

PLANT & FOREST

Statistically estimated storage potential of organic carbon by its association with clay content for Korean upland subsoil

Kyung-Hwa Han, Yong-Seon Zhang, Kang-Ho Jung, Hee-Rae Cho, Mi-Jin Seo, Yeon-Kyu Sonn*

Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: sonnyk@korea.kr

Abstract

Soil organic carbon (SOC) retention has gradually gotten attention due to the need for mitigation of increased atmospheric carbon dioxide and the simultaneous increase in crop productivity. We estimated the statistical maximum value of soil organic carbon (SOC) fixed by clay content using the Korean detailed soil map database. Clay content is a major factor determining SOC of subsoil because it influences the vertical mobility and adsorption capacity of dissolved organic matter. We selected 1,912 soil data of B and C horizons from 13 soil series, Sangju, Jigog, Jungdong, Bonryang, Anryong, Banho, Baegsan, Daegog, Yeongog, Bugog, Weongog, Gopyeong, and Bancheon, mainly distributed in Korean upland. The ranges of SOC and clay content were 0 - 40 g kg⁻¹ and 0 - 60%, respectively. Soils having more than 25% clay content had much lower SOC in subsoil than topsoil, probably due to low vertical mobility of dissolved organic carbon. The statistical analysis of SOC storage potential of upland subsoil, performed using 90%, 95%, and 99% maximum values in cumulative SOC frequency distribution in a range of clay content, revealed that these results could be applicable to soils with 1% - 25% of clay content. The 90% SOC maximum values, closest to the inflection point, at 5%, 10%, 15%, and 25% of clay contents were 7g kg⁻¹, 10 g kg⁻¹, 12 g kg⁻¹, and 13 g kg⁻¹, respectively. We expect that the statistical analysis of SOC maximum values for different clay contents could contribute to quantifying the soil carbon sink capacity of Korean upland soils.

Keywords: cumulative SOC frequency distribution, Korean detailed soil map, soil organic carbon (SOC)

Introduction

대기 중 이산화탄소량의 증가에 따른 온실효과를 비롯한 지구적 기후변화문제는 토양 중 유기탄소저장의 중요성을 높이고 있다. 토양유기탄소량은 지구탄소량의 큰 부분을 차지하며 대기과 식생의 탄소량의 약 두 배에 해당한다(IPCC, 2000). 향후 50년간 기후문제를 해결할 하나의 선택지로서 농경지관리를 통한 토양탄소저장의 증대가 꼽히고 있으며(Pacala and Socolow, 2004), 토양유기탄소의 기후변화 완화포텐셜에 대한 기여도에 대해 다양한 의견이 제시되고 있다(Smith,



 OPEN ACCESS

Citation: Han KH, Zhang YS, Jung KH, Cho HR, Seo MJ, Sonn YK. 2016. Statistically estimated storage potential of organic carbon by its association with clay content for Korean upland subsoil. Korean Journal of Agricultural Science 43:353-359.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7744/kjoas.20160037>

Editor: Taek-Keun Oh, Chungnam National University, Korea

Received: July 6, 2016

Revised: August 3, 2016

Accepted: August 16, 2016

Copyright: ©2016 Korean Journal of Agricultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2012; Sommer and Bossio, 2014; Lassaletta and Aguilera, 2015). 그러나 이러한 기여도를 예측하기 위해서는 토양의 유기탄소 저장능력에 영향을 주는 기후, 토양특성 등의 인자들에 대한 정량적 평가가 이루어져야 한다.

토양 중 유기탄소 저장은 대기 중의 이산화탄소를 오랜 기간 격리될 수 있는 pool로 이동하는 것을 말한다. 산업혁명 이후 토양으로부터 방출된 탄소의 총량은 78 ± 12 Gt으로 이의 회복은 토양의 유기탄소저장능력이 한계에 이를 때까지 지속될 것으로 전망하고 있다(Lal, 2004). 이 때 토양의 유기탄소저장능력을 1 m 깊이로 볼 때 표토뿐 아니라 심토에서 유기탄소의 저장능력도 함께 필요하다.

