19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

مقایسه روش های کریجینگ و کوکریجینگ در پهنه بندی CEC خاک

جواد سیدمحمدی[1*]، میرناصر نویدی[2]

۱-استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*نویسنده مسئول: j.mohammadi@areeo.ac.ir)

چکیده

یکی از شاخص های مهم کیفیت حاصل‌خیزی و ظرفیت توقیف آلاینده‌های خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است. تغییرپذیری ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ با متغیر کمکی مؤلفه اصلی به‌دست‌آمده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شامل رس، شن، سیلت، کربن آلی، هدایت الکتریکی، و pH، با تجزیه مولفه اصلی بررسی شد. برای این منظور، ۲۴۷ نمونه خاک به صورت ۷۵ درصد برای آموزش و ۲۵ درصد برای آزمون استفاده شد. مؤلفهٔ اصلی اول که بیشترین همبستگی مثبت و معنادار را با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک داشته (P<۰/۰۱، r=۰/۸۱)، به عنوان متغیر کمکی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی در روش کوکریجینگ استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب تبیین ارزیابی تقاطعی داده‌های آزمون برای روش کریجینگ ۰/۴۹ و برای روش کوکریجینگ ۰/۷۱ بوده، بنابراین روش کوکریجینگ ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را معتبرتر از روش کریجینگ برآورد می‌کند.

واژگان کلیدی: درون‌یابی، کریجینگ، کوکریجینگ، نیم‌تغییرنما، ظرفیت تبادل کاتیونی.

مقدمه

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شاخصی مهم در کیفیت و حاصل‌خیزی خاک و ظرفیت نگه‌داری عناصر غذایی و پتانسیل آلاینده‌ها در محیط زیست، ظرفیت حفاظت آب‌های زیرزمینی از آلاینده‌های فلزی و تثبیت فلزات سنگین و ممانعت از جذب آن‌ها به وسیلهٔ گیاه است (Keshavarzi *et al.*, 2012). در برخی مطالعات همبستگی معناداری بین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و ترکیبات آلی آلاینده، مانند اترازین و فنانترن (Chung and Alexander, 2002) و دی‌کوات و پاراکوات (Site, 2001) گزارش شده است. توزیع مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تصمیم‌گیری برای مدیریت مناسب محصولات، حاصلخیزی خاک و جلوگیری از تجمع آلاینده‌ها در خاک اهمیت خاصی دارد.

زمین‌آمار روشی مناسب برای توصیف متغیرهای مکانی با ملاحظهٔ پیچیدگی‌های آمار مکانی ارائه می‌کند. در زمین‌آمار می‌توان یک رابطه بین ارزش‌های کمّی در جامعهٔ نمونه، فواصل، و جهت مکانی نمونه‌ها در ارتباط با یک‌دیگر توسعه داد و به طور موفقیت‌آمیز برای پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک استفاده کرد (Shi *et al.*, 2009). کریجینگ و کوکریجینگ روش های زمین آماری هستند که برای پهنه بندی مورد استفاده قرار می گیرند. پژوهش‌ها نشان داده است زمانی که بین متغیر کمکی و متغیر اصلی همبستگی زیادی باشد کوکریجینگ بهتر از کریجینگ واریانس تخمین را کاهش می‌دهد (Wu *et al.*, 2009). متغیرهای کمکی در روش کوکریجینگ در پژوهش‌های انجام‌شده برای تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک عمدتاً از ویژگی‌های منفرد خاک، مانند مقدار مادهٔ آلی (Yong-dong *et al.*, 2008) و درصد رس (Asadzadeh *et al.*, 2012) و هدایت الکتریکی (Jung *et al*, 2006)، بوده است. تجزیهٔ مؤلفهٔ اصلی روشی است که داده‌های چندبعدی را با حفظ مهم‌ترین اطلاعات به تعداد مؤلفهٔ کمتر کاهش داده و با استفاده از آن می‌توان مؤلفه‌ای مناسب استخراج کرده و به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ به کار برد (Mouser *et al.*, 2005).

