고구마 전체 생육기간중 가장 큰 강우강도는 신장기 강우강도 516 MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹였으며 이때 나지 및 무피복에 의한 토양유실량은 1.558 ton 및 2.319 ton으로 토양유실의 95%에 해당하는 토양유실이 신장기때 발생하였다. 이러한 결과는 강우에 의한 토양유실량을 저감하기 위해서는 고구마 파종시기 관리 및 피복처리의 중요성을 제시하고 있다. Gyssels et al. (2005)은 식생피복이 토양에 처리돼 있을 경우 빗방울의 충격을 완화해주며 또한 식물의 뿌리가 빗방울의 투수속도를 증가시켜 유실을 경감해 주는 등 토양침식 저감에 매우 중요한 역할을 한다고 하였다. 작물재배지 토양침식량 측정은 7.5 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Wilkinson and McElroy, 2007), 전 세계 전체인 경우 2.8 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Borrelli et al., 2017)이었다. 유럽인 경우 작물재배지의 토양침식량은 7.5 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Van Oost et al., 2009)로 보고하였다. 모델식을 활용한 유럽지역 작물재배지에서 경운에 의한 토양침식량은 3.3 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Van Oost et al., 2009), 모델식을 활용한 전 세계 작물재배지에서 경운과 물에 의한 토양침식량은 7.5 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Doetterl et al., 2016)로 보고하였다. Lee and Jeon (2009)는 금강유역 추풍천 지역의 IKONOS 위성영상으로부터 추출한 인삼밭 레이어를 이용하여 GIS기반 RUSLE 모델의 토양침식량 저감효과를 평가하였으며 밭지역을 인삼밭으로 전환할 경우 토양침식량 저감은 전환하지 않은 지역에 비해 31.3%의 토양침식량 저감 효과를 보고하였다. Den Biggelaar et al. (2003)은 작물재배지 전 세계 평균 토양침식은 12 ton ha⁻¹ y⁻¹에서 15 ton ha⁻¹ y⁻¹로 보고하였고 실측치와 모델링을 활용한 서유럽의 토양침식량은 3.6 ton ha⁻¹ y⁻¹ (Cerdan et al., 2010), Panagos et al. (2016) 모델식에 의한 서유럽 토양침식량은 2.2 ton ha⁻¹ y⁻¹로 보고하였다. Prosdociimi et al. (2016)은 피복처리시 무피복처리와 비교하여 토양침식량과 토양유출량을 경감한다고 보고하였다. 본 연구결과도 피복처리가 무피복처리에 비하여 토양유실량이 감소하였고 강우강도와 재배작물에 따라서 토양침식량에 차이가 있었다.

Table 7. Sweet potatoes growth stage and rainfall intensity and the amount of soil loss under mulching, non-mulching, and control (no crop) in summer of 2019.

Garlic growth stage	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (MJ mm ha hr ⁻¹)	The amount of soil loss (kg ha ⁻¹)		
			Mulching		Control
			Yes	No	
Elongation	81.6	516.7	255.05	2,319.65	1,558.41
	23.3	14.2	0.00	0.00	0.00
Maturation	70.7	238.9	38.26	145.81	218.17
	67.6	199.3	6.65	27.48	118.74
	68.8	331.8	7.46	27.19	155.73
Harvesting	36.6	67.8	3.80	4.92	34.75
	19.6	20.2	4.88	7.48	131.30
	49	316.7	55.20	101.35	507.99
Total	417.2	1,705.6	371.3	2,633.9	2,725.1

작물피복 및 관리인자 (C factor) 산정 참깨 재배 실험 자료를 활용하여 참깨 피복처리시 식생피복인자 값을 계산할 결과 (Table 8) 파종기 Ci는 0.430148이고 수확기 0.177563이었다. Ri값인 경우 파종기 0.289778이고 수확기 0.710222이었다. 이러한 결과를 바탕으로 참깨 비닐피복인 경우 식생피복인자 (C) 0.25였고 이러한 결과는 현재 토양환경보전법 중 「표토의 침식 현황 조사에 관한 고시」 (환경부고시 제 2019-10호)에서 사용하는 참깨 무피복 식생피복인자 0.34와 차이가 있었다. 이러한 실험결과를 토대로 모델식을 활용한 토양유실량 산정시 정확도를 높이기 위해서는 참깨 피복에 따른 작물인자값을 추가로 고려해야 할 것으로 판단된다. 전라남도 무안지역 참깨 재배 실태조사 결과 양파 또는 마늘 수확 후 이모작재배가 78.7%, 참깨 단작재배가 21.3%였으며, 이모작 재배농가의 87%가 폭이 넓은 (150 - 180 cm, 구멍수 9 - 14개) 비닐을 이용하고 있고 (Jang, 2021), 마늘 또는 양파재배 후 후작으로 참깨를 재배할 경우 마늘 및 양파재배시에 사용한 비닐멀칭을 재활용하고 있어 토양침식을 저감할 수 있는 방법이라 판단된다.

