Changes of Soil Chemical Quality Index of Paddy Soils by Long-term Application of Soil Amendments

Myung Sook Kim*, Seong Jin Park, Sung Hun Kim, Hyun Young Hwang, Song Heui Ahn, Dong Won Lee, and Yun hae Lee
Soil & Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: msk74@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 19, 2019

Revised: October 30, 2019

Accepted: November 4, 2019

ORCID

Myung Sook Kim

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

Soil is an essential resource for life and its properties are susceptible to be modified by application of soil amendment. The impact of management practices on soil function can be assessed through a soil quality index. The changes in soil chemical quality index in paddy soils applied of soil amendments were assessed from data of long-term experiment plots which were operated from 1969 to 2016 by the National Institute of Agricultural Science, Wanju, Korea. The treatments were inorganic fertilization (NPK), inorganic fertilizer plus soil amendments (rice straw compost, NPK+C; silicate fertilizer, NPK+S; mixing rice straw compost and silicate fertilizer, NPK+CS). The quality index of soil for chemical properties was analysed by method suggested by Yoon et al. (2004) which calculating soil quality index integrating the score of the each soil chemical property and divided into by 4 periods (Period I : 1969 - 1978, Period II : 1979 - 1985, Period III: 1986 - 2001, Period IV: 2002 - 2016). The paddy fields for the long-term experiments were changed to a soil with good quality under application of soil amendment over a period of time. The order of magnitude of soil chemical quality index was NPK+CS > NPK+S > NPK+C > NPK. Chemical attributes such as pH, SOM, and Av.SiO_2 increased the soil quality index in NPK+C, NPK+S, and NPK+CS compared to NPK. The quality index of soil chemical properties of NPK, NPK+C and NPK+S treatments ranged from 70 to 74 in period, from 64 to 71 in period II, and to 75 to 82 in period III and IV. Especially, the decrease of the chemical quality index value of NPK, NPK+C and NPK+S treatments in Period II was attributed to the decrease of the soil pH value below the optimum range of rice growth due to irrigation water. The NPK+CS treatment increased to the highest value of 87 in period I, but tended to decrease slightly at period III and IV. It showed that these were caused by the accumulation of silicate fertilizer, resulting in a decrease of the chemical quality index value of the soil. When a constant amount of soil amendments was continuously applied for 48 years, the soil chemical quality index were improved. After that period, the soil chemical quality index, however, was decreased because of excess accumulation of soil amendments. In view of the soil chemical quality index values, optimal application of soil amendment is the most suitable management for this site since it preserves soil quality and provides an acceptable rice grain yield.

Keywords: Indicators of soil chemical quality, Soil amendment, Long-term application, Paddy field, Rice straw compost, Silicate fertilizer

Changes of score of soil chemical quality index by periods in a paddy soil by long-term application of inorganic fertilizers and soil amendments.

Period	NPK	NPK+C	NPK+S	NPK+CS
Starting year ('54)	34	34	34	34
Period I (69 - 79)	67	72	77	87
Period II (80 - 89)	63	66	77	81
Period III (90 - 02)	67	69	82	78
Period IV (03 - 16)	75	77	80	80

Introduction

토양은 공기와 물과 같이 우리 환경의 아주 중요한 구성요소이고, 유기물의 손실, 비옥도 감소, 토양오염과 같은 문제는 토양질의 개념 및 평가방법에 관해 큰 관심을 불러 일으켰다 (Karlen et al., 2001). 토양질은 자연 또는 생태계 내에서 식물과 동물의 생산성을 유지하고, 물과 공기의 질을 유지 또는 향상시키며, 인간 건강과 서식지를 보호하기 위해 토양기능을 최대화 시키는 능력이라고 정의하였다 (Karlen et al., 1997). 이 개념은 인간 행동이 환경에 미치는 영향, 특히 농업의 지속 가능성과 관련된 영향을 정량화하는 데 필수적인 항목이라고 하였다 (Wander and Drinkwater, 2000; Andrews et al., 2003). 만약 토양이 부적절하게 관리된다면 토양기능을 파괴하는 변화를 가져올 수 있기 때문에 적절하게 관리되도록 토양질을 평가하고 모니터링할 필요성이 인식되었다 (Doran and Jones, 1996). 토양 질 지표는 토양이 작물 생산 또는 환경 기능을 수행하는 능력에 영향을 미치는 측정이 가능한 토양 속성을 나타내야 한다 (Archad and Martin, 2002). 농업적 활동의 영향을 감지하기 위해 토양질의 지표들은 충분히 민감해야 하지만, 단기 기상 패턴의 영향을 받지 않아야 한다고 하였다 (Doran et al., 1996).

