Feasibility of Adapting Soil Quality Assessment Model for Estimation of Rice Productivity in Paddy Field

Youngkyu Hong¹, Jinwook Kim¹, Hyucksoo Kim², Junghwan Yoon³, Sangphil Lee³, Jae E. Yang², Sangho Jeon⁴, and Sungchul Kim^{5*}

¹Ph.D Candidate, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Professor, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Researcher, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

⁴Researcher, National Academy of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Korea

⁵Professor, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: skim@cnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: December 29, 2021

Revised: January 4, 2022

Accepted: January 6, 2022

Edited by

Seong-Soo Kang,
National Institute of Agricultural
Sciences, RDA, Korea

ORCID

Sungchul Kim
<https://orcid.org/0000-0002-2521-6516>

Soil security has been awarded in national wide because of food security. In order to evaluate soil security, soil quality needs to be assessed utilizing various soil properties. The main purpose of this research was to develop a protocol for soil quality assessment in paddy field and to evaluate correlation between soil quality and rice production in paddy field. Principle component analysis (PCA) was used to select minimum data set (MDS) and soil pH, cation exchange capacity (CEC), soil organic matter (SOM), and available phosphorus (Av. P₂O₅) was chosen as MDS. Based on database of soil properties, optimized soil quality model was determined. Average soil quality index in paddy field at the period of 1999 - 2015 was 0.35 - 0.50 and soil pH and SOM were high in soil quality index while CEC and Av. P₂O₅ were low. Correlation analysis showed a high correlation between soil quality index and rice production indicating that developed soil quality assessment tool in this study is suitable for predicting crop productivity. Overall, soil security can be obtained by conserving soil quality and soil properties in agricultural field.

Keywords: Correlation, Rice production, Soil properties, Soil quality, Soil security

Correlation analysis between soil quality index and rice production in paddy field.

Introduction

최근 토양 안보 (soil security)의 개념이 식량 안보 (food security)와 더불어 전 세계적으로 많은 관심이 있다 (Bennett et al., 2019). 토양 안보란 토양이 가지고 있는 다양한 기능을 훼손하지 않고 지속적으로 토양의 기능을 수행할 수 있도록 토양을 보존하는 것이다 (Haefele et al., 2014). 이와 같이 토양의 기능을 보전하고 토양 안보를 지키기 위해서는 토양의 특성에 대한 지속적인 모니터링을 통해 토양의 오염도 및 훼손 여부를 평가하여야 한다.

토양 안보를 평가하고 관리하는 방법으로 토양질 (soil quality) 평가 방법이 널리 사용되고 있다 (Drobnik et al., 2018). 토양질 평가 방법은 토양의 다양한 특성을 이용하여 토양의 원래 기능인 작물생산, 수자원 함양, 탄소 저장, 홍수 조절 등이 제대로 이루어지는지 평가하는 방법이다 (Barrios et al., 2006; Bastida et al., 2008). 특히 농경지 토양의 경우 토양질과 작물 생산성의 상관성은 매우 중요한 요소이다.

토양의 특성과 작물 생산성의 상관 관계를 평가하기 위하여 다양한 토양 특성 항목을 선택할 수 있다. 하지만 다양한 토양 특성을 모두 이용하기 위해서는 많은 비용과 인력이 소요되며 특히 과거의 토양 특성에 대한 데이터베이스의 구축이 미비하다는 문제점이 발생한다 (Idowu et al., 2008). 이를 보완하기 위해 최소 단위군 선정 기법을 이용하여 평가하고자 하는 토양 기능을 평가할 수 있다. 선행 연구의 경우 작물의 생산성을 평가하기 위해 다양한 토양 특성 중 최소 단위군인 토양 pH, 전기전도도 (EC), 유기물함량, 치환성 양이온 등과 같은 토양의 화학적 특성을 선별하여 작물의 생산성을 평가한 결과 높은 상관 관계를 도출하였다 (Vasu et al., 2016).