هدف این پژوهش مقایسهٔ روش‌های درون‌یابی کریجینگ و کوکریجینگ برای پهنه بندی و تهیهٔ نقشهٔ ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه حدود ۴۰۰۰۰ هکتار جزء نواحی مرکزی استان گیلان می باشد. تعداد ۲۴۷ نمونهٔ خاک به روش تصادفی طبقه‌بندی‌شده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت و موقعیت جغرافیایی مکان نمونه‌ها با GPS ثبت شد. اجزای ذرات خاک، کربن آلی، pH، هدایت الکتریکی، و ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب با روش‌های پیپت، اکسیداسیون، الکترود در سوسپانسیون ۱:۲ خاک به آب، و استات آمونیوم تعیین شد. برای افزایش دقت برآورد و تنظیم درست فرایند پژوهش، داده‌ها به صورت تصادفی در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از جعبه‌ابزار زمین‌آمار و دستور Create subsets به دو دستهٔ آموزش و آزمون، به ترتیب با نسبت ۷۵ و ۲۵ درصد، تقسیم شد. در صورتی که ارزیابی دقت نقشهٔ خروجی از مقایسهٔ مقادیر برآوردشده با داده‌هایی که در مرحلهٔ تعیین نیم‌تغییرنما و تهیهٔ نقشه استفاده شده انجام شود، دقت روش برآورد به‌خوبی روشن نمی‌شود (Clay, 2011). آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با نرم‌افزار SPSS تعیین شد. برای بررسی همبستگی داده‌ها روش پیرسون به کار رفت. توزیع نرمال داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف‌ـ اسمیرنوف بررسی شد. داده‌هایی که توزیع نرمال نداشتند با تبدیل‌های مناسب به توزیع نرمال تبدیل شدند.

روش های کریجینگ و کوکریجینگ برای تهیه نقشه CEC خاک مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین متغیر کمکی تحلیل تجزیه به مولفه های اصلی بین ویژگی های خاک انجام شد و مولفه اصلی با همبستگی مثبت و بالا با CEC خاک به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ به کار گرفته شد. ارزیابی دقت روش ها با استفاده از روابط ۱ و ۲ انجام شد:

$$NRMSE = \left(\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}\right)/\bar{y}_i \qquad (۱)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2}\right] \qquad (۲)$$

y_i مقدار متغیر مشاهده یا اندازه‌گیری شده، $\hat{y}_i$ مقدار متغیر برآوردشده، $\bar{y}_i$ مقدار میانگین متغیر مشاهده یا اندازه‌گیری شده، و n تعداد کل داده‌هاست.

نتایج و بحث

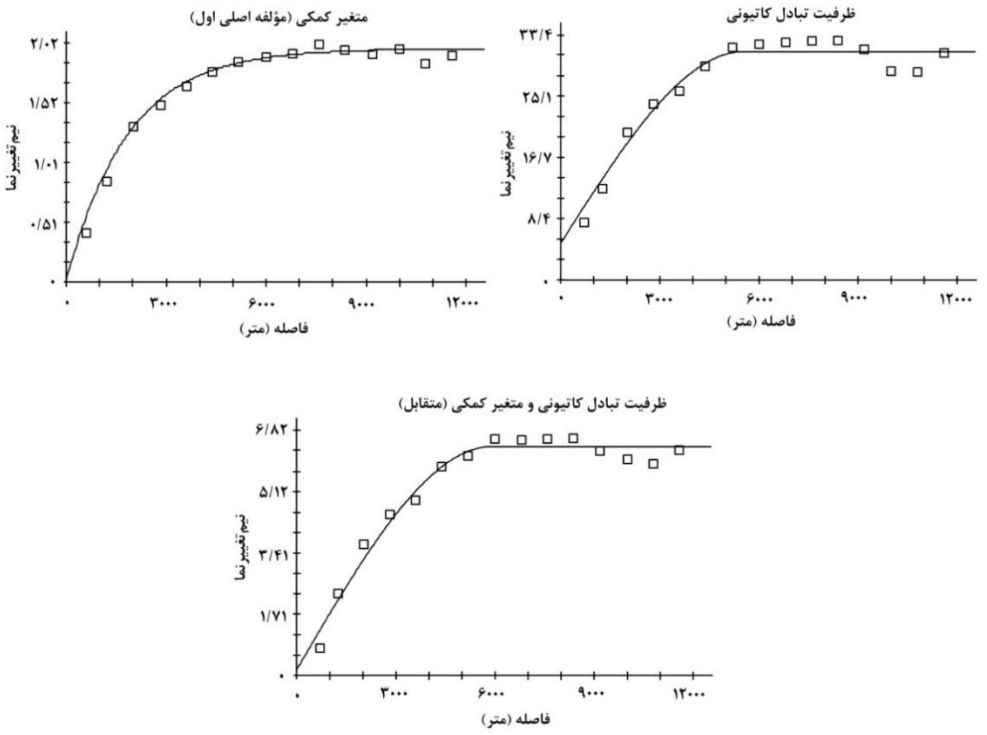
آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک استخراج و سپس مقادیر چولگی و کشیدگی ویژگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت همچنین آزمون کولموگروف- اسمیرنوف نیز اعمال گردید ویژگی های غیرنرمال با لگاریتم طبیعی نرمال شدند. تجزیه به مولفه های اصلی انجام شد دو مولفه اصلی اول و دوم دارای مقدار ویژه بزرگتر از یک بودند و بین آنها مولفه اصلی اول دارای همبستگی مثبت و بالا با CEC خاک بود.