Table 8. C factor coefficient during the sesame growth.

Sesame growth stage	Rainfall (mm)	Rainfall intensity (MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹)	Soil loss (kg ha ⁻¹)		Ci	Ri	C factor (Ci*Ri)
			Mulching	Control			
Seeding	152.6	834.3	1,909.3	4,438.7	0.430148	0.289778	0.124648
Harvesting	320.6	2,044.8	2,722.8	15,334.3	0.177563	0.710222	0.126109
Total							0.250757

작물재배시 멀칭처리 유무에 따른 작물 생산량 비닐피복처리한 작물생산량은 무피복처리한 작물생산량에 비교하여 비닐피복처리한 작물생산량이 높았으며 양파생산량은 ha 당 비닐피복 46톤, 무피복 40톤, 참깨생산량은 ha 당 비닐피복 0.599톤, 무피복 0.423톤, 마늘생산량은 ha 당 비닐피복 14.8톤, 무피복 9.5톤, 고구마생산량은 ha 당 비닐피복 34.05톤, 무피복 31.9톤이었다 (Table 9). 토양침식이 발생하더라도 작물생산에 영향을 미치지 않는 토양유실량 (T_{si})은 2.2 ton ha⁻¹ yr⁻¹이었고 (Montgomery, 2007), 유럽의 경우 0.3에서 1.4 ton ha⁻¹ yr⁻¹ (Verheijen et al., 2009)를 제안하였다. USDA인 경우 T_{si} 의 범위를 4.5에서 11.2 ton ha⁻¹ yr⁻¹, 유럽환경청인 경우 유효토심이 낮은 모래토양

은 $1.0 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 유효토심이 깊고 잘 발달되어 있을 경우 $5.0 \text{ ton ha yr}^{-1}$, Bui et al. (2011)은 호주의 경우 최대작물 생산량을 기준으로 75% 수준의 작물생산량을 유지하기 위해서 T_{sl} 를 $0.85 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}$ 로 보고하였다. 실험결과를 토대로 피복처리의 유무가 토양유실량과 작물생산성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 9. Averaged yield of onion, sesame, garlic, and sweet potatoes under mulching and non-mulching treatments.

Mulching treatment	Onion (kg ha ⁻¹)	Sesame (kg ha ⁻¹)	Garlic (kg ha ⁻¹)	Sweet potatoes (kg ha ⁻¹)
Yes	46,205	599	14,797	34,050
No	40,032	423	9,467	31,913

피복유무에 따른 토양유실량 및 경제적 손실 피복과 무피복시 토양침식량의 차이는 양파, 참깨, 마늘, 고구마 재배 기준 각각 2,280, 8,076, 2,337, 2,262.9 kg ha⁻¹로 이를 기준으로 성토 시 드는 전체비용 1톤 당 2만원을 적용할 경우 무피복 시 토양침식량에 의한 경제적 손실은 피복에 비하여 ha 당 45,610원, 161,520원, 46,740원, 45,240원이 발생하였다 (Table 10).

Table 10. The amount of soil loss and economical effect based on mulching and non-mulching during onion, sesame, and garlic growth using lysimeter experiment.

Crop	The amount of soil loss due to rainfall runoff (kg ha ⁻¹)			Economic benefit with mulching (unit: won)
	Mulching		Mulching effect No - Yes	
	No	Yes		
Onion	3,950.3	1,669.7	2,280.6	45,610
Sesame	12,708	4,632	8,076	161,520
Garlic	3,094	757	2,337	46,740
Sweet potatoes	2,633.9	371	2,262.9	45,240

Soil price was calculated using 20,000 won per ton.

