

南方红壤侵蚀区地形对土壤有机质空间分布的影响

——以长汀县河田地区为例

陈海滨, 陈志彪, 陈志强

(福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 应用地统计学和 GIS 空间分析技术, 对南方红壤侵蚀区土壤有机质进行了空间变异特征和空间插值研究, 并通过空间叠置分析, 探讨了高程、坡度对红壤侵蚀区土壤有机质空间变异的影响。结果表明: 研究区土壤有机质含量处于较低的水平, 土壤有机质含量随着高程的变化不明显, 有机质较高的区域在海拔 255~ 300 m、300~ 400 m、400~ 771 m 范围内, 均占各自总面积的 26% 左右; 土壤有机质含量随着坡度的增大而增加, 有机质较高的区域在坡度 0~ 8°、8~ 25°、> 25° 范围内, 分别占各自总面积的 24.05%、26.11%、34.53%。

关键词: 海拔; 坡度; 土壤有机质; 空间变异

中图分类号: S 158.9

文献标识码: A

Impact of topography on spatial distribution of organic matters in red eroded soil in south China —A case study at hetian in Changting county

CHEN Hai bin, CHEN Zhi biao, CHEN Zhi qiang

(College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: The spatial variability and interpolation of organic matters in the red eroded soil in South China were studied by means of GIS spatial analysis and statistics. The result showed that the organic matter content in the soil was generally low. The content did not vary significantly with the elevation. At high altitudes, the areas with high organic matters constituted approximately 26% of that total area. The content of organic matters increased with steepness of the slope, where it varied from 24.05% to 34.53%.

Key words: altitude; slope; soil organic matter; spatial variability

土壤有机质 (SOM) 作为土壤碳库, 调节着土壤养分循环, 与土壤肥力密切相关, 它不仅能为植物生长提供碳源, 而且在很大程度上影响着土壤结构和团聚体的形成、土壤抵抗侵蚀的物理稳定性及土壤生物多样性等, 被认为是衡量土壤质量和土壤生产力的重要指标之一^[1-6]。土壤空间变异研究有利于探讨土壤景观格局与自然、生态过程和社会经济活动之间的关系和土壤变异规律, 对于土壤调查、分类、制图、控制水土流失和土壤可持续利用均有重要意义^[7]。国内学者对土壤有机质空间分布研究表明, 土壤有机质在空间分布上具有不均一性^[8-11], 研究尺度也从农田尺度^[12-14] 开始逐渐向流域尺度^[15-16] 扩展。关于红壤地区土壤有机质的空间分布也有一定的报道^[17-18]。

利用 DEM 模型提取的地形信息与相关图件叠合进行土地质量评价、土地适宜性评价、土地分等

定级、土壤侵蚀风险评价等成为相关领域的研究热点^[19-23]。地形是导致区域土壤属性产生差异的重要因素之一^[24], 在低纬度的丘陵地区, 地形因子 (坡度、坡向和海拔高度等) 与土壤属性的分布状况常有着密切关系^[25-26], 从而影响到土地利用方式及分布格局。为此, 本研究利用地统计学方法及 DEM 模型, 探讨了高程和坡度两大地形因子对南方红壤侵蚀区土壤有机质空间变异的影响, 以期为研究区水土流失的治理提供一定的理论依据。

1 研究区概况

福建省长汀县以河田镇为中心的水土流失区 (25°33′ ~ 25°48′ N, 116°18′ ~ 116°29′ E), 总面积 31 633.46 hm², 地貌类型主要有构造侵蚀低山、高丘陵、低丘陵、浅丘陵和堆积阶地等; 气候属中亚热带季风性湿润气候, 多年平均气温 18.3℃,

收稿日期: 2010- 04- 16 初稿; 2010- 05- 09 修改稿
作者简介: 陈海滨 (1986-), 男, 在读硕士, 主要从事水土保持与 GIS 应用研究 (E-mail: chenhb13@163.com)
通讯作者: 陈志彪 (1962-), 男, 教授, 主要从事资源与环境等方面研究 (E-mail: chenzhibo@gmail.com)
基金项目: 国家自然科学基金 (40871141, 40571096)