토양 질을 평가하기 위한 여러 가지 방법이 제안되었고, 토양 특성 중 생산성에 관련한 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 질에 대하여 주로 연구되어 왔다. Doran and Parkin (1994)은 토양 질을 평가하기 위해 간단한 곱셈 함수를 사용할 것을 권장했고, Karlen and Stott (1994)는 농업생산시스템이 토양 질에 미치는 다양한 토양 관리의 영향을 평가하고자 물 유입 및 이동, 식물 생장과 같은 토양 질과 관련된 중요한 토양 기능을 선택해서 토양질을 평가하였다. Arshad and Coen (1992)은 토양깊이에 따른 작물 뿌리 뻗음, 유효수분 보유력, 용적밀도 또는 침투 저항성, 수리전도도, 입단 안정화도, 유기물 함량, 양분 유효도, pH, 전기전도도를 토양질의 지표인자로 제시하였다. Andrews et al. (2004)은 토양질 평가에 있어 환경영향을 고려해야 하고, 이것을 토양질 지표의 점수화 모델로 제안하였다.

국내의 경우, Jung and Kim (2002)은 토양의 질 지표의 산정은 각각에 대한 가중치를 결정하여 각 인자에 적용한 후 합산하는 방법으로 계산하였고, 국내 대표적인 경작지 토양의 화학적 질 지표를 평가하였다. 논토양의 토양 화학성 질에 관해서 Yoon et al. (2004)은 주요한 토양특성을 주성분 분석을 통해 pH, 유기물, 유효인산, 치환성 칼륨, 유효 규산의 지표항목을 선정하였고, 이것을 일정한 구간별로 배점을 주고 합산하여 하나의 지표로 만들어 계산하였다. 토양의 각 특성과 기능과의 관계를 고려하여 점수화하는 방법을 Karlen et al. (1994)이 제시한 방법 중에 선형적 관계를 선택하였고, 세부지표는 작물의 생산성과 경제성 및 환경오염을 고려하여 결정하였다고 하였다. 그 이후에 농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경변동조사 자료를 활용하여 논토양의 화학성 질 변화에 발표하는 등 (Kim et al., 2010)의 연구가 일부 수행되었고, 장기시험포장에서 토양질에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

그래서, 이 연구의 목적은 토양개량제 장기 시용으로 벼 재배지에서 토양화학성 질의 변화를 분석하고, 토양질에 대한 토양개량제 영향력을 파악하는 것이다.

Materials and Methods

시험포장 토양특성 본 연구에 사용된 시험포장 논토양은 1954년도에 경기도 수원시 권선구 서둔동 소재 국립 작물과학원 (현 국립식량과학원) 포장 내에 조성되었고, 지형적으로 하성평탄지에 위치한다. 논토양의 특성으로 유효토심은 보통이고 투수성은 빠르며 배수등급은 약간양호이며, 토성은 사양질로 강서통 (Coarse loamy, Fluvaquentic Eutrudepts)의 특성을 가진다. 1954년 당시의 토양 화학성은 pH 5.2, 유기물 (OM) 함량은 16 g kg^{-1} , 유효인산 (Avail.

Year	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	10	11	12	13	14	15	16																		
Rice cultivar	Paldael																Jinheoung														Milyang 23																Daechung																Samkwang															
N-P ₂ O ₅ -K ₂ O. Kg ha ⁻¹	75-75-75																100-75-75														150-86-86																110-70-80																															
Type of N fertilizer	Ammonium sulphate																																																																													
Type of P fertilizer	Double superphosphate																																Super phosphate																Fused phosphate																													
Type of K fertilizer	Murate of potash																																																																													
Compost																	Rice straw compost (7.5 ~30.0ton ha ⁻¹)																																																													
Lime	Calcium hydroxide (Lime requirement equivalent pH 6.5)																																																																													
Type of Si fertilezer(2Mg ha ⁻¹)																	Calcium silicate																Silicate fertilizer																																													

Fig. 1. Rice cultivar and chronological application of inorganic fertilizers, rice straw compost and soil amendments.

P₂O₅ 함량은 120 mg kg⁻¹, 치환성 칼륨 (Exch. K) 함량이 0.08 cmol_c kg⁻¹으로 유효인산 함량을 제외한 성분은 벼 생육을 위한 농토양 적정 비옥도에 기준 (NAAS, 2010)에 미치지 못하였다. 벼의 품종과 비료와 개량제를 사용한 내력은 Fig. 1과 같다.

