Assessing Changes in Soil Organic Matter Accumulation of Agricultural Field from 2013 to 2020 in South Korea

Jeong Gu Lee^{1†}, Min Hye Park^{2†}, Myung Sook Kim³, Tae-Gu Lee⁴, Ha-il Jung⁴, and Sangho Jeon^{4*}

¹Post-Doctoral Fellow, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

²Assistant Researcher, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

³Senior Researcher, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

⁴Researcher, Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: jeon45@korea.kr

†These authors contributed equally to this work.

ABSTRACT

Received: August 18, 2021

Revised: November 1, 2021

Accepted: November 1, 2021

ORCID

Jeong Gu Lee

<https://orcid.org/0000-0003-1080-1971>

Myung Sook Kim

<https://orcid.org/0000-0002-4382-0194>

Tae-Gu Lee

<https://orcid.org/0000-0002-3115-7516>

Sangho Jeon

<https://orcid.org/0000-0001-8955-7865>

Soil organic matter (SOM) is an important indicator of soil fertility, health and quality. For proper managements of agricultural fields, a long-term monitoring of changes in SOM contents in field and estimation of national accumulation of SOM are required. In this study, SOM in agricultural fields of paddy and upland systems were investigated from 2013 to 2020 for all administrative provinces of South Korea. Total field area was decreased by 4.8% and 9.1% in 2016 and 2020, respectively, compared to 2013. In paddy field, SOM content was 27.9 g kg⁻¹ in 2013, which was gradually increased by 1.1% in 2020. Despite that SOM content increased at a field scale, national SOM accumulation in paddy fields decreased due to reduced paddy area. In upland fields, SOM content was gradually increased by 6.5% from 2013 to 2020. Though SOM content increased, however, SOM accumulation in the total agricultural field at national scale was not affect due to less area than paddy field area. Therefore, total SOM accumulation was continuously decreased from 69.2 Tg in 2013 to 65.3 Tg in 2020 mainly due to decreasing paddy field area. This study showed that in spite of the SOM increase of both fields, national SOM accumulation is decreased with significantly decreasing total field area. Therefore, it is required to increase SOM accumulation at a field scale through proper management of SOM. In addition, it is also necessary to conserve paddy fields to enlarge agricultural SOM at national scale.

Keywords: Long-term experiment, Paddy, Soil quality, Upland

Changes in soil organic matter accumulation (Tg) in South Korea.

Introduction

2019년 기준 우리나라의 토지 면적의 약 15.7%가 농경지 면적 (1,581천 ha)에 속하고 있다 (KOSIS, 2020). 특히, 논과 밭은 각각 830천 ha, 519천 ha를 차지하고 있으며, 식량 공급 및 안보 유지를 위해 매우 중요하다 (KOSIS, 2020). 하지만, 계속된 도시화로 인해 농경지 면적은 2010년에 대비 2015년에 약 2.1%, 2020년에 약 8.8% 감소했으며, 이는 농경지 면적 감소로 인한 식량 공급을 해결하기 위해 비료 공급량이 증대하는 문제를 초래하고 있다 (Chung and Lee, 2008; Statistics Korea, 2020). 이에 따라, 장기간 시기별 토양 특성 변동조사는 향후 토양 관리 정책 수립을 위하여 중요한 지표가 된다.

특히, 토양유기물은 토양 내 입단 형성 및 표층 보호, 식물체 양분 공급 등의 매우 중요한 역할을 하며, 토양유기물은 토양의 질 (quality)을 간접적으로 평가하는 중요한 지표이다 (Reeves, 1997; Potter et al., 1998; Delgado and Follett, 2002; Rudrappa et al., 2006; Li et al., 2010). 최근 지구온난화가 가속화되는 시대에 토양 탄소의 주요 보고로 토양유기물 함량의 증대는 대기 중 이산화탄소 (CO_2)를 토양유기탄소 풀 (SOC pool)에 안정된 상태의 격리한다는 점에서 지구 탄소수지에 상당한 영향을 가지고 있다 (VandenBygaart and Kay, 2004; Kim and Lee, 2005).

우리나라의 전체 농경지 면적의 약 52.7%를 차지하고 있는 논 토양은 담수상태인 혐기적 조건에서 벼를 재배하고 있다. 이러한 담수상태에서는 토양표면의 물리적인 방어와 호기성 미생물들의 활성 저하로 인해 토양유기물의 분해가 느리게 진행된다 (Kanwar, 2003; Lim et al., 2017). 반면에, 전 농경지 면적의 약 32.8%를 차지하고 있는 밭 토양의 경우 토양표면이 대기 중에 노출되어 있을 뿐 아니라 호기성 미생물들의 활성 증대로 인한 토양유기물의 분해가 가속된다 (Ahn et al., 1992; Liu et al., 2019; Chen et al., 2021.).

하지만, 총 토양유기물저장량은 총 재배면적에 단위 면적당 유기물 함량 변화로 추정된다. 즉, 농경지의 토양유기물저장량은 총 경지 면적의 변화에 의해 크게 좌우된다. 이에 본 연구는 2013년부터 2020년까지 8년간 전국 총 17개 지역의 농경지 면적 변화와 토양유기물 함량 변화를 논과 밭으로 구분하여 조사하였으며, 농경지 내 토양유기물저장량 변화와 향후 토양 관리 방안을 모색하기 위해 수행하였다.

