

DOI: 10.11766/trxb201606300245

# 区域土壤CEC与相关控制因子的空间非平稳关系评估\*

李锦芬<sup>1, 2</sup> 瞿明凯<sup>2†</sup> 黄标<sup>2</sup> 刘刚<sup>1</sup> 赵永存<sup>2</sup> 孙维侠<sup>2</sup> 胡文友<sup>2</sup>

(1 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

(2 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

**摘要** 土壤阳离子交换量(CEC)对土壤的保肥能力具有重要影响。了解土壤CEC的空间分布及相关控制因子的影响有助于区域土壤肥力的精准调控。以往多采用传统的最小二乘(OLS)回归模型探索相关因子对土壤CEC的影响。然而,该类模型是一种总体回归方法,不能反映局部空间区域内相关因子对土壤CEC的影响。采用一种局部空间回归技术——地理加权回归(GWR)探索表层和亚表层土壤中CEC与相关控制因子(土壤黏粒、土壤有机质和土壤pH)之间的空间非平稳关系。结果表明,各控制因子在不同的子区域和深度对土壤CEC的影响均有明显差异;同时,GWR模型有效地揭示了土壤CEC与相关土壤控制因子的空间非平稳关系。所得的空间非平稳关系图可以为更精确地调控区域土壤肥力提供依据。

**关键词** 阳离子交换量;空间非平稳性;地理加权回归;最小二乘回归;土壤保肥能力

**中图分类号** S153.3; S158.5 **文献标识码** A

土壤阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC)指土壤溶液在一定的pH时,每千克干土所吸收的全部交换性阳离子的物质的量( $\text{cmol kg}^{-1}$ ),即土壤所带负电荷的数量<sup>[1]</sup>。CEC能直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力<sup>[2]</sup>,而且对土壤中重金属的生物有效性和作物中营养元素的吸收均有一定的影响<sup>[3-5]</sup>。

了解土壤CEC与相关土壤控制因子(土壤黏粒、土壤有机质(SOM)和土壤pH)之间的关系,是对其进行定量调控的基础。国内外关于土壤CEC与其控制因子之间关系的研究有很多<sup>[6-11]</sup>,但这些研究往往采用的是基于最小二乘回归(OLS)的方法,该类回归方法是一种总体回归技术,其成立的前提假设是观测值之间彼此独立<sup>[12-13]</sup>。然而在空间上,事物普遍与周围的其他事物相互关联,而且距离越近,相关性越高<sup>[14]</sup>。区域土壤CEC和土壤中相关控制因子往往具有一定的空间相

关性,而采用传统的OLS回归方法得到的土壤CEC与相关控制因子之间的关系在整个研究区域内为一恒定值,不能反映局部区域内土壤CEC与相关控制因子之间的局部空间相关性。因此,传统的OLS回归方法在探索土壤CEC与相关土壤控制因子之间的关系方面具有一定局限性。地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)是近年来出现的一种新的局部空间回归技术,它是将数据的空间位置嵌入线性回归模型中,用以探索空间变量之间的空间非平稳关系<sup>[12-13]</sup>。这种回归与普通线性回归最明显的区别是该模型的回归系数在每个空间数据位置上均要分别被估计,而普通线性回归模型对回归系数的估计是基于整个研究区域的。

本研究的主要目的在于:(1)了解进贤县稻田表层和亚表层土壤CEC的空间分布;(2)利用GWR探索进贤县稻田表层和亚表层土壤CEC与其主要的控制因子(土壤黏粒、SOM和土壤pH)之

\* 国家科技支撑计划课题(2015BAD06B02-2)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2015BAD06B02-2)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qumingkai@issas.ac.cn

作者简介:李锦芬(1991—),女,宁夏吴忠人,硕士研究生,主要从事区域土壤环境风险评估方面的研究。E-mail: jinfenli22@163.com

收稿日期:2016-06-30;收到修改稿日期:2016-08-24;优先数字出版日期(www.cnki.net):2016-09-14

间的空间非平稳关系；(3) 给出具体的土壤CEC空间调控措施，以提高土壤保肥能力。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

本研究选定江西省南昌市进贤县为研究区域。该区域位于江西省中部偏北、鄱阳湖南岸(116°01'~116°33' E, 28°09'~28°46' N)，是我国南方高产的商品粮基地之一。进贤县属于亚热带季风湿润气候，全年气候温和，四季分明，雨量充沛，光照充足，无霜期长。该县年日照平均时长约为1 936 h，平均气温17.5℃，年均降水量1 587 mm。主要粮食作物为水稻，且以双季稻为主，其种植面积占粮食种植总面积的89%。