年降水量 1 700~ 2 000 mm^[27- 28]；山地土壤主要为燕山晚期黑云母花岗岩在长期湿热气候条件下风化而发育成的红壤、侵蚀红壤，节理发育，极其松软，抗蚀性极差，酸性强，保水保肥能力低^[27]；由于长期人为破坏，原始植被大部分为次生林所代替。在实施水土保持措施前，侵蚀较强的区域植被盖度仅 5%~ 10%，年生长量极低，主要植被类型为丘陵地带的次生马尾松中、幼林，树种单一，结构简单，周边高丘、低山分布有少量的针阔混交林^[27- 29]。

2 研究方法

根据研究区内地形、土壤分布、土地类型等条件，选取能代表该区自然地理概况的样点，在 2002 年 7 月采用随机布点法尽量均匀布点，并在地形相对复杂处加大采样密度，采集表层土样共 70 个，并用 GPS 记录采样点位置。采用高温重铬酸钾氧化- 容量法测定采集土样的有机质含量^[30]；对地形图进行扫描、修正和配准，矢量化等高线，检查拓扑错误后生成不规则三角网（TIN），再内插生成 DEM，最后利用 DEM 提取高程和坡度^[31]。

地统计学是以区域化变量理论为基础，以半方差函数为基本工具的一种数学方法，其基本原理和方法在许多文献中都有比较详细的描述^[31- 32]。半方差函数是地统计学中研究土壤变异性的工具函数，计算公式为：

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中： $\lambda(h)$ 为半方差函数； h 为样点空间间隔距离，称为步长； $N(h)$ 为间隔距离 h 时所有观测样点数； $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是区域化变量 x_i 在空间位置 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 的实测值。

3 结果与分析

3.1 土壤有机质的统计特征分析

变异系数（ $C.V.$ ）反映的是相对变异，即随机变量的离散程度。根据相关研究， $C.V. \leq 0.1$ 为弱变异性； $0.1 < C.V. < 1$ 为中等变异性； $C.V. \geq 1$ 为强变异性^[33]。由表 1 可以看出，研究区土壤有机质含量的变异系数达到 0.98，属中等变异；有机质含量平均值只有 $7.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，并且中值小于平均值，说明大部分样点的数据低于平均值；样本偏度和峰度值较大，这是由于存在个别样点有机质含量较高，经对数变换后，偏度小于 1，峰度小于 3，达到正态分布的要求。

3.2 土壤有机质的半方差分析

利用 ArcGIS 的地统计模块对所采集的土壤样本有机质含量进行半方差分析。本研究所采用的模型为适用性最广的球状模型，并采用交叉验证法得出球形模型的拟合状况最好。

表 1 土壤有机质的统计特征值
Table 1 Statistic eigenvalues of soil organic matter (SOM)

样本数	平均值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最小值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差	变异系数 $C.V.$	偏度	峰度	$K-S$ 值	分布类型
70	7.51	5.09	0.95	37.3	7.34	0.98	0.3	2.65	0.173	L

注：L 表示对数正态分布，偏度、峰度值为对数变换后所得。

表 2 土壤有机质的理论模型和相应参数
Table 2 Theoretical models of SOM and corresponding parameters

理论模型	块金 (c_0)	基台值 ($c_0 + c_1$)	块金系数 $c_0 / (c_0 + c_1)$	步长 (m)	变程 (m)
球形模型	0.408 2	0.809 4	0.504 3	500	4 158.6

从表 2 可以看出，存在一定程度的块金方差（ c_0 ），表明研究区土壤有机质作为区域化变量存在一定的采样误差和空间变异。土壤性质的空间相关性可根据块金值与基台值之比 $c_0 / (c_0 + c_1)$ 划分，块金系数 < 0.25 说明变量具有强烈的空间相关性，