Materials and Methods

우리나라 연도 간 토양유기물 변동을 조사하기 위하여 2013년도부터 2020년까지 전국 17개도에서 8년간 토양검정 조사 자료를 시행하였다. 연평균 논 토양은 330,631 점, 밭 토양은 156,172점의 토양시료를 조사하였다 (Supplementary Table 1). 토양 시료는 토양표면에 쌓인 식물체 잔재 및 이물질을 제거한 후 토양 채취기 (auger)를 이용하여 토양의 표토 (0 - 15 cm)를 채취하였다. 채취된 토양은 서늘한 그늘 조건에서 자연 풍건 후 2 mm 이하의 토양을 분석용 시료로 사용하였다.

토양유기물 함량 측정은 국립농업과학원 토양화학분석법 (NIAS, 2010)에 의거 Tyurin법을 이용하였다. 먼저, 200 mesh 통과시료 0.2 g을 250 mL 삼각플라스크에 평량 후 0.4 N 중크롬산칼리 황산 혼합용액을 10 mL 가하여 200°C 전열판에 가열하였다. 온도가 올라감에 따라 삼각플라스크 바닥에 기포가 발생하기 시작할 때부터 정확히 5분간 끓인 후 증류수 약 150 mL를 가했다. 마지막으로 85% H_3PO_4 용액 5 mL와 지시약 (0.02M Orthophenanthroline)을 넣고 0.2 N 황산제1철암모니움 용액으로 적정하였다. 토양탄소함량 (g kg^{-1})은 다음 Eqs. 1, 2에 따라 환산해 주었다.

$$\text{토양탄소함량 (g kg}^{-1}\text{)} = (B-T) \times f \times 0.2 \times 12/4000 \times 100/W \times 10 \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서, B는 Blank 적정치, T는 시료 적정치, f는 적정액의 농도보정계수, 0.2는 탄소의 원자량, 4000은 탄소의 규정 농도, W는 토양의 무게를 의미한다.

$$\text{토양유기물함량 (g kg}^{-1}\text{)} = SC \times 1.724 \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, SC는 토양탄소함량 (g kg⁻¹), 1.724는 토양에 있는 유기물 중에 탄소 (%)가 차지하는 비율을 의미한다.

단위 면적당 저장된 토양유기물 함량은 Eq. 3 같은 방법을 이용하여 계산하여 주었다.

$$\text{토양유기물저장량 (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{SOM} \times \text{BD} \times D \div 10 \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, SOM은 토양유기물함량 (g kg⁻¹), BD는 토양의 가밀도 (1.25 g cm⁻³), D는 토양 샘플링 깊이 (15 cm)이다.

우리나라 농경지 면적 변화를 조사하기 위하여 농림축산식품부에서 간행한 농림축산식품통계연보 (MAFRA, 2015, 2018, 2020)의 통계자료를 인용하였으며, 각 도별 토양유기물저장량 양상 변화를 조사하기 위하여 연도별 단위 면적당 토양유기물함량을 농경지 면적으로 환산하여 주었다.

연차간 단위 면적당 토양유기물 함량, 총 토양유기물저장량 변화에 대한 차이의 통계적 유의성을 분석하기 위하여 SAS package (SAS 6.4 TS Level 1M4 X64_10PRO platform, SAS Institute, USA)를 이용하였다. 토양유기물함량, 지역별 토양유기물저장량, 총 토양유기물저장량 변화 그래프는 Sigmaplot (v.10.0 for Windows, Sigmaplot, USA)을 이용하여 평균 ± 표준오차로 나타내 주었다.

Results and Discussion

농경지 면적 변화 2013년부터 2020년까지 우리나라 논과 밭의 면적 변화는 Table 1과 같다. 농경지 총면적은 2013년 1,472천 ha에서 2020년까지 계속하여 약 9.1% 감소를 나타내고 있다. 특히, 논 면적은 2013년부터 급격하게 감소하고 있는 반면에, 밭의 경우 논 면적의 전환 이용, 과수 및 시설작물 확대 등의 이유로 인해 면적의 변화가 크게 나타나지 않는다 (Statistics Korea, 2020). 논 경작 대부분은 전라도, 경상도, 충청도 순서이며 세 지역의 논 면적은 우리나라 총 논 면적의 약 81.2%를 차지하고 있다. 밭의 경우 논과 마찬가지로 경상도, 전라도, 충청도 세 지역에서 우리나라 밭 면적의 약 66.4%가 경작되고 있다. 우리나라 대부분 지역은 논 면적이 밭 면적보다 넓지만, 강원도, 대전광역시, 서울특별시, 제주특별자치도, 충청북도의 경우 밭 작물이 논 작물에 비해 많이 재배되는 경향을 나타낸다. 이는 지역적 특성에 맞춰 논을 경작하기에 불리한 조건을 가지고 있거나, 계속된 도시화, 경지의 건물 건축 및 유흥지 이용 등의 이유로 농경지의 면적이 감소 추이에 있기 때문이다 (Lee et al., 2012; Yang et al., 2020; Yoon et al., 2020). 가장 많은 논 면적을 차지하는 전라남도의 경우 2013년에 비해 2020년에 논 면적은 23,506 ha 감소했지만, 밭 면적의 경우 4,100 ha 증가하였는데, 우리나라의 경우 급격한 쌀 소비량 감소로 인한 논을 밭으로 전환하는 경우가 늘었기 때문이다 (Kim et al., 2018a; Statistics Korea, 2020). 전라북도의 경우 2013년에 비해 2020년에 약 10%의 밭 경작 면적이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 특용작물 중 들깨의 재배면적 증가가 밭 경작지 면적 증가에 크게 영향을