### 1.2 样品采集与分析

在研究区内布设103个土壤采样点(图1)。采样时间为2012年10月下旬。用GPS定位并记录样本坐标信息。在每个采样点周围100 m<sup>2</sup>的范围内，采集3~4处表层(0~20 cm)土壤，均匀混合后缩分至1 kg装袋。同时采集相应位置的亚表层(20~40 cm)土壤样品。所有的样品在室温下(20~22℃)风干、去除草根石块，磨碎，然后过2 mm尼龙筛，准备好的土壤样品用于化学分析。

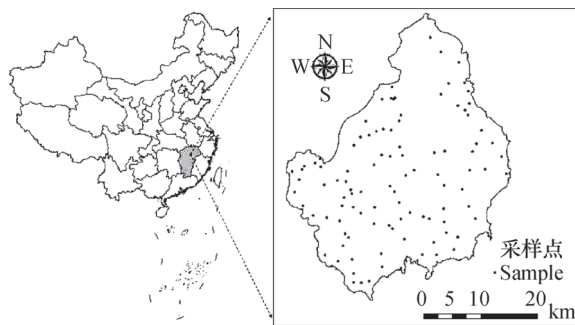


图1 研究区域和样本点分布

Fig. 1 Location map of the study area and distribution of sampling sites

分别测定土壤SOM、pH、CEC和黏粒的含量。土壤有机质用低温外加热重铬酸钾氧化—滴定法测定；CEC用乙酸铵法测定；pH在土：水=1：2.5的条件下，用电位法测定；土壤颗粒组成用吸管法测定。具体方法参见张甘霖等<sup>[15]</sup>。用标准样本(GBW07413)和重复分析进行质量控制。

### 1.3 地理加权回归

全局的OLS回归模型假定所研究的环境变量之间的关系在空间上是恒定的，其公式为：

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中， $y$ 为因变量， $x_i$ 为自变量， $\varepsilon$ 为高斯误差项。 $\beta_0$ 为模型截距， $\beta_i$ 为区域内变量 $i$ 的回归系数， $p$ 为回归项的个数。该类模型的前提是假设拟合样本之间彼此独立。然而在空间上，事物普遍与周围的其他事物相关，且距离近的事物通常较距离远的事物有更强的关联性<sup>[14]</sup>。故传统的多元线性回归并不适合分析空间数据之间的非平稳关系。

作为一个局部空间统计模型，地理加权回归(GWR)在探索空间数据之间非平稳关系的优越性已经显现<sup>[12, 16]</sup>。与全局的OLS回归模型相比，GWR为每个空间位置处的变量分配不同的权重，以此来估计各变量之间的局部空间关系，其公式为：

$$y(\mu, v) = \beta_0(\mu, v) + \sum_{i=1}^p \beta_i(\mu, v) x_i + \varepsilon(\mu, v) \quad (2)$$

式中， $(\mu, v)$ 为区域内不同的空间位置， $\beta_0(\mu, v)$ 为位置 $(\mu, v)$ 处的模型截距， $\beta_i(\mu, v)$ 为位置 $(\mu, v)$ 处自变量 $i$ 的局部回归系数。关于GWR模型更多介绍参见Fotheringham等<sup>[12, 17]</sup>。

### 1.4 数据处理

利用SPSS 19.0软件对样本数据进行描述性统计分析。地理加权回归分析在GWR 4.0中完成。地统计学分析及出图在ArcGIS 10.2中完成。

## 2 结 果

### 2.1 土壤CEC及其影响因子的描述性统计

表层和亚表层土壤中CEC、黏粒、SOM和pH的描述性统计量见表1。表层土壤CEC的变化范围6.31~16.32 cmol kg<sup>-1</sup>，平均值10.23 cmol kg<sup>-1</sup>，表明土壤保肥能力处于中等水平<sup>[1]</sup>。表层土壤CEC的变异系数为0.207，由变异系数分级标准<sup>[18]</sup>可知，该地表层土壤CEC处于中等变异水平。

亚表层土壤CEC的变化范围为3.73~13.97 cmol kg<sup>-1</sup>，平均值8.9 cmol kg<sup>-1</sup>。因此，亚表层土壤的保肥能力低于表层土壤。亚表层土壤CEC变异也处于中等程度变异(CV=0.237)，说明研究

表1 表层及亚表层土壤CEC及其相关影响因子的描述性统计量

Table 1 Descriptive statistics of soil CEC and its control factors in the topsoil and subsoil ( $n=103$ )