جدول ۱- نتایج تجزیهٔ همبستگی پیرسون

	pH	هدایت الکتریکی	کربن آلی	شن	سیلت	رس	مؤلفهٔ اول	مؤلفهٔ دوم
CEC	۰٫۰۲	۰٫۱۸*	۰٫۵۸**	-۰٫۵۸**	۰٫۵۱**	۰٫۶۶**	۰٫۸۱**	-۰٫۱۹
pH	۱	-۰٫۲۵**	-۰٫۵۳**	-۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۵۲**		
EC	-۰٫۲۵**	۱	۰٫۶۰**	-۰٫۱۱	۰٫۱۹*	-۰٫۱۲		
OC	-۰٫۵۳**	۰٫۶۰**	۱	-۰٫۱۵	۰٫۱۹*	۰٫۴۸**		
شن	-۰٫۱۳	-۰٫۱۱	-۰٫۱۵	۱	-۰٫۷۶**	-۰٫۷۲**		
سیلت	۰٫۱۴	۰٫۱۹*	۰٫۱۹*	-۰٫۷۶**	۱	۰٫۳۵**		
رس	۰٫۵۲**	-۰٫۱۲	۰٫۴۸**	-۰٫۷۲**	۰٫۳۵**	۱		

**همبستگی در سطح ۱ درصد معنادار است. *همبستگی در سطح ۵ درصد معنادار است.

مدل برازش‌شده بر نیم‌تغییرنمای ظرفیت تبادل کاتیونی کروی است (شکل ۱). مدل یادشده ضریب تبیین بالایی (۹۳٪) دارد و نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه کمتر و شعاع تأثیر ۵۵۲۰ متر است (جدول ۲). با توجه به همبستگی مثبت و زیاد بین مؤلفهٔ اصلی اول و ظرفیت تبادل کاتیونی، از آن به مثابهٔ متغیر کمکی در روش کوکریجینگ برای تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک استفاده شد. مدل برازش‌شده بر نیم‌تغییرنمای مؤلفهٔ اصلی اول نمایی بود (شکل ۱). این مدل ضریب تبیین بالایی (۹۷٪) دارد و نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه کمتر و شعاع تأثیر ۵۵۵۰ متر است (جدول ۲). این مشخصات نشان می‌دهد ساختار مکانی نیم‌تغییرنما قوی است. مدل برازش‌شده بر نیم‌تغییرنمای متقابل ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و متغیر کمکی کروی است (شکل ۱). بررسی ویژگی‌های مدل فوق نشان می‌دهد مدل دارای ساختار مکانی قوی است؛ چون نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه در آن خیلی کمتر است و ضریب تبیین بالایی دارد (جدول ۲). طبق گزارش .Shi و همکاران (2007) متغیرهایی که نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه در مدل برازش‌شده بر نیم‌تغییرنمای تجربی آن‌ها کمتر از ۲۵ درصد باشد، دارای ساختار مکانی قوی‌اند. نتایج این پژوهش در هر سه مدل برازش‌شده دارای نسبت اثر قطعه‌ای به آستانهٔ کمتر از ۲۵ درصد است.