미치고 있다 (KOSIS, 2020). 또한, 전라도의 새만금 간척사업을 통한 경지 면적의 증가로 밭 토양의 이용성이 크게 증대되었다.

Table 1. Characteristics of field area (ha) under paddy and upland in 17 provinces (2013 - 2020).

Province	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland	Paddy	Upland
Gangweon	41,701	62,871	39,972	62,713	38,979	61,595	37,763	59,329	35,682	60,009	34,170	59,947	33,685	59,435	32,917	58,873
Gyeonggi	98,873	55,918	96,696	55,103	95,680	56,930	93,216	55,076	88,733	55,990	86,243	55,684	84,125	55,307	82,790	53,299
Gyeongnam	98,010	25,883	93,770	27,030	89,803	29,279	88,753	29,624	84,780	30,384	81,991	30,486	81,288	31,804	80,952	31,735
Gyeongbuk	140,500	72,968	135,796	75,994	126,818	82,136	125,846	75,386	121,350	78,328	118,813	79,003	118,503	78,802	117,936	77,030
Gwangju	6,958	1,283	6,764	1,673	6,615	1,550	6,167	2,095	5,931	1,787	5,792	1,931	5,758	1,796	5,724	2,102
Daegu	4,499	1,797	4,455	1,580	3,865	2,199	4,025	1,940	3,994	1,754	3,535	1,860	3,513	1,792	3,512	1,914
Daejeon	1,837	1,866	1,629	1,851	1,606	1,814	1,544	1,634	1,458	1,500	1,400	1,477	1,358	1,520	1,286	1,448
Busan	3,859	1,030	3,778	909	3,490	817	3,348	1,235	3,243	1,325	3,091	1,185	2,951	1,176	2,812	1,252
Seoul	186	250	179	69	176	97	176	169	167	158	159	103	150	112	145	111
Sejong	5,508	4,808	4,968	3,476	4,785	3,475	4,616	2,196	4,513	2,059	4,387	2,122	4,250	2,220	4,241	2,229
Ulsan	6,887	2,869	6,508	3,227	6,125	3,272	5,926	3,480	5,636	3,327	5,485	3,052	5,281	3,244	5,238	3,203
Incheon	13,586	5,152	13,589	5,309	13,445	5,401	12,720	5,791	12,223	5,865	11,547	5,828	11,327	5,760	11,226	5,809
Jeonnam	191,893	90,675	187,910	92,516	185,190	93,914	183,530	88,868	177,753	91,397	173,986	92,376	169,090	94,942	168,387	94,775
Jeonbuk	141,873	48,074	137,883	50,659	134,380	52,921	132,854	50,431	130,322	51,445	128,333	51,969	124,408	53,439	123,638	53,388
Jeju	32	39,729	19	39,802	18	39,789	17	39,160	17	38,147	17	36,568	17	36,706	17	36,264
Chungnam	159,612	43,704	154,535	40,542	152,677	42,990	151,431	43,855	148,558	46,466	146,703	46,483	145,785	46,574	145,103	46,071
Chungbuk	48,062	48,894	45,164	48,119	44,541	48,046	43,807	45,300	40,506	46,352	38,613	43,642	38,290	43,987	37,970	43,595
Total	963,876	507,771	933,615	510,572	908,194	526,225	895,739	505,569	864,865	516,293	844,265	513,716	829,778	518,616	823,895	513,098

Source: MAFRA (2015), MAFRA (2018) and MAFRA (2020).

농경지 토양유기물 변화 2013년도부터 2020년까지 제주도 제외한 우리나라 16개 도 지역별 연차 간 토양유기물 함량은 논 $22.6 - 23.8 \text{ g kg}^{-1}$ 과 밭 $23.2 - 24.8 \text{ g kg}^{-1}$ 의 범위를 나타낸다 (Fig. 1). 제주도 토양유기물 함량은 $71.7 - 138.0 \text{ g kg}^{-1}$ 의 범위를 나타내며, 2020년도 검정시료는 통계적으로 매우 낮은 신뢰도를 나타내고 있기 때문에 2020년 제주도 토양의 유기물 함량을 대표할 수 없다고 판단되었다. 따라서, 2020년 제주도 논 토양유기물 함량은 2013년부터 2019년까지의 제주도 토양의 유기물 함량의 평균으로 대체하여 주었다. 제주도 토양은 다른 지역에 비해 약 3 - 5 배 이상의 토양유기물 함량을 가지고 있으며, 이는 제주도 토양 대부분이 화산회토로 일반 토양에 비해 높은 유기물 함량과 양이온교환용량을 보유하고 있기 때문이다 (Song, 1997; Song et al., 2010; NAAS, 2014).