	表层 (0~20 cm) Topsoil					亚表层 (20~40 cm) Subsoil				
	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数
	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV
阳离子交换量 CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	6.31	16.32	10.23	2.12	0.21	3.73	13.97	8.90	2.11	0.24
黏粒 Clay (%)	13.08	48.92	25.00	5.12	0.21	10.16	49.52	25.76	5.53	0.22
pH	4.32	6.14	4.80	0.29	0.06	4.41	7.14	5.52	0.54	0.10
土壤有机质 SOM ( $\text{g kg}^{-1}$ )	11.37	47.03	33.63	6.71	0.20	4.06	44.97	15.49	7.67	0.50

区域内土壤CEC的变化受到内部因素和外部因素的共同影响<sup>[19]</sup>。表层和亚表层SOM的平均值分别为 $33.63 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $15.49 \text{ g kg}^{-1}$ 。表层土壤SOM含量高于亚表层,这可能与表层土壤的耕作管理方式、施肥、灌溉等农业措施积累了较多的有机质有关<sup>[20]</sup>。

## 2.2 土壤CEC的空间分布

表层和亚表层土壤CEC具有相似的空间分布(图2),表现为西部地区较高,北部和东南部地区较低。整体上,表层土壤CEC较高的区域对应的亚表层土壤CEC也较高。但亚表层土壤CEC经常低于表层,这一现象在研究区的东南部表现尤为明显。说明,自上而下土壤CEC的含量有逐渐减小的趋势,这可能与土壤中有有机质和黏粒的影响有

关<sup>[21]</sup>。一般而言,有机质的变化是影响土壤阳离子交换量变化的重要因素。土壤有机质由于其分子量较大,功能团多,解离后带电量也多,而且其具有很大的吸收表面,所以有机质丰富的土壤阳离子交换量一般较大<sup>[22]</sup>。而土壤黏粒是土壤阳离子吸收交换点的主要来源,具有较强的吸附能力,因此,黏粒含量越高,土壤负电荷数量越多,土壤CEC也就越高<sup>[2]</sup>。

## 2.3 土壤CEC与主要控制因子之间的全局关系

对表层和亚表层土壤中CEC( $Y_{\text{CEC}}$ )与土壤黏粒( $X_{\text{clay}}$ )、土壤有机质( $X_{\text{SOM}}$ )和土壤pH( $X_{\text{pH}}$ )的关系进行相关性分析,结果见表2。

从表2中可知,表层土壤中各因子均与土壤CEC呈显著相关,黏粒与土壤CEC的相关

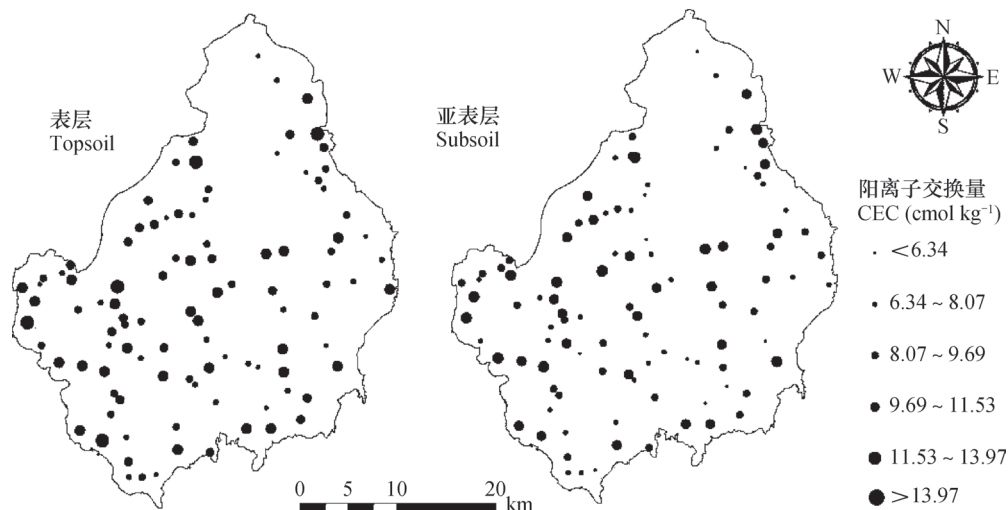


图2 表层和亚表层土壤CEC的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil CEC in topsoil and subsoil

性 ( $r=0.365$ ) 显著高于其他两个因子；亚表层土壤中，土壤黏粒与土壤CEC的相关系数 ( $r=0.479$ ) 大于土壤有机质与土壤CEC的相关系数 ( $r=0.231$ )，即黏粒对CEC的贡献大于有机质的贡献，这与前人的研究结果相似<sup>[9]</sup>。亚表层土壤  $X_{\text{clay}}$  与土壤CEC的相关系数要高于表层土壤（表层， $r=0.365$ ；亚表层 $r=0.479$ ），这说明，自上而下CEC与土壤中黏粒的相关性增强。相似的，亚表