공시품종 벼의 품종은 1954년부터 1968년까지는 팔달, 1969년부터 1978년까지는 진흥, 1979년부터 1985년까지는 밀양 23호, 1986년부터 2003년도까지는 대청, 2004년부터 2011년까지는 삼광을 재배하였다.

처리구 선정 처리구는 완전 임의 배치법으로 배치되었고 모두 32개의 처리구로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 3요소구 (NPK = 질소 - 인산 - 가리), 3요소 + 벧짚퇴비구 (NPK + C), 3요소 + 규산구 (NPK + S), 3요소 + 벧짚퇴비 + 규산구 (NPK + CS)를 분석에 이용하였다.

시비량 및 재배관리 시비량은 표준시비량 (NAAS, 2010)이 달라짐에 따라서 질소는 75 - 150 kg ha⁻¹, 인산은 70 - 86 kg ha⁻¹, 가리는 75 - 86 kg ha⁻¹, 퇴비는 7.5 kg ha⁻¹, 규산질비료는 2 Mg ha⁻¹를, 석회는 pH 6.5까지 상승시키는 양을 사용하였고, 기비-분얼비-수비-실비의 분시비율은 질소는 50-20-20-10%, 가리는 70-0-30-0%로 2회, 인산, 퇴비, 석회, 그리고 규산은 전량 기비로 사용하였다. 벧짚퇴비의 제조는 벼 수확기에 시험연구 포장으로부터 벧짚을 3,000 kg 정도 수거하여 절단하고 물을 뿌렸으며 비닐을 덮어 후숙하였고 요소비료를 4 - 6 kg에 양을 첨가하여 부숙한 후 사용하였다. 토양개량제인 규산질비료와 소석회 그리고 퇴비는 토양과 충분히 반응하도록 4월 중순에 미리 각각의 처리구에 살포하고 경운하였으며, 무기질비료는 5월 하순에 담수하면서 사용하고 벼를 이앙하였다. 전년도에 수확 후 남아있는 벼의 그루터기와 뿌리는 경운 시 쪼개질 할 때 토양에 전량 환원하였다.

토양 및 수량 조사 토양 화학성의 장기적인 변동을 모니터링하기 위한 분석용 시료는 해마다 4월 초에서 중순 사이에 처리구당 0 - 15 cm 깊이로 3 - 7군데를 채취하고 혼합하여 사용하였다.

토양 화학성 분석 토양의 pH와 전기전도도 (EC, Electrical conductivity)는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 추출하여 측정하였고, 토양유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법으로 추출하여 720 nm에서, 유효규산은 1 M NaOAc (pH 4.0)용액으로 추출하여 700 nm에서 비색계 (U-3000, Hitachi)로, 치환성 양이온은 1M NH₄OAc (pH 7.0) 완충용액으로 추출하여 유도결합 플라즈마 발광광도계 (ICP-OES, GBC)으로 측정하였다 (NIAST, 2000).

토양 화학성 질 평가 토양개량제의 장기간 시용한 영향을 정량화하기 위해 Yoon et al. (2004)이 제안한 논토양 화학성 질 평가방법을 따랐다 (Table 1). 이것은 토양화학성 특성을 주성분 분석을 통해 세부지표로서 pH, 토양유기물, 유효인산, 치환성 칼륨, 유효규산을 선정하였고, 각 세부지표의 점수를 합하여 세부지표의 수로 나누어서 계산하였으며, 식 (Eq. 1)은 아래와 같다.

$$\text{토양화학성 질 지수} = \frac{\text{세부지표 (pH, 토양유기물, 유효인산, 치환성칼륨, 유효규산)별 점수의 합}}{\text{선정한 세부지표의 수}} \quad (\text{Eq. 1})$$

화학성별 측정값에 따라 토양의 기능을 최대 100점 그리고 최소 0점으로 점수화하여 토양 화학성 질의 상대지수를 백분율로 표시할 수 있도록 하였다. 그리고 논토양에 개량제 시용으로 인해 토양화학성의 변화가 크게 발생하는 시점을 기준으로 4개의 시기로 구분하였고, 시기별 (Period I: 1969 - 1978, Period II: 1979 - 1985, Period III: 1986 - 2001, Period IV: 2002 - 2016)로 나누어서 조사하였다.

정조 수량 정조수량은 해마다 10월에 처리구 당 70주씩 3반복으로 채취하여 탈곡한 후에 자연 상태에서 건조하고 무게를 조사하였다.

Table 1. Rating of soil chemical quality indicators for paddy field.