우리나라 평균 토양유기물 함량은 논 토양 $25.5 - 29.8 \text{ g kg}^{-1}$, 밭 토양 $27.3 - 29.2 \text{ g kg}^{-1}$ 의 범위를 나타내며, 우리나라 적정 토양유기물 함량의 기준에 매우 적합하다 (Fig. 1). 논 토양은 일반적으로 물을 담수하는 혐기적인 조건으로 토양유기물 분해에 유리한 호기적 미생물들의 활성 저하로 인해 연차별 증가하는 경향을 나타낸다. 반면에, 밭 토양은 논 토양에 비해 유기물의 분해가 더 가속화되지만, 우리나라의 경우 계속된 유기물 (퇴비, 유박 등)의 투입으로 인해 2013년 기준 2016년 4.2%, 2020년 6.5%까지 유기물 함량이 증가하였다. (Kang, 2017; Heo, 2021). 특히, 논 토양 유기물 저장은 유기물 분해의 잔사 및 뿌리 탄소에 의해 주로 이뤄지며, 밭에서는 상대적으로 산소의 공급이 원활하여 유기물 분해에 더 유리한 조건을 가지고 있을 뿐 아니라 유기물의 미생물 분해 대사 산물이 안정화되는 특징이 있다 (Xie et al., 2021; Liu et al., 2019). 제주를 제외한 논 토양유기물 함량의 평균은 23.1 g kg^{-1} 으로 부산광역시 32.6 g kg^{-1} 으로 가장 높고, 이 후 경상남도 (26.9 g kg^{-1}), 대구광역시 (26.8 g kg^{-1}), 울산광역시 (26.1 g kg^{-1}), 전라도 (24.2 g kg^{-1})

kg⁻¹) 순이다. 서울특별시의 경우 13.7 g kg⁻¹으로 평균 유기물 함량의 약 51.0% 낮게 나타난다 (Table 2).

밭 토양의 경우 평균 유기물 함량은 28.5 g kg⁻¹이며, 부산광역시 (28.5 g kg⁻¹), 경상남도 (27.1 g kg⁻¹), 울산광역시 (26.9 g kg⁻¹), 서울특별시 (26.8 g kg⁻¹), 강원도 (25.2 g kg⁻¹), 전라남도 (25.1 g kg⁻¹), 전라북도 (24.6 g kg⁻¹) 순이다. 특히 경기 지역은 20.0 g kg⁻¹로 가장 낮은 유기물 함량을 나타내며, 전국 평균 유기물 함량인 29.7% 보다 낮게 나타났다 (Table 3).

Fig. 1. Changes in average of soil organic matter contents (g kg⁻¹) under paddy and upland in South Korea (2013 - 2020) (mean ± SE).

Table 2. Characteristics of soil organic matter contents (g kg⁻¹) under paddy in 17 provinces.