层土壤有机质与CEC的相关性高于表层土壤。此外，亚表层土壤中土壤  $X_{\text{SOM}}$  与土壤  $X_{\text{pH}}$  呈极显著负相关（表2），这可能与亚表层土壤pH的增加有关。通常，土壤有机质随土壤pH的增加而减少<sup>[23]</sup>。

为了深入了解区域内土壤CEC与相关土壤属性之间的全局关系，对土壤CEC ( $Y_{\text{CEC}}$ ) 与其控制因子土壤黏粒 ( $X_{\text{clay}}$ )、土壤有机质 ( $X_{\text{SOM}}$ ) 和土壤pH ( $X_{\text{pH}}$ ) 进行多元线性回归分析，结果如下：

表2 表层和亚表层土壤属性的相关性

Table 2 Pearson's correlation coefficients between CEC and related soil properties in topsoil and subsoil

	表层 (0 ~ 20 cm) Topsoil				亚表层 (20 ~ 40 cm) Subsoil				
	$Y_{\text{CEC}}$	$X_{\text{clay}}$	$X_{\text{pH}}$	$X_{\text{SOM}}$	$Y_{\text{CEC}}$	$X_{\text{clay}}$	$X_{\text{pH}}$	$X_{\text{SOM}}$	
$Y_{\text{CEC}}$	1				$Y_{\text{CEC}}$	1			
$X_{\text{clay}}$	0.365**	1			$X_{\text{clay}}$	0.479**	1		
$X_{\text{pH}}$	0.217*	0.01	1		$X_{\text{pH}}$	0.113	-0.083	1	
$X_{\text{SOM}}$	0.212*	0.017	-0.154	1	$X_{\text{SOM}}$	0.231**	0.170*	-0.454**	1

注： $X_{\text{clay}}$ 表示黏粒含量， $X_{\text{SOM}}$ 表示土壤有机质含量， $X_{\text{pH}}$ 表示土壤pH， $Y_{\text{CEC}}$ 表示土壤CEC。\*\*表示达到0.01的显著性水平，\*表示达到0.05的显著性水平 Note:  $X_{\text{clay}}$  stands for clay content,  $X_{\text{SOM}}$  for soil organic matter content,  $X_{\text{pH}}$  for soil pH,  $Y_{\text{CEC}}$  for soil CEC; and \* means correlation significant at the 0.05 level, and \*\* at the 0.01 level

表层：

$$Y_{\text{CEC}} = -4.908 + 0.149X_{\text{clay}} + 1.836X_{\text{pH}} + 0.077X_{\text{SOM}}, R^2 = 0.214 \quad (3)$$

亚表层：

$$Y_{\text{CEC}} = -2.713 + 0.174X_{\text{clay}} + 1.076X_{\text{pH}} + 0.077X_{\text{SOM}}, R^2 = 0.293 \quad (4)$$

可以看出，无论是表层还是亚表层，各土壤属性因子均对土壤CEC有一定影响。根据偏相关系数，亚表层土壤黏粒对土壤CEC的影响大于表层土壤。相反地，pH对土壤CEC的影响表层大于亚表层，而有机质在不同土层对CEC影响的变化不大。但是这两个回归方程的决定系数均较小，可能是因为这种全局的回归方法对区域内变量的整体变化情况的解释能力较差。因此，本研究采用GWR空间局部回归方法来进一步探索土壤CEC与其相关控制因子（土壤黏粒、SOM和土壤pH）之间的空间非平稳关系。

## 2.4 土壤CEC与相关控制因子之间的空间非平稳关系

土壤CEC与相关控制因子之间的GWR回归系数空间分布如图3和图4所示。可以看出，这些回归系数在空间上并不是恒定不变的，而是随着空间位置的变化而变化，即土壤CEC与这些土壤因子之间

的关系存在空间非平稳性。各因子对CEC的影响程度可通过对应的回归系数来解释。通常情况下，正的回归系数代表正的影响或相关，负的回归系数代表负的影响或相关<sup>[24]</sup>。回归系数的绝对值大小反映该因子对土壤CEC影响的强烈程度，各环境因子对土壤CEC的影响随着空间位置的变化而变化。