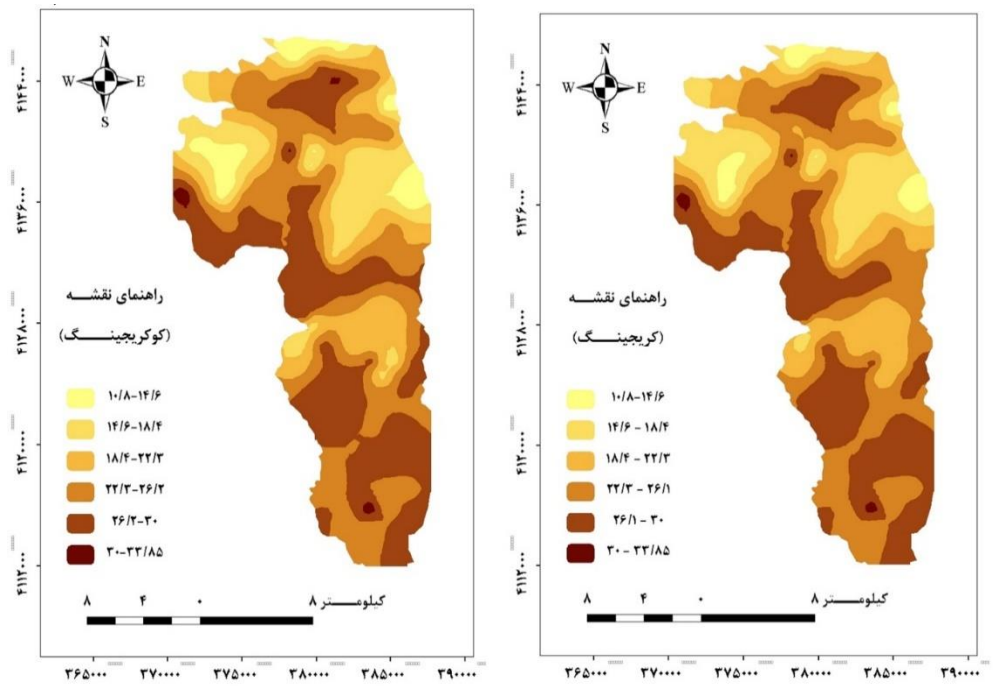
شکل ۱- نیم‌تغییرنمای تجربی و مدل برازش‌داده‌شده بر آن برای ظرفیت تبادل کاتیونی و متغیر کمکی و متقابل

جدول ۲- ویژگی‌های مدل‌های استفاده‌شده در روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ برای برآورد CEC خاک

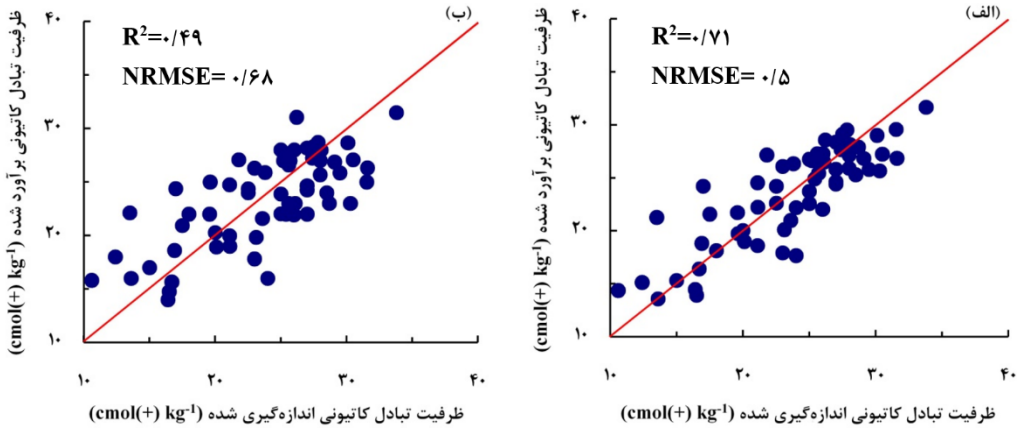
متغیر	مدل	اثر قطعه‌ای (C_o)	آستانه ($C+C_o$)	شعاع تأثیر (متر)	$C/(C+C_o)$	ضریب تبیین
CEC	کروی	۵/۰۳	۳۱/۰۸	۵۵۲۰	۰/۸۳۸	۰/۹۲۷
مؤلفهٔ اصلی اول (متغیر کمکی)	نمایی	۰/۰۰۱	۱/۹۷	۵۵۵۰	۰/۹۹۹	۰/۹۷۵
CEC و مؤلفهٔ اصلی اول (متقابل)	کروی	۰/۱۶	۶/۳۶	۵۹۱۰	۰/۹۷۵	۰/۹۴۲