Province	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Gangweon	22.4 ± 0.080	21.1 ± 0.096	21.8 ± 0.076	23.5 ± 0.084	23.0 ± 0.093	22.6 ± 0.086	22.2 ± 0.081	22.4 ± 0.097
Gyeonggi	22.0 ± 0.048	23.5 ± 0.056	22.0 ± 0.048	19.5 ± 0.060	20.7 ± 0.053	20.4 ± 0.055	20.8 ± 0.058	21.8 ± 0.063
Gyeongnam	29.5 ± 0.155	27.3 ± 0.069	27.3 ± 0.056	25.1 ± 0.057	26.5 ± 0.058	28.0 ± 0.086	26.0 ± 0.060	25.5 ± 0.051
Gyeongbuk	21.2 ± 0.067	21.8 ± 0.051	20.2 ± 0.053	21.0 ± 0.062	21.5 ± 0.061	21.2 ± 0.066	21.5 ± 0.069	21.0 ± 0.061
Gwangju	22.2 ± 0.113	21.5 ± 0.112	22.2 ± 0.115	21.9 ± 0.166	23.3 ± 0.168	23.5 ± 0.157	23.9 ± 0.164	23.1 ± 0.177
Daegu	29.3 ± 0.510	25.3 ± 0.452	28.4 ± 0.480	26.2 ± 0.459	28.2 ± 0.600	23.5 ± 0.377	28.1 ± 0.413	25.4 ± 0.342
Daejeon	25.7 ± 0.558	24.6 ± 0.428	21.4 ± 0.413	20.0 ± 0.519	22.8 ± 0.483	24.0 ± 0.693	19.1 ± 0.329	25.2 ± 0.463
Busan	40.9 ± 0.512	27.9 ± 0.304	29.5 ± 0.427	32.5 ± 0.559	35.6 ± 0.887	33.3 ± 0.850	30.3 ± 0.702	31.2 ± 0.598
Seoul	12.8 ± 1.778	9.1 ± 0.966	12.2 ± 1.283	12.5 ± 1.400	15.0 ± 0.845	12.0 ± 0.607	20.7 ± 1.810	15.4 ± 0.551
Sejong	20.5 ± 0.193	20.5 ± 0.192	19.7 ± 0.198	22.5 ± 0.225	19.9 ± 0.215	21.3 ± 0.171	21.3 ± 0.189	22.0 ± 0.246
Ulsan	24.0 ± 0.238	28.4 ± 0.333	27.2 ± 0.309	24.2 ± 0.444	25.8 ± 0.342	25.4 ± 0.365	29.6 ± 0.457	24.3 ± 0.354
Incheon	21.6 ± 0.133	23.7 ± 0.122	21.4 ± 0.139	20.1 ± 0.172	20.6 ± 0.145	20.2 ± 0.157	21.9 ± 0.157	21.6 ± 0.166
Jeonnam	24.4 ± 0.026	24.3 ± 0.037	25.0 ± 0.027	24.6 ± 0.028	24.5 ± 0.025	24.7 ± 0.025	25.1 ± 0.029	25.3 ± 0.023
Jeonbuk	23.9 ± 0.045	21.8 ± 0.042	24.7 ± 0.049	24.3 ± 0.108	22.6 ± 0.052	23.0 ± 0.053	24.1 ± 0.059	24.4 ± 0.056
Jeju	93.3 ± 22.541	71.7 ± 5.593	92.0 ± 4.010	102.2 ± 9.262	127.4 ± 8.043	138.0 ± 14.280	113.4 ± 5.717	105.4 ± 7.930
Chungnam	20.9 ± 0.036	21.8 ± 0.043	21.7 ± 0.044	22.6 ± 0.047	22.1 ± 0.048	22.0 ± 0.049	21.9 ± 0.048	22.6 ± 0.061
Chungbuk	19.2 ± 0.072	19.6 ± 0.075	19.6 ± 0.071	21.1 ± 0.069	19.0 ± 0.055	22.9 ± 0.070	23.1 ± 0.078	22.3 ± 0.086
Average	27.9 ± 1.594	25.5 ± 0.528	26.8 ± 0.459	27.3 ± 0.807	29.3 ± 0.716	29.8 ± 1.068	29.0 ± 0.613	28.2 ± 0.666
Maximum	93.3 ± 22.541	71.7 ± 5.593	92.0 ± 4.010	102.2 ± 9.262	127.4 ± 8.043	138.0 ± 14.280	113.4 ± 5.717	105.4 ± 7.930
Minimum	12.8 ± 1.778	9.1 ± 0.966	12.2 ± 1.283	12.5 ± 1.400	15.0 ± 0.845	12.0 ± 0.607	20.7 ± 1.810	15.4 ± 0.551

Table 3. Characteristics of soil organic matter contents (g kg^{-1}) under upland in 17 provinces.