$0.25 \sim 0.75$ 说明变量具有中等的空间相关性， > 0.75 时变量空间自相关性微弱^[34]。影响土壤性质空间变异的因素分为内因和外因，内因是结构性因子（如母质、地形、气候、植被等），外因是随机性因子（如施肥、耕作、作物布局等）。从 $c_0 / (c_0$

+ c_1) 值可以看出, 土壤有机质具有中等的空间相关性, 结构性因子和随机因子的影响各占一半左右。在步长间距 500 m 时拟合出最佳模型, 变程达到 4 158. 6 m, 说明土壤有机质在较大范围内有相关性。

3.3 土壤有机质的空间分布特征

对 70 个样点的有机质含量进行对数变换后, 其呈正态分布, 符合地统计空间插值要求。利用普通克里格插值生成土壤有机质分布图, 结合全国第 2 次土壤普查制定的肥力标准进行划分, 结果如图 1。从图 1 可以看出, 研究区土壤有机质含量处在 4、5、6 三个较低的级别, 大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的相对高值区主要有 4 块, 其中东南部最高且范围最大, 东部、西部和北部各有一小块高值区, 范围较小; 小于 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的低值区主要分布在研究区中部、北部以及西南部, 并在东部地区有零星分布; $6\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这一级别面积最大, 成片分布在以中央低值区为中心的周围。

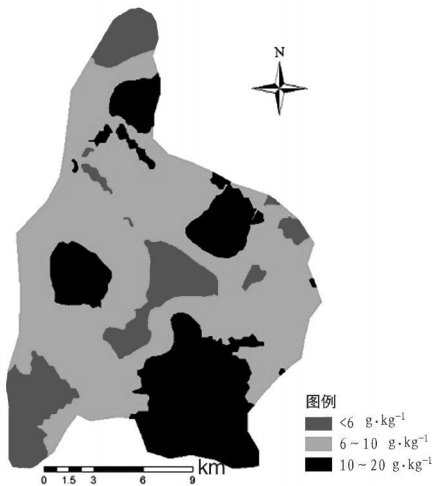


图 1 土壤有机质分布图
Fig 1 Kriging interpolation of SOM

3.4 地形因子对土壤有机质空间分布的影响

把高程和坡度分别与土壤有机质含量进行相关性检验, 两两之间都存在显著的相关关系。其中坡度与有机质的相关关系 ($r=0.36^*$, $P<0.05$) 比高程与有机质的相关关系 ($r=0.15^*$, $P<0.05$) 明显。通过叠加分析进一步分析地形对土壤有机质分布的影响。

3.4.1 高程对土壤有机质空间分布的影响 把 DEM 提取的高程图与土壤有机质分布图叠加并重分类, 结果如图 2, 具体的分级数据如表 3。从图 2 及表 3 中可以看出, 有机质含量高于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域, 在海拔 255~300 m 相对较低的地区主要

在中东部和东南部各有一小块区域, 占整个研究区总面积的 7.86%, 相对于整个海拔较低的地区, 仅占 25.45%; 在海拔 300~400 m 范围内, 广泛分布在北部、中东部、中西部和东南部, 占整个研究区总面积的 13.38%, 相对于整个中海拔地区, 占 26.88%; 在海拔 400~771 m 相对高的地区, 只在东南部和中西部呈小块分布, 占研究区总面积的 4.95%, 相对于整个海拔较高地区占 25.59%。从整个研究区来看, 有机质高的地方集中在中海拔地区, 占到 51.1%, 在低海拔和高海拔地区分别只占到 30.0% 和 18.9%。从相对比例看, 土壤有机质含量随高程的变化不明显, 高有机质区在各海拔范围内都占 26% 左右。主要原因在于, 在海拔较低的地区, 人类活动较多, 土地开发利用强度大, 有机质含量普遍较低, 虽然部分农田地区精耕细作土壤有机质含量较高, 但范围较小; 随着海拔的升高, 人类耕种活动减少, 但这一区域进行大量的果园开发, 地表植被大量破坏, 造成土壤的侵蚀, 土壤肥力变化不明显; 到了海拔高的地区, 由于基岩的裸露, 植被较为稀疏, 降雨直接降落到地面上, 造成表层土壤有机质的流失, 虽然人为影响较少, 但土壤肥力变化也不大。