从图3中可以看出，土壤中的黏粒、有机质和pH对土壤CEC的影响并非恒定。具体表现为：黏粒对土壤CEC的影响在研究区域的东北部较小，西南部较大。pH对土壤CEC的影响与黏粒相似，西南部地区对土壤CEC的影响较大，由西南向东北，回归系数逐级递减。有机质对土壤CEC的影响表现为，南部较低，西北部较高。

亚表层各因子对土壤CEC的影响有所不同，黏粒对土壤CEC的影响在西北部较低，东南部较高。SOM在研究区域的北部对土壤CEC的影响较大，东西部地区较小。而土壤pH则在西部对土壤CEC的影响较大，东北部较小（图4）。相比于表层，亚表层SOM的回归系数较大，说明亚表层土壤SOM对土壤CEC的影响更强烈，这一结果验证了文中基于OLS的全局回归的结果。但就局部区域而言，GWR的优势更明显。

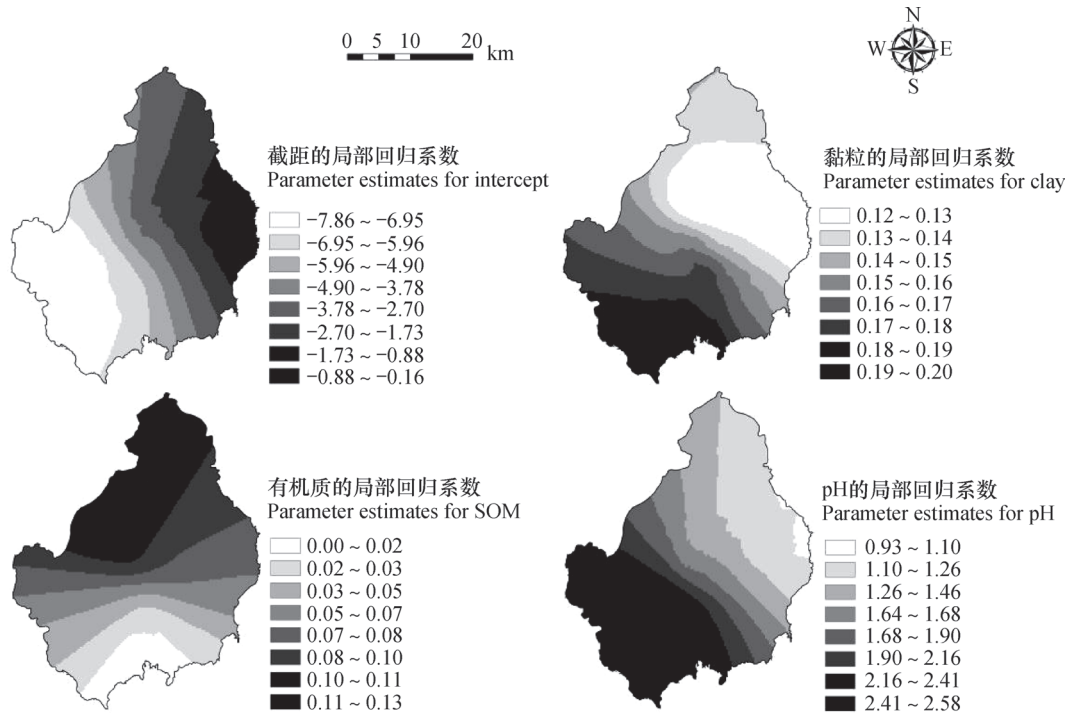


图3 表层土壤CEC与土壤影响因子之间 GWR回归系数分布图

Fig. 3 GWR maps of relationships of CEC with control factors in topsoil

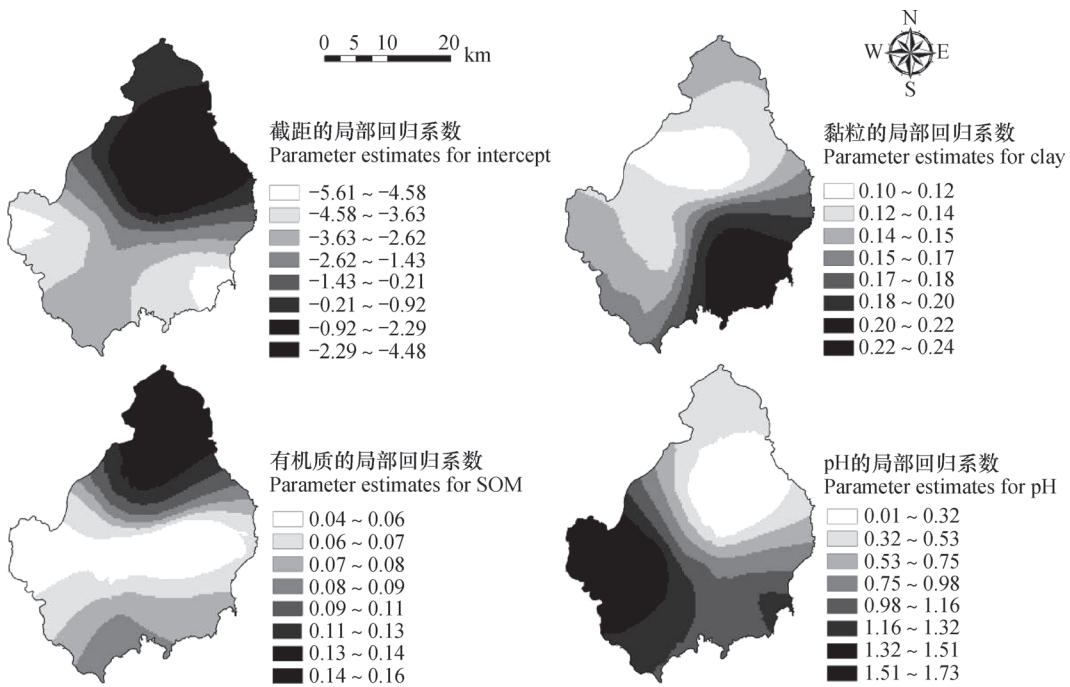


图4 亚表层土壤CEC与土壤影响因子之间GWR 回归系数分布图

Fig. 4 GWR maps of relationships of CEC with control factors in subsoil

### 3 讨论

土壤阳离子交换量作为判定土壤保肥能力的重要指标,其变化受到很多因素的影响,其中最主

要的几个指标为:土壤pH、土壤黏粒以及土壤有机质(SOM)<sup>[2]</sup>。本文就进贤县稻田土壤CEC与其相关控制因子(土壤黏粒、SOM、土壤pH)的空间非稳态关系进行了研究,并与传统的OLS回归