Soil property	Soil quality indicator rating (Score)				
	Very low (25)	Low (50)	Medium (75)	High (90)	Very high (100)
pH, 1:5	< 4.5	4.5 - 4.8	4.9 - 5.1	5.2 - 5.4	5.5 - 7.0
	> 7.6	7.5 - 7.6	7.3 - 7.4	7.1 - 7.2	
OM, g kg ⁻¹	9	9 - 15	16 - 20	21 - 24	25 - 30
	45	41 - 45	36 - 40	31 - 35	
Av.P ₂ O ₅ , mg kg ⁻¹	820	20 - 30	31 - 40	41 - 49	50 - 150
	370	281 - 370	211 - 280	151 - 210	
Ex. K, cmol _c kg ⁻¹	0.10	0.10 - 0.15	0.16 - 0.20	0.21 - 0.24	0.25 - 0.50
	0.82	0.69 - 0.82	0.58 - 0.68	0.51 - 0.58	
Av.SiO ₂ , mg kg ⁻¹	50	50 - 82	83 - 113	114 - 129	130 - 200
	390	311 - 390	251 - 310	201 - 250	

통계 분석 모든 데이터는 SAS 프로그램 (v. 9.2)으로 통계분석을 하였다. 논토양에 토양개량제 장기 사용에 따른 토양 화학성의 변동과 질 지수를 검정하고자 ANOVA 분석을 실시하였고, 처리구간 토양화학성 및 질 지수를 비교하고자 DMRT 검정 ($p < 0.05$)을 분석하였다.

Results and Discussion

토양개량제의 장기 사용에 따른 토양 화학적 특성의 변화 시기 I 에 pH는 규산질비료를 처리하지 않은 처리구 (NPK, NPK+C)의 값은 각각 5.3, 5.5이었고, 시험 시작전 (5.3)과 큰 차이가 없었으나, 규산질비료를 처리한 구에서 (NPK+S, NPK+CS)는 6.1로 규산질비료를 처리하지 않은 처리구들과 유의적인 차이가 발생하였다 (Table 2). 이것은 규산질 비료에 포함된 칼슘 등의 알칼리 성분으로 토양의 pH가 상승했다고 판단된다. 토양유기물은 개량제 중에서 벚짳퇴비를 처리한 구 (NPK+C, NPK+CS)와 처리하지 않은 구 (NPK, NPK+S)와는 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 유효인산은 벚짳퇴비와 인산질비료를 병행 처리한 구 (NPK+C, NPK+CS)에서 높았고, 인산질 비료만 처리한 구 (NPK, NPK+S)는 낮게 나타났다. 치환성 칼륨 함량은 4개 처리구 모두에서 $0.13 - 0.16 \text{ cmolc kg}^{-1}$ 의 범위에 있었고, 이들의 처리구간에 유의적인 차이는 없었다. 유효규산은 규산질비료를 처리한 구 (NPK+S)에서 높았고, 규산질비료와 벚짳퇴비를 병행 처리한 구 (NPK+CS)에서는 더 높은 함량을 나타냈으며, 이들 처리구들과 규산질료를 투입하지 않은 처리구들과는 유의적인 차이를 나타냈다.

Table 2. Changes of soil chemical properties by Period I ('69 - '79), II ('80 - '89), III ('90 - '02), IV ('03 - '16). N, P, and K mean nitrogen, phosphate, potash as inorganic fertilizer. C and S mean rice straw compost and silicate fertilizer as soil amendments.

Period	Soil chemical properties	Optimum range	NPK	NPK+C	NPK+S	NPK+CS
Period I ('69 - '79)	pH	5.5 - 6.5	5.3b [†]	5.5b	6.1a	6.1a
	SOM	20 - 30	20a	25b	20a	24b
	Av.P ₂ O ₅	80 - 120	182c	229a	195bc	213ab
	Ex. K	0.15 - 0.20	0.15a	0.16a	0.13a	0.16a
	Av.SiO ₂	157 - 180	37c	44c	86b	119a
Period II ('80 - '89)	pH	5.5 - 6.5	5.0c	5.3b	5.8a	5.9a
	SOM	20 - 30	21a	29b	22a	30b
	Av.P ₂ O ₅	80 - 120	222c	309a	223c	280b
	Ex. K	0.15 - 0.20	0.13a	0.19a	0.13a	0.18a
	Av.SiO ₂	157 - 180	34c	43c	73b	97a
Period III ('90 - '02)	pH	5.5 - 6.5	5.4b	5.5b	6.2a	6.2a
	SOM	20 - 30	22a	33b	22a	31b
	Av.P ₂ O ₅	80 - 120	233b	308a	217b	297a
	Ex. K	0.15 - 0.20	0.11a	0.14a	0.12a	0.14a
	Av.SiO ₂	157 - 180	42b	52b	226a	235a
Period IV ('03 - '16)	pH	5.5 - 6.5	5.8b	5.9b	6.8a	6.9a
	SOM	20 - 30	20a	28b	21a	29b
	Av.P ₂ O ₅	80 - 120	147b	186a	140b	184a
	Ex. K	0.15 - 0.20	0.12a	0.13a	0.12a	0.12a
	Av.SiO ₂	157 - 180	54b	61b	250a	273a