본 연구에서는 국내 농경지 중 논토양의 토양질과 미곡 생산량의 상관 관계를 평가하기 위해 논토양의 토양 특성을 활용한 토양질 평가 시스템을 구축하였으며 개발된 시스템을 활용하여 미곡 생산량과의 상관 관계를 평가하였다.

Materials and Methods

기초 자료 및 통계 자료 토양질을 평가하기 위한 기초 토양 자료는 국립농업과학원에서 수행한 “농업변동조사사업”의 토양 분석 자료를 이용하였다. 국내 농경지를 대상으로 약 35,000 시료의 토양 분석 자료를 이용하였으며 이 중 논토양에 대한 토양질 평가를 위해서는 1999년부터 2015년까지 4년 주기로 조사 사업이 이루어진 논토양의 분석 자료를 이용하였다.

바이오매스 생산량인 미곡 생산량은 농림통계연보를 이용하여 1999 - 2015년 중 논토양의 조사가 이루어진 4년 주기의 생산량을 이용하였다. 각 도별 미곡 생산량을 기준으로 연도별 전국 평균 미곡 생산량을 산출하였으며 토양질 모델을 통해 산출된 논토양의 연도별 토양질 평가 결과와 미곡 생산량의 상관 관계를 도출하였다.

토양질 평가를 위한 최소 단위군 선정 토양의 물리, 화학, 생물학적 특성 중 토양질을 평가하기 위한 최소 단위군 (minimum data set, MDS)을 선별하기 위해 통계 분석 방법인 주요인 분석법 (principle component analysis, PCA)을 사용하였다. Bünemann et al. (2018)이 제시한 토양의 물리, 화학, 생물학적 특성 중 농업변동조사사업에서 측정한 토양의 화학적 분석 항목만을 이용하여 최소단위군을 선정하였다 (Bünemann et al., 2018). 최소 단위군 선정을 위한 기준은 eigen value > 1, cumulative % > 70, 그리고 eigen vector > 0.5인 항목을 최소 단위군으로 선정하였다.

토양질 평가 모델 개발 각 토양 인자별 토양질 평가 모델을 개발하기 위해 Glover et al. (2000)의 선행연구를 참조하였다 (Glover et al., 2000). 토양 인자에 따라 more is better, optimum, less is better로 구분하였으며 각 인자에 대한 매개변수값은 실측값을 이용하여 산출하였다. 실측값에 따른 최적의 모델값을 산출하기 위해 curve expert 프로그램 (version 2.7.3, Hyams development)을 사용하였다.

Results and Discussion

농경지 토양의 화학적 특성 및 미곡 생산량 국내 농경지 토양 중 논토양의 연도별 토양 특성은 Table 1에 정리하였다. 각 토양 인자별 연도에 따른 평균값의 범위는 각각 다음과 같다; 토양 pH (5.72 - 5.93), EC (0.29 - 0.45 dS m⁻¹), SOM (22.15 - 28.21 mg kg⁻¹), CEC (4.01 - 10.13 cmol kg⁻¹), 그리고 유효인산 (129.91 - 139.53 mg kg⁻¹). 국내 논토양의 적정범위 (토양 pH: 6.0 - 6.5, EC: <2.0 dS m⁻¹, SOM: 25.0 - 30.0 mg kg⁻¹, CEC: 10.0 - 15.0 cmol kg⁻¹, 유효인산: 80.0 - 120.0 mg kg⁻¹)와 비교하였을 경우 토양 pH와 CEC의 경우 적정 범위보다 낮았으며 유효인산의 경우 적정 범위에 비해 높은 것으로 조사되었다. 연도에 따른 토양 특성별 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으며 유기물 함량의 경우 연도에 따라 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 선행연구와 비교하였을 경우 본 연구에서 평가한 논토양의 토양 특성값 모두 국내 논토양의 토양 특성 범위에 포함되는 것으로 조사되었다 (Kim et al., 2017; Hong et al., 2021).

Table 1. Soil chemical properties in paddy field (1999 - 2015).