پس از تعیین نیم‌تغییرنمای تجربی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و متغیر کمکی (مؤلفهٔ اصلی اول) و متقابل و برازش مدل مناسب بر آن‌ها، نقشهٔ برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از روش کریجینگ و کوکریجینگ تهیه شد که در شکل ۲ ارائه شده است. هر دو نقشه شکل‌های بسته، به فرم محدب و مقعر، دارند. این موضوع حاکی از تراکم خوب و ایده‌آل نمونه‌های خاک از سطح منطقهٔ مطالعه‌شده برای برآورد با جزئیات بیشتر است (Webster and Oliver, 2007) و نشان می‌دهد نمونه‌برداری با تعداد نمونهٔ کافی صورت گرفته است و محدوده‌ها با مقادیر متفاوت متغیر مورد نظر به‌خوبی از هم تفکیک شده است. مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در نواحی جنوب، غرب، و کمی در شمال منطقهٔ مطالعه‌شده بیشتر و در نواحی شرق و شمال کمتر بود.

با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی دقت روش کوکریجینگ در برآورد مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بر اساس سری داده‌های آزمون بیشتر از کریجینگ است (شکل ۳). متغیر کمکی مؤلفهٔ اصلی اول، که همبستگی مثبت و زیاد با ظرفیت تبادل کاتیونی دارد، باعث افزایش دقت این روش می‌شود. این نتیجه در مقایسه با نتایج .Paz-González و همکاران (2000) و .Jung و همکاران (2006)، که از مادهٔ آلی و هدایت الکتریکی به مثابهٔ متغیر کمکی استفاده کرده‌اند، دقت بیشتری دارد. همچنین، نسبت به نتایج .Asadzadeh و همکاران (2012)، که از درصد رس استفاده کرده‌اند، دقیق‌تر است.



شکل ۲- نقشهٔ ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با روش کریجینگ و کوکریجینگ



شکل ۳- ارزیابی تقاطعی برای داده‌های آزمون با روش کوکریجینگ (الف) و کریجینگ (ب)

نتیجه‌گیری

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با مؤلفهٔ اصلی اول، به‌دست‌آمده از ویژگی‌های فیزیکی و شمیایی خاک، دارای بیشترین همبستگی مثبت و معنادار در سطح ۱ درصد بود (r=۰/۸۱). بنابراین، مؤلفهٔ اصلی اول به منزلهٔ متغیر کمکی در روش کوکریجینگ برای تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک استفاده شد. بر اساس معیارهای ارزیابی میانگین ریشهٔ دوم خطا و ضریب تبیین ارزیابی تقاطعی روش کوکریجینگ نتایج دقیق‌تری از کریجینگ ارائه کرد. این پژوهش ثابت کرد استفاده از مؤلفهٔ اصلی اول به منزلهٔ متغیر کمکی در روش کوکریجینگ به صورت مؤثر باعث بهبود دقت برآورد می‌شود؛ به‌ویژه زمانی دارای اثر زیاد است که مؤلفهٔ اصلی اول (متغیر کمکی) با متغیر وابسته همبستگی مثبت و زیاد داشته باشد. بنابراین، با این روش نقشهٔ معتبری از ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تهیه می‌شود که نسبت به روش‌های سنتی صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها را به دنبال دارد و در مدیریت دقیق‌تر و مناسب‌تر خاک کاربرد خواهد داشت.