[†] Means followed by the same letters in the rows are not different at $p < 0.05$ according to Duncan's test.

시기Ⅱ에 pH는 시기Ⅰ보다 NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS 처리구는 각각 5.0, 5.3, 5.8, 5.9로 수치가 감소하는 경향이였다. 이 시기에 관개수로써 공급한 서호수의 pH는 7.2 (NIAST, 2003)로 낮았고, 이것이 토양의 pH의 감소에 큰 영향을 주었으리라 판단한다.

시기Ⅲ에 pH는 시기Ⅱ보다 NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS 처리구는 각각 5.4, 5.5, 6.2, 6.2로 수치가 다시 상승하였다. 이 시기에 관개수의 공급원을 서호수에서 관정수로 변경하였고, 서호수 (pH 7.2)보다 관정수 (pH 7.8)의 pH가 높았기 (NIAST, 2003) 때문에 토양의 pH 증가에 영향을 주었으리라 판단한다. 시기Ⅱ보다 토양유기물 함량은 벧짚퇴비 처리구에서 (NPK+C, NPK+CS) 3 - 4 mg kg⁻¹ 정도 증가하였고, 유효인산의 함량은 시기Ⅱ와 유사한 경향을 나타내었다. 이에 반해 규산질비료는 138 - 204mg kg⁻¹으로 급속히 증가하였는데, 이 시기에 비료종류를 규회석에서 규산질비료로 변경하였고, 규산질비료의 가용성 규소 성분이 높게 포함되어 있었기 때문이라고 판단된다.

시기Ⅳ에 pH는 시기Ⅲ보다 NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS 처리구는 각각 5.8, 5.9, 6.8, 6.9로 지속적으로 증가하였다. 시기Ⅲ보다 토양유기물 함량은 벧짚퇴비 처리구에서 (NPK+C, NPK+CS) 3 - 5 g kg⁻¹ 정도 감소하였고, 유효인산의 함량은 122 mg kg⁻¹ 정도 감소하였다. 이것은 인산고정작용으로 유효인산 함량으로 추출되는 인산의 양이 감소하였기 때문이라고 보고하였다 (Kim et al., 2017). 유효규산 함량은 규산질비료처리구에서 크게 증가하였고, 적정 범위 (157 - 180mg kg⁻¹)보다 2배정도 과다하게 집적되었다.

토양화학적 질의 장기적 변화 토양 화학성 질 지수값은 1969년부터 2016년까지 개량제 처리구별로 비교한 결과는 NPK+CS > NPK+S > NPK+C > NPK의 순서로 벧짚퇴비와 규산질비료의 병행 처리구에서 가장 높았다 (Table 3). 시기별로 보면 NPK, NPK+C, NPK+S 처리구의 토양화학적 질 지수값은 시기Ⅰ에 70 - 74의 범위에 있었고, 시기Ⅱ에 64 - 71로 낮아졌다가 시기Ⅲ, Ⅳ에 향상되어 75 - 82에 도달하였다. 시기Ⅱ에 화학성 질 지수값이 하락한 원인은 pH가 낮은 서호수의 수질로 논토양의 pH 값이 낮아졌기 때문이라고 추정한다. NPK+CS 처리구는 시기Ⅰ에 82에서 시기Ⅱ에 84로 최고 수치에 도달하였다가 시기Ⅲ, Ⅳ에서 하락하는 경향을 나타냈다. 논토양에 일정한 양의 토양개량제를 48년간 지속적으로 투입하게 되면, 토양화학적 질은 30년간까지 지속적으로 향상되었지만, 그 기간을 경과하면 규산질비료의 토양에 과다하게 누적되어 토양 화학성 질의 감소하는 결과를 가져왔고 판단된다.