피복처리에 따른 양분유실량 양파재배 시 유거수에 의한 질소 양분유실량은 피복처리인 경우보다 무피복처리인 경우 양분유실량이 증가하였다 (Table 11). 양파재배시 질소양분유실량은 피복처리시 ha 당 16.7 kg, 무피복처리시 ha 당 50.6 kg으로 무피복처리가 피복처리 비하여 3배 이상의 질소양분유실이 발생하였다. 참깨재배시 질소양분유실량은 피복처리시 ha 당 2.0 kg, 무피복처리시 ha 당 6.1 kg으로 무피복처리가 피복처리 비하여 3배 이상의 양분유실이 발생하였다. 마늘재배시 유거수에 의한 질소 양분유실량은 피복처리 ha 당 2.3 kg, 무피복처리 ha 당 16.9 kg로 무피복처리가 피복처리 비하여 7배 이상의 질소양분 유실이 발생하였다.

양파재배시 유거수에 의한 칼륨유실량은 피복처리인 경우보다 무피복처리인 경우 양분유실량이 증가하였다. 양파재배시 칼륨양분유실량은 피복처리시 ha 당 2.3 kg, 무피복처리시 ha 당 16.9 kg으로 무피복처리가 피복처리 비하여 7배 이상의 질소양분 유실이 발생하였다. 참깨재배시 칼륨양분유실량은 피복처리시 ha 당 0.5 kg, 무피복처리시 ha 당 3.5 kg으로 무피복처리가 피복처리 비하여 7배의 칼륨양분 유실이 발생하였다. 마늘재배시 유거수에 의한 칼륨양분 유실량은 피복처리 ha 당 1.0 kg, 무피복처리 ha 당 14 kg로 무피복처리가 피복처리 비하여 13배 이상의 칼륨양분

유실이 발생하였다. 인산 양분유실은 피복과 무피복에서 질소나 칼륨에 비하여 현저히 적게 발생되었는데 이는 시험 토양의 유효인산이 낮아서인 것으로 판단된다. Jung et al. (2009)에 의하면 인산의 유실은 유실된 총량의 약 60% - 67%가 유실된 토양 입자에 흡착되어 유실되었다고 보고하였다.

피복과 무피복시 유거수에 의한 양분유실의 차이를 경제적 손실로 환산하면 양파, 참깨, 마늘은 질소 기준 74,000원, 9,000원, 76,000원, 인산은 300 - 600원 사이였으며, 칼륨인 경우 58,000원, 12,100원, 48,400원이었다 (Table 11).

Table 11. Economical fertilizer loss analysis based on nutrient loss due to runoff water during onion, sesame, and garlic growth.

Crop	Nutrient loss (kg ha ⁻¹)						Price loss due to nutrient loss (Unit: 1,000 won)					
	Mulching						Mulching					
	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
	N [†]		P		K		N		P		K	
Onion	50.6	16.7	0.06	0.07	16.9	2.3	110	36	0.36	0.42	67	9
Sesame	6.1	2.0	0.02	0.03	3.5	0.5	13	4	0.14	0.17	14	1.9
Garlic	52.7	17.4	0.06	0.07	14.0	1.0	114	38	0.36	0.42	56	7.6

[†]N, P, K price per kg was 2,174 won, 6,000 won, 4,000 won, respectively.

토양침식 및 양분 유출에 의한 경제성 손실 기여도 분석 경제적 손실 요인을 토양침식과 양분유출의 기여도 (%)로 평가할 경우 무피복 양파와 마늘은 토양침식에 의한 경제성 손실 기여도는 30%인 반면 양분유출로 인한 경제적 손실 기여도는 70%였고 참깨인 경우 표준시비량을 적게 요구하여 양분유출보다는 토양침식에 의한 경제적 손실도가 컸다 (Table 12).

Table 12. Contribution of economical loss due to soil loss and nutrient loss under mulching and non-mulching treatment during onion, sesame, and garlic growth.

Crop	Total economical loss (Won)		Contribution of economical loss (%)			
	Mulching		Mulching			
			No		Yes	
	No	Yes	Soil loss	Nutrient loss	Soil loss	Nutrient loss
Onion	256,360	78,810	30	70	42	58
Sesame	281,300	98,710	90	10	94	6
Garlic	232,240	61,160	27	74	25	75

Conclusions

토양은 유한자원으로 토양침식 발생시 토양유실뿐만 아니라 양분유출도 함께 발생되어 자원손실을 유발한다. 자연강우에 의한 토양침식과 양분유출량, 피복 유무에 따른 식생피복인자를 조사하기 위해 경사도가 13%인 라이시미터를 사용하여 양파, 마늘, 참깨, 고구마를 재배하였다. 본 실험 결과 참깨 (비닐피복)의 식생인자 값 (C)이 0.25로 조사되었고 현재 우리나라 환경부 토양환경보전법 중 「표토의 침식 현황 조사에 관한 고시」 (환경부고시 제 2019-10호)