토양의 유기물은 석영과 같은 무기입자와 달리 식물잔재, 부식 등으로 생물물리화학적 특성이 다양한 형태로 존재하며 존재형태에 따라 분해되는 반감기가 다르다. 점토-부식 복합체 형성으로 단단하게 고정된 유기탄소는 반감기는 3000년 이상으로 미생물에 의한 분해가 물리적 또는 화학적으로 억제된 형태라 할 수 있다(Jenkinson and Rayner, 1977; Ingram and Fernandes, 2001). 유기물이 입단 내에 단단히 포획될 경우 미생물이 접근할 수 없어 분해가 물리적으로 억제될 수 있다. 특히 소입단에 결합한 유기탄소는 토양 내 머무름 시간이 길어지고 점토에 고정될 경우 더욱 오래 저장될 수 있다고 보고되고 있다(Carter, 1996; Carter, 2002). 즉, 농경을 하더라도 점토에 고정된 유기탄소는 입단 및 유기상태의 유기탄소보다 분해되는 속도가 느려 토양에 더 오래 머무를 수 있다(Hassink, 1997; Torn et al., 1997; Follett, 2001).

밭토양은 관행적으로 매년 경운을 하며, 이로 인해 초지 등의 경운하지 않는 토양에 비해 내수성 입단함량이 상대적으로 낮게 보고되고 있다(Han et al., 2007; Han et al., 2009). 이는 다른 한편으로 밭에 투여된 유기물이 쉽게 분해되어 이동 가능한 수용성 유기물로 전환되기 쉽다는 것이다. 경운토양에서 토양탄소저장의 깊이는 무경운 토양보다 깊게 나타나고 있으며(Baker et al., 2007) 이는 뿌리 땀음과 수용성 유기물질의 이동과 연관된다고 보고되고 있다(Bolan et al., 2004; Lorenz and Lal, 2005). 그러나 아직 우리나라에서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

우리나라는 농업기술연구소 주관 하에 1964년에서 1979년까지 농경지에 대해 정밀토양조사를 수행하여 1:25,000 정밀토양도를 작성하였다(Institute of Agricultural Science, 1964-1979). 이 정밀토양도는 총 123개 도엽으로 구성되며 각 도엽마다 그 도엽에 포함된 토양통의 시료를 채취하여 물리화학적 특성을 분석한 후 그 자료를 명시하고 있다. 본 연구에서는 이 정밀토양도 도엽에 제시된 토양통의 물리화학적 특성을 활용하여 밭 심토의 점토함량별 유기탄소 저장가능량을 통계적으로 추정하였다.

Material and Methods

본 연구에 사용한 자료는 정밀토양도의 도엽별 토양통의 물리화학적 특성 중 유기탄소함량과 토양입자분포자료이다(Institute of Agricultural Science, 1964 - 1979). NIAST(1992)에 제시된 토양통별 분포면적과 토성속별 분포비율을 기준으로 상주, 안릉, 지곡, 중동, 연곡, 대곡, 고평, 본량, 반천, 반호, 월곡, 부곡 등 13개를 선정하였다. 이때 화산회토는 제외하였다. 선정된 토양통의 B, C 층위의 총 점수는 1912점이었다(Table 1). 선정된 토양통은 밭 전체면적의 36%를 차지하였으며 주 토성속은 사양질과 식양질이었다.

토양 점토함량 1% 단위로 토양유기탄소함량의 누적도수분포도를 작성한 후 통계적 최대값을 99%, 95%, 90%의 3수준으로 도출하였다. 도출된 통계적 최대값을 Y값으로 하여 점토함량(X)에 대한 회귀식을 2차식으로 작성하였다. 이때 점토함량의 범위를 점토함량의 증가에 따라 유기탄소함량이 증가하는 경향이 나타나는 1 - 25%로 제한하였다. 통계분석은 Excel 프로그램(Microsoft, 2010)을 활용하였다.