结果进行了对比。结果表明，相比于传统的OLS回归，GWR分析在局部回归方面有显著的优势，可以更好地反映局部区域内各控制因子对土壤CEC的影响情况。

对比图3和图4，我们发现各因子对土壤CEC的影响在垂直方向上有较大差异，如表层土壤SOM对土壤CEC影响较弱的区域在南部，而在亚表层则表现为西部和东部地区SOM对土壤CEC影响较弱。这可能与SOM的种类和含量的空间变化有关<sup>[7, 25]</sup>，当然也可能受土壤中其他不确定因素的影响<sup>[26-27]</sup>。此外，回归系数在不同土层也有变化，如表层土壤pH回归系数就明显高于亚表层，从而表层土壤pH对土壤CEC的影响要高于亚表层。结合土壤pH的统计分析（表1）以及前人的研究结果<sup>[28]</sup>，推测这与垂直方向土壤pH的增加有关。

通过上述分析，结合土壤CEC的空间分布图（图2），可以更清楚地了解进贤县不同空间位置处稻田土壤各控制因子对土壤CEC的影响情况，从而为区域土壤改良提供决策支持。如在土壤CEC较低的北部区域，SOM对土壤CEC的影响相对其他区域更敏感，因此可以通过向该区域增施有机肥来改善土壤有机质状况，进而提高土壤保肥能力。在土壤CEC相对较低的东南部地区，无论是表层还是亚表层，黏粒对土壤CEC的影响均较大。并且在该子区域内表层土壤中，pH对土壤CEC的影响相对其他区域也较大（图3）。这种情况下，无论是改变土壤质地还是向土壤中施加碱性肥料均可显著增加土壤CEC，进而提高该子区域的土壤保肥能力。从图2中还可以看出，自上而下土壤CEC有逐渐减小的趋势，可以通过增施改良剂、秸秆还田和深耕等手段，改善土壤理化性质，不断促使土壤有机质的积累和黏粒的生成，进而提高整个土壤的肥力水平。但是，由于各控制因子具有不同的计量单位，无法进行直接比较。在后续的研究中可将改良土壤的经济成本考虑进去，并将其作为统一的标准来比较各控制因子调控土壤CEC的成本，进而从土壤改良或修复的经济成本角度，为土壤肥力调控提供技术支持。