		1999	2003	2007	2011	2015
pH	Max	8.90	8.40	8.20	8.40	8.40
	Mean	5.72	5.78	5.80	5.93	5.86
	Min	4.20	4.10	4.20	4.10	4.30
EC (dS m ⁻¹)	Max	N.A. [†]	N.A	6.93	7.69	9.47
	Mean	N.A	N.A	0.29	0.52	0.45
	Min	N.A	N.A	0.06	0.06	0.01
SOM (mg kg ⁻¹)	Max	75.00	154.85	179.60	178.80	220.31
	Mean	22.15	23.67	25.00	27.19	28.21
	Min	0.49	1.00	1.20	3.31	2.48
CEC (cmol kg ⁻¹)	Max	N.A	29.44	42.10	35.94	37.30
	Mean	N.A	8.32	9.52	10.13	4.01
	Min	N.A	2.95	2.60	3.37	1.20
Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Max	1,218.00	1,123.00	1,450.00	1,338.00	1,577.10
	Mean	136.58	139.53	131.30	129.91	138.20
	Min	1.00	1.00	1.00	2.11	3.63

[†]N.A denotes not available (no data was measured).

각 연도별 미곡 생산량은 Table 2에 정리하였다. 전국 미곡 생산량은 1999년에 비해 2015년에 약 8.7%정도 증가하였으며 시도별로는 전북 지역의 미곡 생산량이 575 kg 10a⁻¹로 가장 높았다.

Table 2. Rice production in each province from 1999 - 2015 (unit: kg 10a⁻¹).

	1999	2003	2007	2011	2015
Total	495	441	466	496	542
Seoul	428	451	439	442	513
Busan	483	366	472	474	529
Daegu	439	362	445	487	525
Incheon	490	484	456	414	500
Kwangju	451	423	448	467	509
Daejeon	502	430	465	494	512
Wulsan	471	372	435	472	502
Gyeonggi	502	449	464	442	513
Kangwon	469	429	448	476	538
Chungbuk	518	443	460	492	541
Chungnam	555	479	501	527	566
Chunbuk	530	453	483	524	575
Chunnam	472	442	428	477	511
Kyungbuk	477	412	475	516	563
Kyungnam	447	402	460	493	527
Jeju	418	388	382	415	465

최소 단위군 선정 작물의 생산량을 평가하기 위한 토양 분석 항목 중 토양 화학성의 최소 단위군은 토양 pH, 유기물 함량, 유효 인산, 그리고 양이온치환용량(CEC)으로 선별되었다(Table 3). 최소 단위군 선정 기준인 eigen value > 1, cumulative % > 70, 그리고 eigen vector > 0.5을 적용하였을 경우 요인 3 (factor 3)까지의 eigen value값이 1.23, cumulative %가 84%로 분석되었으며 주요인 3에 포함된 항목 중 eigen vector 값이 0.5 이상인 항목은 요인 1 (유기물 함량), 요인 2 (토양 pH), 그리고 요인 3 (유효인산, 양이온치환용량)으로 각각 선별되었다.

Table 3. Result of principle component analysis for selecting minimum data set.

Index	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Eigenvalue (%)	3.62	1.87	1.23
Proportion (%)	0.452	0.234	0.154
Cumulative (%)	0.452	0.686	0.840
pH	-0.343	0.828	-0.003
SOM	0.947	0.131	0.094
Av. P ₂ O ₅	-0.505	-0.291	0.536
CEC	-0.802	0.076	0.538

작물의 생산성을 평가하기 위한 최소 단위군 선정은 토양의 물리, 화학적 특성을 주로 이용한다. Vasu et al. (2016)의 연구에 의하면 총 15개의 토양 화학성 특성 중 pH, EC, 유기물 함량, CEC가 작물의 생산성을 평가할 수 있는 주요 토양 특성 인자임을 보고하였으며 Bünemann et al. (2018)의 연구에 따르면 평균적인 최소 단위군 수는 약 6 - 8개를

선택하지만 가급적 연도별 편차가 크지 않는 변수를 선택하는 것이 좋다는 내용을 보고하였다 (Vasu et al., 2016; Bünemann et al., 2018). 본 연구에서 선택한 4개의 토양 특성 인자는 연도별 편차가 크지 않았으며 특히 토양의 화학적 특성을 분석하는 가장 기본적인 인자로서 작물의 생산성을 평가할 수 있는 기본 인자로 충분할 것으로 판단되었다.