Table 1. Soil data of Korean detailed map used for statistical SOC maximum value analysis in upland.

Textural family	Soil series	Classification of Soil Taxonomy	Area × 10 ³ ha	Horizon used	No. of Soil data
Coarse loamy	Sangju	Coarse loamy, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts	72 (8%) ^z	B, C	223
	Jigog	Coarse loamy, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts	52 (6%)	B, C	221
	Jungdong	Coarse loamy, mixed, mesic family of Fluventic Dystrudepts	23 (3%)	B, C	205
	Bonryang	Coarse loamy, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts	2 (0.2%)	C	23
Fine loamy	Anryong	Fine loamy, mesic family of Typic Hapludults	52 (6%)	B, C	237
	Banho	Fine loamy, mixed, mesic family of Typic Hapludalfs	28 (3%)	B, C	64
	Baegsan	Fine loamy, mixed, mesic family of Ultic Hapludalfs	24 (3%)	B, C	181
	Daegog	Fine loamy, mixed, mesic family of Typic Dystrudepts	12 (1%)	B, C	162
Fine silty	Yeongog	Fine silty, mixed, mesic family of Typic Fragiudults	21 (2%)	B, C	197
	Bugog	Fine silty, mixed, mesic family of Typic Fragiudults	5 (1%)	B, C	92
Fine	Weongog	Fine, mixed, mesic family of Typic Paleudults	16 (2%)	B, C	81
	Gopyeong	Fine, mixed, mesic family of Typic Paleudults	8 (1%)	B, C	160
	Bancheon	Fine, mixed, mesic family of Typic Paleudults	4 (0.5%)	B, C	66
Total			319 (36%)		1912

^zThe percentage of area to total upland area referred from NIAST (1992)

Results and Discussion

우리나라 정밀토양도 도엽별 토양자료에서 추출한 13개 토양통 B, C 층위의 유기탄소함량은 0 - 40 g kg⁻¹, 점토함량은 0 - 60%의 범위를 나타내었다 (Fig. 1, Fig. 2). 평균 토성은 양토로 우리나라 밭토양 최대 분포 토성과 일치하였다 (Fig. 1). 이는 보통밭 심토의 평균 토성에 해당한다 (Rim et al., 1997). Fig. 2에서 점토함량에 따라 토양유기탄소함량의 최대값이 증가하는 경향을 보이다가 점토함량 25% 이상에서는 그러한 경향이 나타나지 않았다. 이는 점토함량이 높은 토양통인 고평통 등의 B, C층 유기물함량이 상대적으로 낮게 분포하기 때문에 사료된다. 토양유기탄소함량을 총 1912점에 대해 누적도수분포도로 나타내었을 때 유기탄소함량 15 g kg⁻¹에서 변곡한 후 기울기가 급격히 작아져 거의 일정한 값을 나타내었다 (Fig. 3). 누적도수분포도에서 99%, 95%, 90%의 3수준의 통계적 최대값 중 변곡점보다 낮게 위치한 90%수준이 변곡점과 가장 가까웠으며, 95%, 99% 순으로 나타났다.

Fig. 4는 점토함량 1% 단위로 누적도수분포도를 작성하여 통계적 유기탄소함량의 최대값을 구하고 이를 2차 회귀식으로 도출하여 점토함량에 따른 유기탄소의 최대값을 산출한 그림이다. 점토함량 1% - 25% 범위에서 2차 회귀

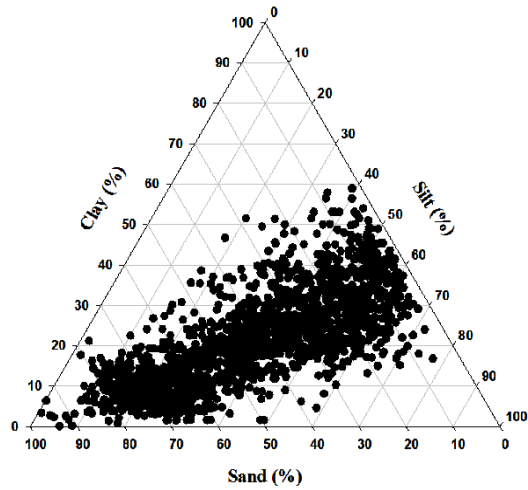


Fig. 1. Textural distribution of upland soil database of Korean detailed soil map.