의 토지이용 및 식생피복에 따른 식생인자 값(C)에서 무피복 참깨 노지재배인 경우 0.34를 사용하고 있어 토양침식량을 정밀하게 산정하기 위해서는 비닐피복 관리에 따라 식생인자 값을 추가로 적용하여 모델식과 측정에 의한 토양 침식량의 차이를 줄일 수 있을 것이다. 양파, 참깨, 마늘, 고구마 재배시 피복처리를 할 경우 무피복에 비해 토양 침식량이 각각 2,280, 8,076, 2,337, 2,262.9 kg ha⁻¹ 감소하였으며 이를 토대로 토양의 가격 1톤 당 20,000원으로 환산하여 경제적 손실 가치를 계산한 결과 ha 당 양파 피복 재배시 45,610원, 참깨 피복 재배시 161,520원, 마늘 피복 재배시 46,740, 고구마 피복 재배시 45,240원의 경제적 손실이 발생하였다. 양파, 참깨, 고구마 피복 재배시 유출수에 의한 양분 유출은 무피복에 비하여 3배 가량 저감할 수 있어 피복 관리의 중요함을 확인하였다. 특히 양파나 마늘은 참깨에 비해 다비작물로 질소양분사용의 효율적인 관리방안 등을 추가적으로 고려하여야 할 것이다. 유출수에 의한 양분 유출에 의한 경제적 손실을 표준시비추천량과 비료가격 등을 고려하여 N-P-K기준으로 산정해 본 결과 ha당 양파 비닐피복시 175,000원, 참깨 비닐피복시 182,000원, 마늘 비닐피복시 171,000원의 경제손실을 절감할 수 있었다. 강우에 의한 토양침식과 양분유출에 의한 경제적 손실 기여도를 평가한 결과 무피복인 경우 양파와 마늘은 토양침식 30%, 양분 유출 70%였으며 참깨인 경우 표준시비량을 적게 요구하여 양분유출보다는 토양침식에 의한 경제적 손실도가 컸다. 최근 들어 발생하는 기후변화에 따른 토양침식량의 오차 폭이 증가할 것으로 예상되기 때문에 한반도 강우변동과 토지이용에 따른 식생피복 인자를 고려한 중·장기적 토양침식 위험성과 환경영향의 평가기법 도입이 필요하다. 또한 이모작을 시행하는 남부지역인 경우 무작물 나지상태에서 강우발생시 토양침식에 의한 양분유출이 발생할 수 있어 이를 저감하기 위한 영농관리 방안이 필요하다.

Acknowledgement

This paper is fully supported by Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Science.

References

- Borrelli, P., D.A. Robinson, L.R. Fleischer, E. Lugato, C. Ballabio, C. Alewell, K. Meusburger, S. Modugno, B. Schutt, and V. Ferro. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 8:2013.
- Bui, E., G. Hancock, and S. Wilkinson. 2011. 'Tolerable' hillslope soil erosion rates in Australia: Linking science and policy. *Agric., Ecosyst. Environ.* 144(1):136-149.
- Cerdan, O., G. Govers, Y. Le Bissonnais, K. Van Oost, J. Poesen, N. Saby, A. Gobin, A. Vacca, J. Quinton, and K. Auerswald. 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 122:167-177.
- Chang, N.K. and S.M. Yun. 1994. The soil and mineral nutrient erosion on the floors of vegetation. *Asian J. Turfgrass Sci.* 8:149-165.
- Cho, H.R., S.K. Ha, S.H. Hyun, S.O. Hur, K.H. Han, S.Y. Hong, S.H. Jeon, E.J. Kim, and D.S. Lee. 2010. Effect of red pepper canopy coverages on soil loss and runoff from sloped land with different transplanting dates. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:260-267.
- Den Biggelaar, C., R. Lal, H. Eswaran, V.E. Breneman, and P.F. Reich. 2003. Crop losses to soil erosion at regional and global scales: Evidence from plot-level and GIS data. p. 262-279. In K. Wiebe (ed.) *Land quality, agricultural productivity, and food security*. Edward Elgar, Cheltenham, UK.