토양질 평가 농업변동조사사업 (1999 - 2015)의 토양 특성을 바탕으로 최적의 토양질 평가 모델은 선행 연구를 참조하였다 (Glover et al., 2000; Kim et al., 2017). 각각의 토양 인자를 정규 분포화된 지수값인 0.0 - 1.0으로 변환하였으며 변환된 지수값을 이용하여 최적의 모델식을 도출하였다 (Kim et al., 2017). 각 토양 인자별 최적의 모델식과 매개변수값은 Table 4에 정리하였다. 토양 특성에 따라 토양 pH, 유효 인산의 경우 optimum is better, 그리고 유기물 함량과 CEC의 경우 more is better로 분류하여 평가하였다.

Table 4. Optimized model equation and parameter values for soil properties.

Soil properties	Model equation	Parameter values
pH	Sinusoidal fit model $a + b \cos(cX + d)$	a = 0.40
		b = 0.50
		c = 2.12
		d = -6.29
Soil organic matter (mg kg ⁻¹)	Weibull model $y = a - be^{-cx^a}$	a = 1.017
		b = 0.937
		c = 0.167
		d = 1.552
CEC (cmol kg ⁻¹)	Weibull model $y = a - be^{-cx^a}$	a = 1.01
		b = 0.93
		c = 0.04
		d = 1.64
Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Rational model $y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2}$	a = -0.077
		b = 0.015
		c = -0.015
		d = 0.0002

모델식을 이용하여 연도별 토양질 평가를 한 결과는 Table 5에 정리하였다. 연도별 토양 특성에 따른 토양질 평가의 평균값은 2015년에 0.50로 가장 높았으며 1999년 0.35로 가장 낮았다. 연도별 토양인자의 토양질 지수는 2015년의 경우 토양 pH가 0.75로 가장 높았으며 CEC의 지수값이 0.20으로 가장 낮았다. 2015년 경우 논토양의 평균 CEC 값이 4.01 cmol kg⁻¹로 논토양의 CEC 적정 범위인 10 - 15 cmol kg⁻¹에 비해 매우 낮은 수준으로 조사되었다. 또한 유효인산의 토양질 지수값 역시 0.39로 다른 토양 인자에 비해 지수값이 낮았다. 2015년 유효인산의 논토양 평균 값이 138.20 mg kg⁻¹로 논토양 유효인산 적정 범위인 80 - 120 mg kg⁻¹값을 초과하여 토양질 지수값이 낮게 계산되었다. 연도별 전국 논토양의 토양 지수값을 분석한 결과 CEC와 유효인산의 토양질 지수값이 낮은 것으로 조사되었다. 최근 인천 지역의 논토양에 대한 토양 특성을 보면 유효인산의 경우 2015 - 2019년 기준으로 부족 비율이 높게 유지되고 있으며 치환성 양이온의 경우 약 96%가 과다로 책정되었다는 연구 결과가 보고되었다 (Heo, 2021). 인천의 경우 본 연구

결과와는 상반된 토양 특성이 나타났으며 토양 특성의 경우 지역별 편차가 클 수 있어 토양질 평가를 위해서는 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단되었다.

Table 5. Soil quality value of soil variables in 1999 - 2015.

Soil variables	1999	2003	2007	2011	2015
pH	0.64	0.66	0.68	0.67	0.75
SOM	0.48	0.50	0.51	0.55	0.66
CEC	N.A	0.11	0.12	0.12	0.20
Av. P ₂ O ₅	0.28	0.28	0.29	0.29	0.39
Average	0.35	0.39	0.40	0.41	0.50

[†]N.A denotes not available due to no measurement data in paddy field.