기존의 연구는 본 연구처럼 장기시험포장에서의 토양화학적 질 연구보다 우리나라 논토양의 화학성 질 지수의 변화에 대하여 연구하였다. Jung and Kim (2002)은 토양질 평가방법을 설정하여 우리나라 논토양의 평균 화학적 질 지수를 평가한 결과 73점이라고 발표하였다. Kim et al. (2010)은 본 연구의 화학성 질 지표를 이용하여 우리나라 논토양의 화학성 질 지수는 1999년 93, 2003년 96, 2007년 96으로 높았으며, 국가에서 정책으로 규산질비료를 공급함에

Table 3. Changes of score of soil chemical quality index by periods in a paddy soil by long-term application of inorganic fertilizers and soil amendments. N, P, and K mean nitrogen, phosphate, potash as inorganic fertilizer. C and S mean rice straw compost and silicate fertilizer as soil amendments.

Period	NPK	NPK+C	NPK+S	NPK+CS
Starting year ('54)	34	34	34	34
Period I (69 - 79)	67	72	77	87
Period II (80 - 89)	63	66	77	81
Period III (90 - 02)	67	69	82	78
Period IV (03 - 16)	75	77	80	80

Fig. 2. Indicator contribution in the evaluation of the soil chemical quality index according to long-term application of soil amendments. N, P, and K mean nitrogen, phosphate, potash as inorganic fertilizers. C and S mean rice straw compost and silicate fertilizer as soil amendments.

따라 유효규산 함량이 증가함으로써 논토양의 화학성 질이 크게 향상되었다고 보고하였다.

토양개량제를 장기간 투입함에 따라 토양화학성 세부지표별 질 지수의 평균값은 Fig. 2와 같다. 벧짚퇴비를 넣은 처리구(NPK+C: 96, NPK+CS: 96)는 벧짚퇴비를 투입하지 않은 처리구(NPK: 75, NPK+S: 81)보다 유기물의 질 지수가 15 - 21 정도 높았고, 규산질비료를 넣은 처리구(NPK+S: 63, NPK+CS: 90)는 그렇지 않은 처리구(NPK: 25, NPK+C: 25)보다 유효규산의 질 지수 값이 38 - 25정도 높았으며, pH의 질 지수 값도 5 - 13 정도 높게 나타났다. 토양개량제 48년간 투입함에 따른 토양화학성 질 지수의 평균값은 NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS는 각각 67, 72, 77, 87로 나타났고, 토양개량제를 투입한 처리구(NPK+C, NPK+S, NPK+CS)는 NPK 처리구보다 4 - 19정도로 변동폭이 크게 발생했으며, 작물생산성에 초점을 맞춰기 때문에 개량제의 종류가 많을수록 화학성 질 지수의 값은 높게 나타났다고 생각된다.

토양개량제 장기 사용에 따른 처리구별로 토양화학성 질 지수에 대해 각 세부지표 인자의 기여도를 평가하였다(Table 4). 처리구별 세부지표인자의 기여도는 NPK 처리구에서 시기 I 부터 시기IV까지 pH, 유기물, 유효인산의 세부지표인자가 20% 이상으로 크게 영향을 크게 주었고, 치환성 칼륨은 그 다음으로 영향(13 - 18%)을 주었으며, 유효규산의 인자는 7 - 9%로 가장 낮게 영향을 주었다.

NPK+C 처리구에서 시기 I - III에서 pH와 유기물이, 시기IV에서 pH, 유기물, 유효인산의 세부지표인자의 기여도가 23% 이상으로 크게 나타났다.

NPK+S 처리구는 시기 I 에서 pH와 유효인산이, 시기 II 에서 pH와 유기물이, 시기III에서 pH, 유기물, 유효규산에 의해, 시기IV는 pH, 유효인산, 유효규산의 세부지표인자의 기여도가 22% 이상으로 영향을 크게 주었다.

NPK+CS 처리구에서는 시기 I - III까지 pH, 유기물, 유효규산의 영향력이 21 - 25%이상으로 컸고, 시기IV에서는 pH, 유기물의 영향력이 22 - 25%로 크게 나타났다. 시기IV에서 유효규산의 영향력이 감소한 원인은 유효규산 함량이 적정보다 과다하게 집적되어 유효규산의 세부지표의 질 지수 값이 감소하였기 때문으로 판단한다.