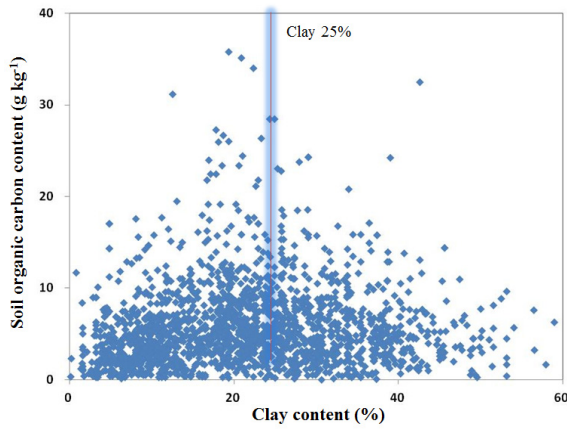


Fig. 2. Soil organic carbon content distribution with different clay contents.

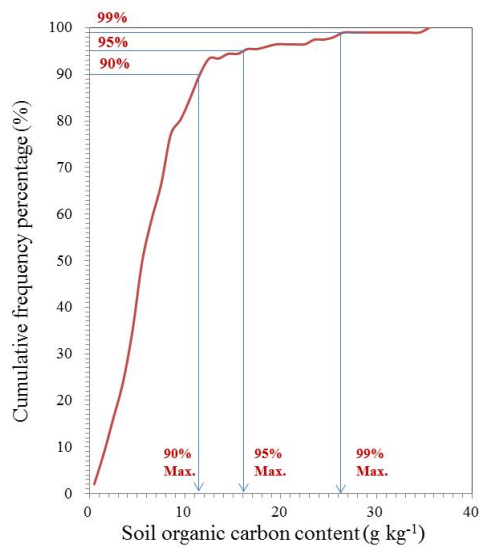


Fig. 3. Statistical estimation method of SOC maximum value from cumulative frequency curve in each range of clay content.

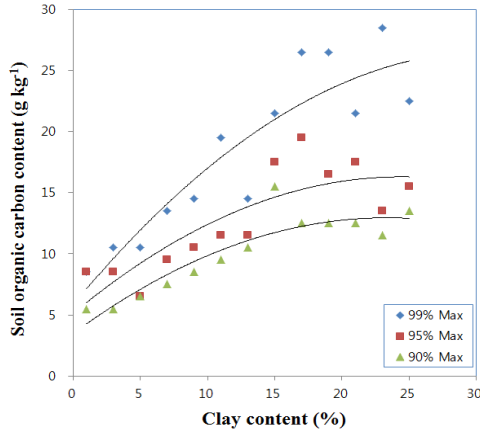


Fig. 4. Statistical SOC maximum value from cumulative frequency curve for each clay content.

은 Table 2와 같다. 이 회귀식에 따르면, 90% 수준 통계적 최대값은 점토함량 5%, 15%, 25%에서 각각 7 g kg⁻¹, 12 g kg⁻¹, 13g kg⁻¹을 나타내었다. 95% 수준은 90%수준보다 2 - 3 g kg⁻¹으로 높게 나타났으며 99%수준은 90%수준보다 3 - 13 g kg⁻¹로 높게 나타났으며 특히 점토함량이 높아짐에 따라 더 높게 나타나는 경향을 보였다(Table 3). 보통밭과 사질밭 심토의 평균 점토함량 20%에서 통계적 유기탄소 최대 저장 가능량은 13 - 24 g kg⁻¹로 추정할 수 있었다. 본 연구 결과는 점토함량 1 - 25%의 범위에 적용가능하며 이는 사양질과 식양질, 사질, 미사식양질 등의 토성속에 속한다.