## 4 结 论

描述性统计分析表明进贤县土壤CEC处于中等程度变异，表层保肥能力高于亚表层。土壤CEC

的空间分布表现为西部地区较高，北部和东南部较小。表层土壤CEC往往高于亚表层。土壤CEC与其相关控制因子的回归系数图，很好地揭示了GWR回归在预测土壤CEC与其相关控制因子（土壤黏粒、SOM和土壤pH）的空间非平稳关系的优越性。各控制因子在局部区域和不同层次对土壤CEC的影响存在明显差别。结合土壤CEC的空间分布图，可以在土壤CEC较低的北部地区和东南部地区，通过增施有机肥、改变土壤质地以及施加碱性肥料等手段，改善土壤肥力状况。此外，由于亚表层土壤CEC常常低于表层，可以通过增施改良剂、秸秆还田和深耕等手段，改善土壤理化性质，不断促使土壤有机质的积累和黏粒的生成，进而提高整个土壤的肥力水平。

## 参 考 文 献

- [1] 侯光炯. 土壤学 南方本. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 1999  
Hou G J. *Agrology (In Chinese)*. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [2] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2001  
Huang C Y. *Pedology (In Chinese)*. Beijing: China Agriculture Press. 2001
- [3] 张磊, 宋凤斌, 崔良. 化肥施用对土壤中重金属生物有效性的影响研究. 中国生态农业学报, 2006, 14 (4): 122—125  
Zhang L, Song F B, Cui L. Effects of application of chemical fertilizers on bioavailability of heavy metals in soil (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14 (4): 122—125
- [4] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61 (3): 247—255
- [5] Amery F, Smolders E. Unlocking fixed soil phosphorus upon waterlogging can be promoted by increasing soil cation exchange capacity. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63 (6): 831—838
- [6] Bortoluzzi E C, Tessier D, Rheinheimer D S, et al. The cation exchange capacity of a sandy soil in southern Brazil: An estimation of permanent and pH-dependent charges. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (3): 356—364
- [7] Oorts K, Vanlauwe B, Merckx R. Cation Exchange Capacities of soil organic matter fractions in Ferric Lixisol with different organic matter inputs.

- Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 100 (2): 161—171
- [ 8 ] Sharma A, Weindorf D C, Wang D D, et al. Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. Cation exchange capacity (CEC). *Geoderma*, 2015, 239/240: 130—134
- [ 9 ] 廖凯华, 徐绍辉, 程桂福, 等. 土壤CEC的影响因子及Cokriging空间插值分析——以青岛市大沽河流域为例. *土壤学报*, 2010, 47 (1): 26—32
- Liao K H, Xu S H, Cheng G F, et al. Influencing factors and cokriging spatial interpolation analysis of soil cation exchange capacity—A case study of Dagu River basin, Qingdao City (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (1): 27—31
- [ 10 ] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 河南三种土壤阳离子交换量相关性及其预测模型研究. *土壤通报*, 2011, 42 (3): 627—631
- Zhang S Q, Huang S M, Guo D D. The correlations and prediction models of cation exchange capacity in three soils in Henan (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (3): 627—631
- [ 11 ] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子. *水土保持学报*, 2012, 26 (5): 123—127
- Wang W Y, Zhang L P, Liu Q. Distribution and affecting factors of soil cation exchange capacity in watershed of the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 123—127
- [ 12 ] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. *American Journal of Agricultural Economics*, 2002, 86 (2): 554—556
- [ 13 ] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景. *土壤*, 2014, 46 (1): 15—22
- Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (1): 15—22
- [ 14 ] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46 (2): 234—240
- [ 15 ] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012
- Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [ 16 ] Wang Q, Ni J, Tenhunen J. Application of a geographically-weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14 (4): 379—393
- [ 17 ] Nakaya T, Fotheringham S, Brunsdon C, et al. Geographically weighted poisson regression for disease associative mapping. *Statistics in Medicine*, 2005, 24 (17): 2695—2717
- [ 18 ] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 19—29
- [ 19 ] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58 (5): 1501—1511
- [ 20 ] 徐丹, 刘昌华, 蔡太义, 等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究. *农业机械学报*, 2015, 46 (12): 157—163
- Xu D, Liu C H, Cai T Y, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 (12): 157—163
- [ 21 ] 赵之重. 青海省土壤阳离子交换量与有机质和机械组成关系的研究. *青海农林科技*, 2004, 4 (3): 4—6
- Zhao Z Z. Study on relationship between organic matter, soil fractions and CEC in Qinghai soil (In Chinese). *Agriculture and Forestry Science and Technology of Qinghai*, 2004, 4 (3): 4—6
- [ 22 ] Thomas G A, Dalal R C, Standley J. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94 (2): 295—304
- [ 23 ] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. *土壤学报*, 2009, 46 (5): 852—860
- Dai W H, Huang Y, Wu L, et al. Relationships between soil organic matter content (SOM) and pH in topsoil of zonal soils in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (5): 852—860
- [ 24 ] Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Spatially nonstationary relationships between copper accumulation in rice grain and some related soil properties in paddy fields at a regional scale. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (5): 1765—1774
- [ 25 ] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响. *中国农业科学*, 2014, 47 (2): 366—373
- Ge S F, Peng L, Ren Y H, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity

- and nitrogen absorption in apple orchard soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (2): 366—373
- [26] Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, et al. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma*, 2006, 136 (3/4): 588—597
- [27] Favre F, Tessier D, Abdelmoula M, et al. Iron reduction and changes in cation exchange capacity in intermittently waterlogged soil. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53 (2): 175—183
- [28] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原小流域土壤pH、阳离子交换量和有机质分布特征. *应用生态学报*, 2009, 20 (11): 2710—2715
- Wei X R, Shao M A. Distribution characteristics of soil pH, CEC and organic matter in a small watershed of the Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (11): 2710—2715

## Spatially Non-stationary Relationships between Cation Exchange Capacity and Related Control Factors

LI Jinfen<sup>1, 2</sup> QU Mingkai<sup>2†</sup> HUANG Biao<sup>2</sup> LIU Gang<sup>1</sup> ZHAO Yongcun<sup>2</sup> SUN Weixia<sup>2</sup> HU Wenyong<sup>2</sup>  
(1 School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** 【Objective】 Soil cationic exchange capacity (CEC) directly reflects capacity of the soil supplying and buffering cation nutrients, and hence plays a very important role in conserving soil fertility. The knowledge about spatial distribution of soil CEC and effects of its control factors (i.e., clay, soil organic matter (SOM), and soil pH) at a regional scale may help precisely regulate soil fertility in the region. This paper explored soil CEC and its related control factors (i.e., Clay, SOM and soil pH) in the topsoil (0~20 cm) and subsoil (20~40 cm) of Jinxian County, Jiangxi Province, China for analysis of spatial non-stationary relationships between them, with a view to providing some critical information for the region to formulate specific soil fertility building measures. 【Method】 In the past, the traditional least squares regression (OLS) method was used to explore effects of relevant factors on soil CEC. The method, however, is a population regression one, and assumes that the relationships between soil CEC and its control factors are constant, thus ignoring spatial non-stationary relationships between soil CEC and its control factors across the region. Geographically weighted regression (GWR) -a local spatial regression model, can be used to solve this problem. With this model, spatial locations of the data are embedded into the linear regression model in exploring spatial non-stationary relationships between variables. And the regression coefficients of the model have been estimated separately by spatial data location. Therefore, compared with the OLS model, GWR is obviously advantageous in exploring spatial non-stationary relationship between soil CEC and its related control factors. 【Result】 Results of the descriptive statistical analysis show that soil CEC varies moderately in Jinxian County. The topsoil is higher than the subsoil in soil nutrient retention capacity. Soil CEC is relatively high in the western part of the county, but lower in the northern and southeastern parts and always higher in the topsoil than in the subsoil. The GWR analysis shows that the relationships between soil CEC and its related control factors (i.e., soil pH, clay soil, and SOM) were not constant and varied spatially, demonstrating the existence of certain spatial non-stationarity. The effects of the control factors on soil CEC varied with the soil layer. For example, clay in the topsoil affected soil CEC more in the southwest than in the northeast; while that in the subsoil did more in the southeast than in the northwest. Furthermore, effects of the factors



varied from sub-region to sub-region. For instance, in topsoil, the effect of SOM was low in the south, but quite high in the northwest. The soil CEC spatial distribution map and the regression coefficient map of soil CEC and its control factors demonstrates that in the northern region where soil CEC is quite low, soil CEC is more sensitive to changes in SOM than in any other regions. In this case, more organic manure should be applied to improve soil CEC and hence soil nutrient retention capacity. However, in the southeastern region where soil CEC is relatively low, clay is the major factor affecting soil CEC in both soil layers, and pH in the topsoil is another. In this case, either alteration of soil texture or application of alkaline fertilizer in this region would effectively increase soil CEC. **【Conclusion】** The findings show that the control factors vary sharply in effect on soil CEC with sub-region and soil depth. Meanwhile, the model of GWR effectively reveals that spatial non-stationary relationships exist between soil CEC and its related control factors. Based on the soil CEC spatial distribution map, it is recommended that more organic manure and/or alkaline fertilizer be applied to alter soil texture and improve soil fertility in the northern and southeastern regions.

**Key words** Cationic exchange capacity; Spatial non-stationarity; Geographically weighted regression; Least squares regression; Soil nutrient retention capacity

(责任编辑: 陈荣府)