연도별 토양질 평균값과 전국 미곡 생산량의 상관 관계는 Fig. 1에 나타내었다. 전국 미곡 생산량과 토양질 지수값의 상관관계 평가 결과 R^2 값이 0.86으로 토양질 지수값과 미곡 생산량의 상관 관계가 매우 높음을 알 수 있었다. 선행 연구의 경우 주요인 분석을 통해 선별된 토양 인자와 작물의 생산성의 상관 관계가 매우 높다는 보고가 있었으며 가중치를 고려하여 토양질을 평가할 경우 더욱 높은 상관 관계를 산출할 수 있다는 결론을 도출하였다. 따라서 향후 연구에서는 토양 인자에 따른 가중치 산정 방법을 적용하여 토양질 평가 지수를 활용한 작물의 생산성 평가 방법이 필요할 것으로 사료되었다.

Fig. 1. Correlation analysis between soil quality index and rice production in paddy field.

Conclusions

본 연구에서는 논토양의 토양 인자를 활용하여 토양질 평가를 실시한 후 토양질 지수와 작물 생산성의 상관 관계를 평가하였다. 다양한 토양 인자 중 작물의 생산성을 평가할 수 있는 최소 단위군 선정을 위해 주요인 분석을 이용하였

으며 총 4개의 토양인자 (토양 pH, CEC, SOM, 유효인산)를 선별하였다. 선별된 토양 인자에 대해 최적의 모델을 산출하였으며 토양질 평가 지수를 0 - 1로 평가하였다. 토양질 지수와 작물의 상관 관계를 평가한 결과 R^2 값이 0.86으로 높은 상관 관계를 얻었으며 향후 본 연구에서 개발한 토양질 지수 산출 프로토콜을 이용하여 작물의 생산성을 평가할 수 있는 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This study was supported financially by a grant from the research project (PJ014141) of National Institute of Agricultural Sciences, Republic of Korea.

References

- Barrios, E., R.J. Delve, M. Bekunda, J. Mowo, J. Agunda, J. Ramisch, M.T. Trejo, and R.J. Thomas. 2006. Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma* 135:248-259.
- Bastida, F., A. Zsolnay, T. Hernández, and C. García. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma* 147:159-171.
- Bennett, J.M., A. McBratney, D. Field, D. Kidd, U. Stockmann, C. Liddicoat, and S. Grover. 2019. Soil security for Australia. *Sustainability* 11:3416.
- Bünemann, E.K., G. Bongiorno, Z. Bai, R.E. Creamer, G. De Deyn, R. de Goede, L. Fleskens, V. Geissen, T.W. Kuyper, P. Mäder, M. Pulleman, W. Sukkel, J.W. van Groenigen, and L. Brussaard. 2018. Soil quality - A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120:105-125.
- Drobnik, T., L. Greiner, A. Keller, and A. Grêt-Regamey. 2018. Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services. *Ecol. Indic.* 94:151-169.
- Glover, J.D., J.P. Reganold, and P.K. Andrews. 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric., Ecosyst. Environ.* 80:29-45.
- Haefele, S.M., A. Nelson, and R.J. Hijmans. 2014. Soil quality and constraints in global rice production. *Geoderma* 235-236:250-259.
- 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.* 54:204-212.
- Hong, Y.K., J.W. Kim, H.S. Kim, Y.H. Park, and S.C. Kim. 2021. Comparing soil chemical and biological properties in varied landuse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 54:20-32.
- Idowu, O.J., H.M. van Es, G.S. Abawi, D.W. Wolfe, J.I. Ball, B.K. Gugino, B.N. Moebius, R.R. Schindelbeck, and A.V. Bilgili. 2008. Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. *Plant Soil* 307:243-253.
- Kim, S.-C., Y.K. Hong, S.P. Lee, S.M. Oh, K.J. Lim, and J.E. Yang. 2017. Calculating soil quality index for biomass production based on soil chemical properties. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50:56-64.
- Vasu, D., S.K. Singh, S.K. Ray, V.P. Duraisami, P. Tiwary, P. Chandran, A.M. Nimkar, and S.G. Anantwar. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282:70-79.