Province	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Gangweon	22.7 $\pm$ 0.100	23.3 $\pm$ 0.115	24.3 $\pm$ 0.097	25.9 $\pm$ 0.112	25.7 $\pm$ 0.123	25.6 $\pm$ 0.127	27.0 $\pm$ 0.136	26.8 $\pm$ 0.143
Gyeonggi	20.1 $\pm$ 0.140	21.7 $\pm$ 0.130	19.6 $\pm$ 0.093	19.3 $\pm$ 0.106	19.4 $\pm$ 0.105	19.4 $\pm$ 0.106	20.1 $\pm$ 0.118	20.6 $\pm$ 0.108
Gyeongnam	28.7 $\pm$ 0.347	23.7 $\pm$ 0.116	29.5 $\pm$ 0.117	26.7 $\pm$ 0.112	28.0 $\pm$ 0.112	28.5 $\pm$ 0.126	26.3 $\pm$ 0.105	25.5 $\pm$ 0.096
Gyeongbuk	24.2 $\pm$ 0.115	23.4 $\pm$ 0.096	21.7 $\pm$ 0.094	23.8 $\pm$ 0.118	22.3 $\pm$ 0.112	23.0 $\pm$ 0.112	23.3 $\pm$ 0.130	22.1 $\pm$ 0.093
Gwangju	21.1 $\pm$ 0.382	19.0 $\pm$ 0.959	20.8 $\pm$ 0.638	20.3 $\pm$ 0.725	22.3 $\pm$ 0.486	22.0 $\pm$ 0.663	23.3 $\pm$ 0.832	24.2 $\pm$ 0.566
Daegu	23.9 $\pm$ 0.394	23.6 $\pm$ 0.321	25.7 $\pm$ 0.444	25.1 $\pm$ 0.413	24.2 $\pm$ 0.496	20.2 $\pm$ 0.416	24.1 $\pm$ 0.472	21.9 $\pm$ 0.370
Daejeon	22.4 $\pm$ 0.699	21.1 $\pm$ 0.994	19.3 $\pm$ 0.627	20.2 $\pm$ 0.443	21.2 $\pm$ 0.525	22.3 $\pm$ 0.450	21.9 $\pm$ 0.468	24.9 $\pm$ 0.610
Busan	25.8 $\pm$ 0.471	24.0 $\pm$ 0.503	28.2 $\pm$ 0.567	28.3 $\pm$ 0.563	34.8 $\pm$ 0.586	30.6 $\pm$ 0.811	27.5 $\pm$ 0.573	29.2 $\pm$ 0.828
Seoul	26.4 $\pm$ 0.786	28.5 $\pm$ 0.501	25.2 $\pm$ 0.445	23.9 $\pm$ 0.445	24.9 $\pm$ 0.650	26.7 $\pm$ 1.161	35.4 $\pm$ 1.995	24.1 $\pm$ 0.445
Sejong	18.4 $\pm$ 0.428	21.6 $\pm$ 0.374	21.8 $\pm$ 0.673	33.0 $\pm$ 3.950	21.6 $\pm$ 0.546	23.4 $\pm$ 0.537	23.3 $\pm$ 0.599	24.3 $\pm$ 0.651
Ulsan	25.4 $\pm$ 0.596	27.1 $\pm$ 0.769	23.9 $\pm$ 0.823	24.0 $\pm$ 0.964	34.5 $\pm$ 0.960	30.3 $\pm$ 1.004	25.3 $\pm$ 0.687	25.1 $\pm$ 0.455
Incheon	20.7 $\pm$ 0.543	21.8 $\pm$ 0.388	19.4 $\pm$ 0.408	21.1 $\pm$ 0.319	20.8 $\pm$ 0.343	20.0 $\pm$ 0.478	21.5 $\pm$ 0.517	18.8 $\pm$ 0.250
Jeonnam	25.5 $\pm$ 0.110	24.3 $\pm$ 0.057	24.9 $\pm$ 0.096	24.0 $\pm$ 0.087	24.5 $\pm$ 0.085	25.6 $\pm$ 0.078	26.5 $\pm$ 0.086	25.8 $\pm$ 0.067
Jeonbuk	23.1 $\pm$ 0.121	24.8 $\pm$ 0.153	26.1 $\pm$ 0.147	26.4 $\pm$ 0.242	24.2 $\pm$ 0.204	24.6 $\pm$ 0.162	24.6 $\pm$ 0.175	23.1 $\pm$ 0.123
Jeju	90.8 $\pm$ 0.586	101.5 $\pm$ 0.631	96.5 $\pm$ 0.668	96.0 $\pm$ 0.727	100.3 $\pm$ 0.781	104.8 $\pm$ 0.846	99.1 $\pm$ 1.084	113.5 $\pm$ 0.968
Chungnam	24.1 $\pm$ 0.100	23.2 $\pm$ 0.092	23.0 $\pm$ 0.095	23.2 $\pm$ 0.109	23.9 $\pm$ 0.127	23.7 $\pm$ 0.141	23.2 $\pm$ 0.156	24.2 $\pm$ 0.157
Chungbuk	20.7 $\pm$ 0.139	21.4 $\pm$ 0.124	18.5 $\pm$ 0.089	22.5 $\pm$ 0.152	22.4 $\pm$ 0.141	22.9 $\pm$ 0.143	23.1 $\pm$ 0.139	22.9 $\pm$ 0.124
Average	27.3 $\pm$ 0.356	27.9 $\pm$ 0.372	27.6 $\pm$ 0.360	28.5 $\pm$ 0.564	29.1 $\pm$ 0.376	29.0 $\pm$ 0.139	29.2 $\pm$ 0.487	29.2 $\pm$ 0.356
Maximum	90.8 $\pm$ 0.586	101.5 $\pm$ 0.631	96.5 $\pm$ 0.668	96.0 $\pm$ 0.727	100.3 $\pm$ 0.781	104.8 $\pm$ 0.846	99.1 $\pm$ 1.084	113.5 $\pm$ 0.968
Minimum	18.4 $\pm$ 0.428	19.0 $\pm$ 0.959	18.5 $\pm$ 0.089	19.3 $\pm$ 0.106	19.4 $\pm$ 0.105	19.4 $\pm$ 0.106	20.1 $\pm$ 0.118	18.8 $\pm$ 0.250

지역별 농경지 토양유기물저장량 변화 2013년도부터 2020년까지 지역별 논 토양유기물저장량 변화는 Fig. 2와 같다. 우리나라 논 토양 평균 토양유기물저장량은 $43.3 - 45.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ 이며, 가장 많은 토양유기물 저장하고 있는 지역은 전라남도로 약 8.3 Tg 로 우리나라 토양유기물저장량의 21.8%를 차지하고 있다 (Supplementary Table 2). 가장 적은 토양유기물 저장하는 지역은 제주도로 약 0.003 Tg 를 저장하고 있으며, 제주도의 경우 높은 토양유기물 함량을 보유하고 있는 반면에 논 경작 면적이 작아 매우 낮은 토양유기물저장량을 나타내고 있다 (KOSIS, 2020). 우리나라 논 토양유기물저장량의 약 80% 이상이 경상도, 전라도, 충청도에 저장되어 있다. 하지만, 1990년 이후 계속된 도시와 농업 인구 감소 등의 이유로 인한 농경지 면적의 감소는 계속된 토양유기물저장량 감소에 큰 영향을 미치고 있다 (Bren d'Amour et al., 2017; Park and Tak, 2013).