Hassink (1997)은 초지토양에 대해 20 μm 이하 점토 + 실트입자에 의한 유기탄소 저장능을 추정하였다. 유기탄소량은 20 μm 이하 입자량이 증가함에 따라 증가하였으며 저장가능한 용량을 수식으로 나타내어 표현하였다. Zhao et al. (2006)은 경운과 작물잔재제거 등이 이루어지고 있는 밭토양에 대해 Hassink (1997)의 탄소저장 모형을 중국의 토양에 대해 적용해보았다. 20 μm 이하 입자의 유기탄소저장은 Hassink (1997)의 저장용량의 40 - 120%를 나타내었다. 20 μm 이하 입자함량 대 유기탄소량의 기울기가 Zhao et al. (2006)에서 Hassink (1997) 모형보다 낮게 나타났다. 이는 기후 및 토양특성의 차이에 의한 것으로 보고되고 있다. Zhao et al. (2006)는 점토함량(<0.002 mm 이하)과 유기탄소량에 대해서 살펴보았는데 본 연구결과의 90%수준 통계적 최대값과 유사하게 점토함량 10 - 25%에서 유기탄소함량 6 - 14 g kg⁻¹을 나타내었다.

Table 2. The quadratic regression equations of statistical SOC maximum value with clay content in upland subsoils in Fig 4.

Statistical SOC maximum value	Quadratic regression equation	R ²	Applicable range of clay content
99% Max SOC	-0.0214 * (clay) ² + 1.3327 * clay + 5.826	0.83	1 - 25%
95% Max SOC	-0.0187 * (clay) ² + 0.9156 * clay + 5.119	0.71	1 - 25%
90% Max SOC	-0.0174 * (clay) ² + 0.8112 * clay + 3.475	0.83	1 - 25%

Table 3. Statistic SOC maximum value with clay content in upland subsoils using the quadratic regression equations from Korean detailed soil map data.

Clay content (%)	Statistical maximum value of SOC (g kg ⁻¹)		
	99%	95%	90%
5	12	9	7
10	17	12	10
15	21	15	12
20	24	16	13
25	26	16	13

농경지 심토는 작물잔재, 퇴비 등의 유기물이 직접 투입되는 작토(Ap층)에 비해 유리 유기물 및 입단결합 유기물은 작으나 분자상태의 유기화합물이 물과 함께 용탈되다가 점토입자에 결합할 수 있다(Bolan et al., 2004). 따라서 심토의 유기물은 투수성과 점토 등에 의한 유기물 흡착 고정력과 크게 연관된다고 파악된다. Rim et al. (1997)에서 토양단면의 물리적 특성에서 뚜렷한 발작물 생육저해인자가 발견되지 않아 보통 밭으로 유형이 분류되는 45개 토양통에 대해 지형별 토양특성자료를 분석한 결과 하천변의 B층 유기탄소함량이 A층보다 약간 높게 나타났다. 이는 점토함량이 상대적으로 낮으며 하천변에 위치하여 물에 의한 수직용탈이 용이하기 때문으로 파악된다. 밭유형 중 점토함량이 높아 중점밭으로 분류되는 토양의 B층의 평균 점토함량은 보통밭과 모래함량이 높아 사질밭으로 분류되는 토양의 약 1.5배에 해당하나 유기탄소함량은 더 낮게 나타났다(Rim et al., 1997). 이는 본 연구에서 점토함량 25% 이상에서 유기탄소함량의 통계적 최대치가 감소한 것과 같은 경향이다.