이처럼 개량제 처리에 의한 화학성 질 지수의 변화는 시기별로 다양하게 나타났다. 토양 화학성 질 변화에 영향이 큰 인자는 pH, 유기물, 유효규산이었고, 이들이 변화하는데 영향을 준 것은 토양개량제로 투입된 벧짚퇴비와 규산질비료, 그리고 장기 사용으로 토양에 누적되는 각 성분별 함량 등이 크게 관여한다고 판단된다. 본 논문에서는 토양화학성의 측정값만이 있어서 화학성 질만 평가하였는데, 국외의 경우 토양 화학성 질 이외에 물리성 질까지 평가를 하였

Table 4. Percentage contribution of each soil chemical indicator to the soil quality indicators by long-term application of soil amendments. N, P, and K mean nitrogen, phosphate, potash as inorganic fertilizers. C and S mean rice straw compost and silicate fertilizer as soil amendment.

Period	Indicator	NPK	NPK+C	NPK+S	NPK+CS
----- % -----					
Period I ('69 - '79)	pH	25	26	26	23
	SOM	22	27	21	22
	Av.P ₂ O ₅	27	20	23	18
	Ex. K	18	19	14	16
	Av.SiO ₂	7	7	16	21
Period II ('80 - '89)	pH	24	26	26	25
	SOM	28	29	23	23
	Av.P ₂ O ₅	24	15	19	15
	Ex. K	16	21	13	16
	Av.SiO ₂	8	9	18	21
Period III ('90 - '02)	pH	29	28	24	26
	SOM	26	26	22	25
	Av.P ₂ O ₅	23	17	20	15
	Ex. K	14	15	12	13
	Av.SiO ₂	7	14	22	22
Period IV ('03 - '16)	pH	27	26	24	24
	SOM	21	26	19	25
	Av.P ₂ O ₅	27	23	24	22
	Ex. K	13	12	12	11
	Av.SiO ₂	12	13	21	19

고, Jairo et al. (2011)는 토양질 지수의 세부지표항목 중에 뿌리 발달은 15 - 32%, 물저장량 22 - 25%, 양분공급력은 46 - 61%으로 화학성 인자의 영향력이 컸다고 발표한바 있고, 본 연구에서도 토양의 질을 결정하는 물리성 및 미생물 특성 등을 포함한 종합적인 질 평가가 필요하리라 생각된다.

토양화학성 질과 작물 상대 수량과의 관계 NPK, NPK+C 처리구에서 토양화학성 질 지수와 작물의 상대 수량과의 관계를 분석하였다 (Fig. 3). 상대수량은 비료 처리한 구 (NPK, NPK+C, NPK+S, NPK+CS)의 정조수량을 비료를 처리하지 않은 구의 정조수량을 나누어준 후 백분율로 환산한 값으로 하였다. 그 결과, NPK, NPK+C 처리구와 상대 정조수량과의 상관계수 (r)는 각각 0.4384, 0.3336으로 낮았지만, 통계적으로 유의한 정의 상관 관계에 있었다. 시기 I 부터 시기 IV까지 토양화학성 질 지수가 NPK와 NPK+C 처리구에서 58에서 76으로 증가함에 따라 작물의 정조 수량이 증가하는 경향이었고, NPK+C 처리구에서도 토양화학성 질 지수가 61에서 83로 증가할수록 상대 정조 수량도 증가하는 경향이였다. 벧짚퇴비와 규산질비료를 병행 사용한 처리구 (NPK+CS)에서 시기 I 부터 시기 II까지 토양화학성 질 지수와 작물의 정조 수량과 정의 상관관계에 있었으나, 시기 III부터 시기 IV에서 작물 수량과 상관관계는 유의성이 없었다. 즉 시기 I 부터 시기 II까지의 NPK+CS 처리구의 화학성 질 지수의 증가에 따라 작물 수량도 증가하였지만, 시기 III부터 시기 IV까지 토양화학성 질은 감소하는 경향이였으나, 벧의 정조수량은 일정한 수준을 유지하였

다. 규산질비료의 장기사용에 따라 적정수준보다 높게 집적될 경우에, 논토양 화학성 질 지수를 감소하지만, 정조 수량의 감소하지 않았다. 규산질비료를 처리한 구(NPK+S)의 토양화학성 질 지수는 작물의 상대 수량과 상관관계가 유의성이 없는 것으로 나타났지만, 규산질비료의 투입으로 화학성 질 지수가 높아짐에 따라 벼의 상대 정조 수량은 증가하는 경향이였다. 48년간의 논토양 화학성 질 지수는 NPK, NPK+C, NPK+CS 처리구에서 작물 수량의 변화 양상을 설명할 수 있었지만, 규산질비료의 장기투입으로 논토양에 집적될 경우에는 수량에 대한 토양화학성 질 지수가 유사하게 변화되도록 보완하는 연구가 필요하리라 판단된다.