우리나라 밭 토양 평균 토양유기물저장량은 $41.0 - 42.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ 이다 (Fig. 3). 논 토양과 상반되게 제주도 토양의 경우 36,264 - 39,802 ha의 밭 작물을 재배하고 있으며 제주도 토양의 약 25.4% 토양유기물이 밭 토양에 저장되어 있다. 제주도를 제외한 가장 많은 토양유기물 저장 지역은 경상도로 약 4.8 Tg 의 토양유기물을 저장하고 있으며, 총 토양유기물저장량의 17.1%를 차지하고 있다. 경상도 밭 토양의 대부분이 콩, 고추, 참깨 작물이 재배되고 있으며, 토양유기물저장량의 약 42.9%를 차지하고 있다. 특히, 2012년 가축분뇨 해양투기 금지 정책으로 인한 가축분퇴비의 농업 사용량 증가는 밭 농경지 면적의 감소에도 불구하고 토양유기물저장량이 감소하지 않은 원인이라 할 수 있다. (Kim et al., 2018b; Lee et al., 2020).

Fig. 2. Changes in soil organic matter accumulation (Tg) under paddy in 17 provinces (2013 - 2020).

Fig. 3. Changes in soil organic matter accumulation (Tg) under upland in 17 provinces (2013 - 2020).

농경지 총 토양유기물저장량 변화 2013년도부터 2020년까지 농경지 총 토양유기물저장량 변화는 Fig. 4와 같다. 농경지 내 가축분퇴비 사용의 증가에도 불구하고 농경지의 면적 감소는 우리나라 총 토양유기물저장량을 2013년 약 69.2 Tg에서 2020년 약 65.3 Tg까지 감소시켰다 (Supplementary Table 2) (Kang, 2017). 특히, 밭 토양의 총 토양유기물의 경우 8년간 27.3 - 29.1 Tg로 큰 변화를 나타내고 있지 않지만, 논 토양의 경우 2013년 41.9 Tg에 대비 2020년 약 13.7%인 36.2 Tg까지의 감소가 우리나라 토양유기물저장량의 감소를 가져왔다. 8년간 총 토양유기물의 감소 추세를 보면 현재 수준의 토양유기물 관리는 50년 후인 2070년 우리나라 토양유기물은 총 33.2 Tg가 저장될 것으로 예측된다. 향후, 고도화된 기술을 통한 토양유기물저장량 예측방법 (digital soil mapping, denitrification-decomposition model, Roth C 등)을 이용할 때 본 결과를 고려해야 된다고 생각된다 (Singh and Benbi, 2020; Lembaid et al., 2021; Park et al., 2021).

Fig. 4. Changes in soil organic matter accumulation (Tg) under paddy and upland in South Korea (2013 - 2020) (mean $\pm$ SE).

Conclusions

우리나라 농경지 내 토양유기물저장량 변동 조사를 위해 2013년도부터 2020년까지 8년간 17개도 매년 평균 49만 개의 토양유기물 함량과 농경지 면적 변화를 조사 분석하였다. 2013년부터 농경지 총 면적은 계속하여 감소하는 반면, 논 토양유기물 함량은 27.9 g kg^{-1} 에서 2020년 28.2 g kg^{-1} 까지 약 1.1% 증가하였다. 밭 토양의 경우 유기물 함량은 27.3 g kg^{-1} 에서 2020년 29.2 g kg^{-1} 까지 약 7.0% 증가하였지만, 논 토양에 비해 적은 경지 면적으로 인한 우리나라 토양유기물저장량에는 큰 영향을 미치지 않았다. 우리나라 농경지 토양유기물저장량 변화는 2013년부터 2020년까지 계속 감소되었으며, 현재 수준의 토양유기물의 관리는 50년 후인 2070년에 농경지 내 토양유기물저장량을 지금 수준의 약 48%까지 감축될 것으로 예측된다. 결론적으로, 향후 우리나라 토양유기물저장량 관리를 위해서는 추가적인 유기물 투입 및 농경지의 확대 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of National Institute of Agricultural Sciences (NAS) research and development project (project number: PJ01414102).

Supplementary Information

Supplementary data are available at Korean Journal of Soil Science and Fertilizer online (<http://www.kjssf.org>).

References

- Ahn, S.B., T. Motomatsu, Y.S. Kim, K.S. Lee, and S.W. Hwang. 1992. Studies on rice productivity and mineral nutrients on the paddy-upland rotation system. Korean J. Soil Sci. Fert. 25(1):334-341.