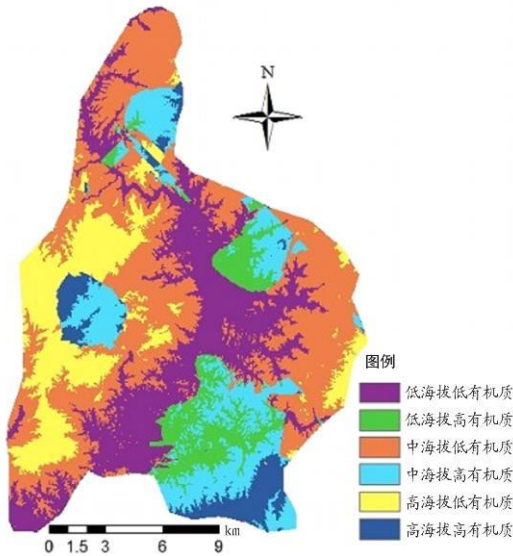


图 2 高程与有机质空间分布套合图
Fig 2 Overlapping map of elevation and SOM

3.4.2 坡度对土壤有机质空间分布的影响 把 DEM 提取的坡度图与土壤有机质分布图叠加并重分类, 结果如图 3, 具体分级数据如表 4。从图 3 及表 4 中可以看出, 有机质含量高于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域, 在坡度 $< 8^\circ$ 范围内, 分布在中东部和东南部呈块状分布, 占总面积的 8.01%, 相对于整个坡

度较低的地区，仅占 24.05%；在坡度 8~ 25° 范围内，分布最广占到总面积的 15.02%，但是相对于整个中坡度地区，有机质高值区仅占 26.11%；在坡度 > 25° 的地区，主要分布在东南部，只占总面积的 3.17%，但是相对于该坡度地区的面积占到 34.53%，大大超过较低坡度的地区的相对比例。从整体上来看，虽然有机质含量高的地方在中坡度地区的分布面积最大，这是由于研究区是一个低山丘陵区，在中坡度范围内分布的面积最广。从相对比例上看，随着坡度的增大，有机质高值区在各自坡度范围内所占比例随之增大，坡度越大的地方表现越明显。主要原因在于，坡度较低的地区虽然土壤侵蚀多为轻微度侵蚀，但由于人类活动频繁造成对土壤的破坏，使土壤有机质含量降低；中坡度地区，果园改造提高了土壤肥力，但在开发利用过程中，由于工程措施不规范和地面覆盖较低等原因，也导致土壤大量侵蚀，所以有机质含量增加不明显；坡度大的地区远离村庄，人为干扰相对较少，植被覆盖较好，所以在高坡度地区土壤有机质含量

高的面积所占比例较大。

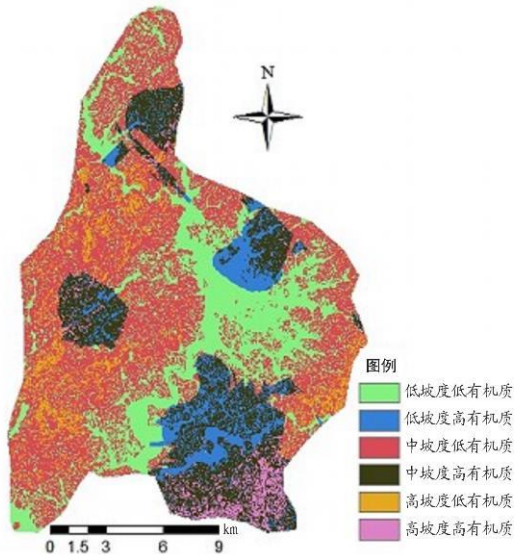


图 3 坡度与有机质空间分布套合图

Fig 3 Overlapping map of slope and SOM

表 3 高程与有机质空间分布套合图分级面积数据

Table 3 Data of different levels on overlapping map of elevation and SOM

海拔 (m)	有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					总面积 (hm^2)
	< 6	6~ 8	8~ 10	10~ 12	> 12	
255~ 300	1 625.50	3 811.38	1 846.69	1 510.50	977.13	9 771.2
300~ 400	2 624.00	5 506.44	3 382.56	2 610.69	1 622.06	15 745.75
400~ 771	763.38	2 023.25	1 763.25	1 003.19	563.44	6 116.51