فهرست منابع

Asadzadeh, F., Akbarzadeh, A., Zolfaghari, A. A., Taghizadeh Mehrjardi, R., Mehrabanian, M., Rahimi Lake, H., and Sabeti, M. A. (2012). Study and comparison of some geostatistical methods for mapping cation exchange capacity in soils of northern Iran. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*, 1584-2665.

Chung, N. and Alexander, M. (2002). Effect of soil properties on bioavailability and extractability of phenanthrene and atrazine sequestered in soil. *Chemosphere*, 48, 109-115.

Clay, S. A. (2011). *GIS application in agriculture*. Tayler and Francis, CRC Press, 448 p.

Jung, W. K., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., and Anderson, S. H. (2006). Spatial characteristics of clay pan soil properties in an agricultural field. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1387-1397.

Keshavarzi1, A., Sarmadian, F., Rahmani, A., Ahmadi, A., Labbafi, R., and Iqbal, M. A. (2012). Fuzzy clustering analysis for modeling of soil cation exchange capacity. *Australian Journal of Agricultural Engineering*, 3(1), 27-33.

Mouser, P. J., Rizzo, D. M., Roling, W. F. M., and Van Breukelen, B. M. (2005). A multivariate statistical approach to spatial representation of groundwater contamination using hydrochemistry and microbial community profiles. *Environmental Science & Technology*, 39, 7551-7559.

Paz-González, A., Vieira, S. R., and Taboada, C. M. T. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. Geoderma, 97, 273-292.

Shi, J., Wang, H., Xu, J., Wu, J., Liu, X., Zhu, H., and Yu, C. (2007). Spatial distribution of heavy metals in soils: A case study of Changxing, China. Environmental Geology Journal, 52, 1-10.

Shi, W. J, Liu, J. Y., Du, Z. P., Song, Y. J., Chen, C. F., and Yue, T. X. (2009). Surface modelling of soil pH. *Geoderma*, 150, 113-119.

Site, A. D. (2001). Factors affecting sorption of organic compounds in natural sorbent/water systems and sorption coefficients for selected pollutants. A review. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 30, 187-439.

Webster, R. and Oliver, M. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists. 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK.

Wu, C. F., Wu, J. P., Luo, Y. M., Zhang, L. M., and DeGloria, S. D. (2009). Spatial estimation of soil total nitrogen using cokriging with predicted soil organic matter content. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 1676-1681.

Yong-dong, W., Na-na, F., Ting-xuan, L., Xi-zhou, Z., and Gui-tang, L. (2008). Spatial Variability of Soil Cation Exchange Capacity in Hilly Tea Plantation Soils under Different Sampling Scales. *Agricultural Sciences in China*, 7(1), 96-103.

Comparison of Kriging and Cokriging Methods in Soil CEC mapping

Javad Seyedmohammadi[1*] and Mir Naser Navidi[2]

[1]Research Assistant, Soil Survey and Land Evaluation Department, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran.
[2]Research Associate, Soil Survey and Land Evaluation Department, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran.

Abstract

One of the important indicators of soil fertility quality and pollutant retention capacity is the soil cation exchange capacity. The variability of soil cation exchange capacity was investigated by Kriging and Cokriging methods with the principal component auxiliary variable obtained from the physical and chemical properties of the soil, including clay, sand, silt, organic carbon, electrical conductivity, and pH, using principal component analysis. For this purpose, 247 soil samples were used as 75% for training and 25% for testing. The first principal component, which had the highest positive and significant correlation with the cation exchange capacity of the soil ($P<0.01$, $r=0.81$), was used as an auxiliary variable to estimate the cation exchange capacity in the Cokriging method. The results showed that the coefficient of determination of the cross-validation of the test data for the Kriging method was 0.49 and for the Cokriging method was 0.71, so the Cokriging method estimates the cation exchange capacity of the soil more reliably than the Kriging method.

Keywords: Interpolation, Kriging, Cokriging, Semi-variogram, CEC.