- Bren d'Amour, C., F. Reitsma, G. Baiocchi, S. Barthel, B. Güneralp, K. Erb, H. Haberl, F. Creutzig, and C.S. Karen. 2017. Future urban land expansion and implications for global croplands. *PNAS* 114(34):8939-8944.
- Chen, X., Y. Hu, Y. Xia, S. Zheng, C. Ma, Y. Rui, H. He, D. Huang, Z. Zhang, T. Ge, J. Wu, G. Guggenberger, Y. Kuzyakov, and Y. Su. 2021. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils. *Global Change Biol.* 27:2478-2490.
- Chung, D.Y. and K.S. Lee. 2008. Role of chemical fertilizer and change of agriculture in Korea. *Korean J. Agric. Sci.* 35(1):69-83.
- Delgado, J.A. and R.F. Follett. 2002. Carbon and nutrient cycles. *J. Soil Water Conserv.* 57(6):455-464.
- Heo, S. 2021. Changes in soil chemical properties of rice paddy, upland field, and greenhouse in Incheon from 2015 to 2019. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):204-212.
- Kang, C.Y. 2017. Korea fertilizer pesticide agricultural machinery policy and future. p. 29-210. KREI, Jeonman, Korea.
- Kanwar, L.S. 2003. Organic matter accumulation in submerged soils. *Adv. Agron.* 81(1):169-201.
- Kim, D.Y. and C.H. Lee. 2005. Storage of soil carbon and prevention of global warming. p. 3-17. KISTI, Daejeon, Korea.
- Kim, J.J., J.I. Kim, Y.J. Yoon, N.U. Jo, and D.G. Park. 2018a. A study on improving staple grain policy in response to consumption changes. p. 39-109 KREI, Daejeon, Korea.
- Kim, H.J., S.J. Park, T.H. Kim, and S.J. Gang. 2018b. In-depth evaluation of livestock manure treatment business group. p. 13-111. KREI, Jeonman, Korea.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2020. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- Lee, K.D., S.Y. Hong, and Y.Y. Kim. 2012. Farmland use mapping using high resolution images and land use change analysis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):1164-1172.
- Lee, Y.H., M.S. Kim, S.J. Park, H.Y. Hwang, and S.H. Kim. 2020. Assessment of soil organic carbon fractions and stocks under different farming practice in a single maize cropping system. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):626-634.
- Lembaid, I., R. Moussadek, R. Mrabet, A. Douaik, and A. Bouhaouss. 2021. Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock under two tillage practices in a semi-arid region, Morocco. *Heliyon* 7(1):e05889.
- Li, Z.P., M. Liu, X.C. Wu, F.X. Han, and T.L. Zhang. 2010. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China. *Soil Tillage Res.* 106(2):268-274.
- Lim, S.S., W.J. Choi, S.X. Chang, M.A. Arshad, K.S. Yoon, and H.Y. Kim. 2017. Soil carbon changes in paddy fields amended with fly ash. *Agric., Ecosyst. Environ.* 245:11-21.
- Liu, K.L., J. Huang, D.M. Li, X.C. Yu, H.C. Ye, H.W. Hu, Z.H. Hu, Q.H. Huang, and H.M. Zhang. 2019. Comparison of carbon sequestration efficiency in soil aggregates between upland and paddy soils in a red soil region of China. *J. Integr. Agric.* 18:1348-1359.
- MAFRA. 2015. Land utilization. Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- MAFRA. 2018. Land utilization. Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- MAFRA. 2020. Land utilization. Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- NAAS (National Institute of Agricultural Science). 2014. Taxonomical classification of Korean soils. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science). 2010. Method of soil and plant analysis. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Park, S.J., S.I. Kwon, S.H. Kim, J. Shim, Y.H. Lee, and T.K. Oh. 2021. Estimation of soil organic carbon (SOC) stock in South Korea using digital soil mapping technique. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54(2):247-256.
- Park, S.Y. and H.M. Tak. 2013. Land use changes and climate patterns in Southeast Korea. *J. Korean Assoc. Geogr.*

- Inf. Stud. 16(2):47-64.
- Potter, K.N., H.A. Torbert, O.R. Jones, J.E. Morrison Jr, and P.W. Unger. 1998. Distribution and amount of soil organic C in long-term management systems in Texas. *Soil Tillage Res.* 47(3-4):309-321.
- Reeves, D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43(1-2):131-167.
- Rudrappa, L., T.J. Purakayastha, D. Singh, and S. Bhadraray. 2006. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India. *Soil Tillage Res.* 88(1):180-192.
- Singh, P. and Benbi, D.K. 2020. Modeling soil organic carbon with DNDC and RothC models in different wheat-based cropping systems in North-Western India. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 51(9):1184-1203.
- Song, K.C. 1997. Distribution, and conditions for formation of allophane in soils in Cheju Island. *Mineral. Ind.* 10(2): 26-45.
- Song, K.C., B.G. Hyun, K.H. Moon, S.J. Jeon, H.C. Lim, and S.C. Lee. 2010. Taxonomical classification and genesis of Donggui series in Jeju Island. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(2):230-236.
- Statistics Korea. 2020. Statistics of agricultural area. Statistics Korea, Daejeon, Korea.
- VandenBygaart, A.J. and B.D. Kay. 2004. Persistence of soil organic carbon after plowing a long-term no-till field in Southern Ontario, Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(4):1394-1402.
- Xie, C., Y. Hum, Y. Xia, S. Zheng, C. Ma, Y. Rui, H. He, D. Huang, Z. Zhang, T. Ge, J. Wu, G. Guggenberger, Y. Kuzyakov, Y. Su. 2021. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils. *Global Change Biol.* 27:2478-2490.
- Yang, H.Y., J.G. Kim, B.W. Oh, and I.H. Seo. 2020. Improvement of nutrient balance using feed crops for regional nutrient management. *J. Bio-Environ. Control* 29(1):89-95.
- Yoon, B.S., S.C. Choi, S.J. Lim, S.J. Heo, and Y. Seo. 2020. Status and changes in chemical properties of upland soil in Gangwon province between 2001 and 2017. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):549-557.