Fig. 3. Relationships between soil chemical quality index and relative grain yield from period I ('69 - '79), II ('80 - '89), III ('90 - '02), and IV ('03 - '16). Relative grain yield means yield ratio of fertilizer application treatment over no fertilizer application treatments. N, P, and K mean nitrogen, phosphate, potash as inorganic fertilizers. C and S mean rice straw compost and silicate fertilizer as soil amendment.

Conclusions

논토양에 토양개량제를 장기간 투입하는 장기시험포장에서의 논토양의 화학성 질의 변화를 처리구 및 시기별 (Period I: 1969 - 1978, Period II: 1979 - 1985, Period III: 1986 - 2001, Period IV: 2002 - 2016)로 비교해 보았다. 토양화학성 질 지수의 크기는 NPK+CS > NPK+S > NPK+C > NPK의 순서로 벧짚퇴비와 규산질비료의 병행 처리구에서 가장 높았다. 시기별로 비교해 보면 NPK, NPK+C, NPK+S 처리구의 토양화학성 질 지수값은 시기 I 에 70 - 74 이었고, 시기 II 에 64 - 71로 낮아졌다가 시기 III, IV에서 다시 향상되어 75 - 82에 도달하였다. 시기 II 에 화학성 질 지수값이 하락한 것은 관개수의 영향으로 토양 pH 수치가 벧 생육 적정범위 미만으로 감소하였기 때문으로 판단된다. NPK+CS 처리구는 시기 I 에 82에서 시기 II 에 84로 최고 수치로 향상되었다가 시기 III, IV에서 하락하는 경향이였다. 이로부터 농경지에 일정한 양의 토양개량제를 48년간 지속적으로 투입하게 되면, 토양화학성 질은 일정기간 향상되었지만, 그 기간을 경과하면 토양에 과다하게 누적되어 토양질의 감소를 가져온다는 것을 알 수 있다. 무기질비료와 더불어 퇴비와 규산질비료의 병행 사용이 토양 화학성 질의 증가에 크게 영향을 주므로, 농경지 관리에서 중요하게 다루어져야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of National Institute of Agricultural Sciences (NAS) research and development project (project number: PJ013522012019).

References

- Andrews, S.S., C.B. Flora, J.P. Mitchell, and D.L. Karlen. 2003. Farmers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*. 114:187-213.
- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and C.A. Cambardella. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1945-1962.
- Arshad, M.A. and G.M. Coen. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*. 7:12-16.
- Arshad, M.A. and S. Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 88:153-160.
- Doran, J.W. and A.J. Jones. 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No 49. SSSA, Madison, WI.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*, SSSA Special Publication, 35. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, pp. 3-21.
- Jung, Y.S. and J. J. Kim, 2002. Development of environmentally sound soil management technology for alpine farmland, Suwon, Korea. RDA.
- Karlen, D.L. and D.E. Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W., et al. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication No. 35. SSSA, Madison, WI, pp. 53-72.

- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Karlen, D.L., N.C. Wollenhaft, D.C. Erbach, E.C. Berry, J.B. Swan, N.S. Eash, and J.L. Jordahl. 1994. Crop residue effects on soil quality following 10 years of no-till corn. *Soil Tillage Res.* 31:149-167.
- Karlen, D.L., S.S. Andrews, and J.W. Doran. 2001. Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy.* 74:1-40.
- Kim, M.S., S.C. Kim, S.G. Yun, S.J. Park, and C.H. Lee. 2017. Changes in available phosphate by application of phosphorus fertilizer in long-term fertilization experiment for paddy soil. *Korean J. Environ Agric.* 36(3):141-146.
- Kim, M.S., W.I. Kim, J.S. Lee, G.J. Lee, G.L. Jo, M.S. Ahn, S.C. Choi, H.J. Kim, Y.S. Kim, M.T. Choi, Y.H., Moon, B.K. Ahn, H.W. Kim, Y.J. Seo, Y.H. Lee, J.J. Hwang, Y.H. Kim, and S.K. Ha. 2010. Long-term Monitoring Study of Soil Chemical Contents and Quality in Paddy Fields, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):930-936.
- NAAS (National Academy of Agricultural Science). 2010. Fertilizer Recommendation for crops (revision). National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2003. Soil fertility management for environment-friendly agriculture, RDA, Suwon, Korea.
- Wander, M.M. and L.E. Drinkwater. 2000. Fostering soil stewardship through soil quality assessment. *Applied Soil Ecology.* 15:61-73.
- Yoon, J.H., B.G. Jung, H.J. Jun, and H.K. Kwak. 2004. Soil quality assessment method of paddy and upland, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(6):357-364.