작물의 뿌리가 심토에 많이 분포할 경우, 유기탄소함량에 기여할 수 있다. Lorenz and Lal (2005)은 심토에서 탄소 격리가 셀룰로오스, 리그닌 등의 화학적 분해저항성 화합물 함량이 높은 뿌리에 의해 증가될 수 있음을 보고하였다. 그러나 엽채류 등의 발작물 뿌리는 목본식물의 뿌리보다 더 빠르게 분해될 수 있다(Lorenz and Lal, 2005). 따라서 관행경운을 하는 밭에서의 뿌리에 의한 심토 유기탄소함량에 대한 기여도는 삼림, 초지 등에 비해 낮을 것으로 추정할 수 있었다.

Conclusion

우리나라 정밀토양도 도엽별 토양자료를 이용하여 점토함량에 따른 유기탄소 저장가능량을 통계적으로 추정하였다. 유기탄소함량의 누적도수분포도에서 90%수준 최대값이 변곡점에 가장 가까웠으며 점토함량 5%, 15%, 25%에서 각각 7 g kg^{-1} , 12 g kg^{-1} , 13 g kg^{-1} 을 나타내었다. 점토함량 1 - 25% 범위에서 제시된 밭 심토의 유기탄소 저장가능량의 통계적 추정값은 우리나라 농경지 유기탄소저장능력 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgement

This study was supported financially by a grant from the research project (No. PJ010936) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Baker JM, Oschner TE, Venterea RT, Griffis TJ. 2007. Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118:1-5.
- Bolan NS, Adriano DC, de-la-Luz M. 2004. Dynamics and environmental significance of dissolved organic matter in soil in supersoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 5-published on CDROM. Accessed in <http://www.regional.org.au/au/asssi/>.
- Carter MR. 1996. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystem. In M.R. Carter and B.A. Stewart(ed.) *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. pp. 3-11. Lewis Publ., CRC Press. Boca Raton, FL.
- Carter MR. 2002. Soil quality sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94:38-47.
- Follett RF. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil & Tillage Research* 61:77-92.
- Han KH, Cho HJ, Lee HS, Oh DS, Kim LY. 2007. Stable macro-aggregate in wet sieving and soil properties. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40: 255-261.
- Han KH, Cho HJ, Lee HS, Hur SO, Ha SK. 2009. Relationship between water stable aggregate and macroporosity in upland soils

- calculated by fragmentation fractal dimension. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 48:58-64
- Hassink J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191:77-87.
- Ingram JSI, Fernandes ECM. 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 87:111-117.
- Institute of Agricultural Science. 1964-1979. Detailed soil map. Institute of Agricultural Science. Office of Rural Development, Suwon, Korea. [In Korean].
- IPCC. 2000. Land-use, land-use change, and forestry. In: Watson, R.T., I.R. Noble, B.R. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, and D.J. Dokken. (Eds.) *Land-use, Land-use Change, and Forestry. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. pp. 1-51. Cambridge University Press, UK.
- Jenkinson DS, Rayner JH. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123:298-305.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1627.
- Lassaletta L, Aguilera E. 2015. Soil carbon sequestration is a climate stabilization wedge: Comments on Sommer and Bossio (2014). *Journal of Environmental Management* 153:48-49.
- Lorenz K, Lal R. 2005. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in sub-soil horizons. *Advanced Agronomy* 88:36-66.
- Microsoft Excel. 2010. v. 14.0. Part of Microsoft Office Professional Plus 2010. Microsoft Corporation. US.
- NIAST. 1992. The general interpretation of Korean soils. National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration. Suwon, Korea. [In Korean]
- Pacala S, Socolow R. 2004. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305:968-972.
- Smith P. 2012. Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: what have we learnt in the last 20 years? *Global Change Biology* 18:35-43.
- Rim SK, Hur BK, Jung SJ, Hyeon GS. 1997. Physico-chemical properties on the management groups of upland soils in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 30:67-71. [In Korean]
- Sommer R, Bossio D. 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management* 144:83-87
- Tom MS, Trumbore SE, Chadwick OA, Vitousek PM, Hendricks DM. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature* 389:170-173.
- Zhao L, Sun Y, Zhang X, Yang X, Drury CF. 2006. Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols: Relationship to the predicted capacity. *Geoderma* 132:315-323.