- Doetterl, S., A.A. Berhe, E. Nadeu, Z. Wang, M. Sommer, and P. Fiener. 2016. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. *Earth-Sci. Rev.* 154:102-122.
- FAO & ITPS. 2015. Status of the world's soil resources-main report. 649pp. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>.
- Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet, and Y. Li. 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Prog. Phys. Geogr.* 29:189-217.
- Heo, S.G., M.S. Jun, S.H. Park, K.S. Kim, S.K. Kang, Y.S. Ok, and K.J. Lim. 2008. Analysis of soil erosion reduction ratio with changes in soil reconditioning amount for highland agricultural crops. *J. Korean Soc. Water Qual.* 24:185-194.
- Jang, J.O. 2021. Onion and garlic after sesame proper planting density and cultivation method. MS. Thesis, Mokpo National University, Muan, Korea.
- Jung, K.H., W.T. Kim, S.O. Hur, S.K. Ha, and P.K. Jung. 2004. USLE/RUSLE factors for national scale soil loss estimation based on the digital detailed soil map. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 37:199-206.
- Jung, P.K., K.C. Eom, S.K. Ha, Y.S. Zhang, and S.O. Hur. 2009. Assessments of the nutrient losses in the sloped farm land. *Korean Soc. Soil Sci. Fert. Special Issue*:47-50.
- Jung, P.K., M.H. Ko, J.N. Im, K.T. Um, and D.U. Choi. 1983. Rainfall erosion factor for estimation soil loss. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 16:23-29.
- Kim, H.J., J.A. Song, Y.J. Lim, and D.Y. Chung. 2012. Evaluation of erosivity index (EI) in calculation of R factor for the RUSLE. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 45:112-117.
- Lee, G.S. and D.Y. Jeon. 2009. The analysis of reduction efficiency of soil erosion and sediment yield by a ginseng area using GIS tools. *J. GIS Assoc. Korea* 17:431-443.
- Lee, H.H., S.K. Ha, S.O. Hur, K.H. Jung, W.T. Kim, and K.H. Kim. 2006. Characteristics of soil water runoff and percolation in sloped land with different soil textures. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 39:268-273.
- Lupia-Palmieri, E. 2004. Erosion. p. 331-336. In A.S. Goudie (ed.) *Encyclopedia of geomorphology*. Routledge, London, UK.
- Montgomery, D.R. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104:68-72.
- OECD. 2001. Environmental indicators for agriculture, Vol.3: Soil quality. p. 197-226. OECD, Paris, France.
- Panagos, P., P. Borrelli, J. Poesen, K. Meusburger, C. Ballabio, E. Lugato, L. Montanarella, and C. Alewell. 2016. Reply to "The new assessment of soil loss by water erosion in Europe". *Environ. Sci. Policy* 54:438-447.
- Park, C.W., Y.K. Sonn, B.K. Hyun, K.C. Song, H.C. Chun, Y.H. Moon, and S.G. Yun. 2011. The redetermination of USLE rainfall erosion factor for estimation of soil loss at Korea. *Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 44:977-982.
- Phuong, T.T., R.P. Shrestha, and H.V. Chuong. 2017. Simulation of soil erosion risk in the upstream area of Bo river watershed. p. 87-99. In T.N. Thang et al. (ed.) *Redefining diversity & dynamics of natural resources management in Asia*, Volume 3. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Prosdocimi, M., P. Tarolli, and A. Cerdà. 2016. Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Sci. Rev.* 161:191-203.
- Renard, K.G. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), 404. *Agricultural Handbook 703*. United States Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C., USA.
- Stocking, M.A. 2003. Tropical soils and food security: The next 50 years. *Sci.* 302:1356-1359.
- Van Oost, K., O. Cerdan, and T.A. Quine 2009. Accelerated sediment fluxes by water and tillage erosion on European agricultural land. *Earth Surf. Processes Landforms* 34:1625-1634.

- Van Oost, K., T.A. Quine, G. Govers, S. De Gryze, J. Six, J.W. Harden, J.C. Ritchie, G.W. McCarty, G. Heckrath, and C. Kosmas. 2007. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science* 318:626-629.
- Verheijen, F.G.A., R.J.A. Jones, R.J. Rickson, and C.J. Smith. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Sci. Rev.* 94:23-38.
- Wilkinson, B.H. and B.J. McElroy. 2007. Exploring pedogenesis via nuclide-based soil production rates and OSL-based bioturbation rates. *Aust. J. Soil Res.* 43:767-779.
- Wischmeier, W.H. 1960. Cropping-management factor evaluation for a universal soil-loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:322-326.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning. 58pp. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.