表 4 坡度与有机质空间分布套合图分级面积数据

Table 4 Data of different levels on overlapping map of slope and SOM

坡度	有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)					总面积 (hm^2)
	< 6	6~ 8	8~ 10	10~ 12	> 12	
0~ 8°	1 713.31	4 159.19	2 127.00	1 571.00	961.06	10 531.56
8~ 25°	3 025.88	6 218.69	4 200.25	2 969.75	1 783.00	18 197.57
> 25°	273.69	963.19	665.25	583.63	418.56	2 904.33

4 结论与讨论

在研究区范围内，土壤有机质含量空间分布属于中等变异，服从对数正态分布，整个研究区由于长期水土流失造成土壤有机质含量较低。在东南部出现相对高值区，东部及西部地区也各有一小块的高值区。

通过分析地形因子对土壤有机质分布的影响可以看出，土壤有机质含量随着高程的变化产生的变

异不明显；土壤有机质含量随着坡度的增大而增加。

土壤有机质的空间分布受多方面因素的影响，通过半方差分析我们也看到研究区土壤有机质含量受结构因子和随机因子影响各占一半左右。土壤质地和土壤容重对土壤有机质影响较大，质地疏松和黏质的土壤都不利于保肥，壤质土才有利于土壤的保肥；农业管理措施、土地利用方式对土壤有机质的分布都有较大影响，合理的管理措施和土地利用

方式有利于土壤有机质的积累，相反不合理的管理措施和土地利用方式会使土壤有机质含量降低。近几年来在研究区内进行了大量的水土流失的治理工作，各种治理模式对土壤养分的恢复效益各不相同，使得土壤变异更为明显。进一步的研究可通过综合分析其他因素对土壤有机质分布的影响，以深入探讨土壤有机质的空间分布规律，及各种治理措施的效果，并结合土壤有机质与土壤质地研究土壤可蚀性 K 值的空间分布特征，为水土流失治理提供更为详实的依据。

参考文献：

[1] 张兴昌, 邵明安. 水蚀条件下不同土壤氮素和有机质的流失规律 [J]. 应用生态学报, 2000, 11 (2): 231– 234.

[2] 沈其荣. 土壤肥料学通论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 25– 27.

[3] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤质量的影响研究 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (4): 38– 41.

[4] 门明新, 彭正萍, 刘云, 等. 基于 SOTER 的河北省土壤有机碳、氮密度的空间分布 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (4): 469– 473.

[5] 杨文治, 马玉玺, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究 [J]. 水土保持学报, 1994, 8 (1): 1– 9.

[6] 曹丽花, 赵世伟. 土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35 (3): 177– 182.

[7] 陈楠. 基于 GIS 的中尺度土壤空间分布规律研究——以西安市为例 [D]. 西安: 西北大学, 2002: 1– 4.

[8] 甘海华, 吴顺辉, 范秀丹. 广东土壤有机碳储量及空间分布特征 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (9): 1499– 1502.

[9] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41 (1): 35– 43.

[10] 吕成文, 崔淑卿, 赵来. 基于 HNSOTER 的海南岛土壤有机碳储量及空间分布特征分析 [J]. 应用生态学报, 2006, 7 (4): 1014– 1018.

[11] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局 [J]. 水土保持通报, 2005, 25 (3): 20– 28.

[12] 王学锋, 张衡. 土壤有机质的空间变异性 [J]. 土壤, 1995, 27 (2): 85– 89.

[13] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性 [J]. 生态学报, 2002, 22 (8): 1173– 1178.

[14] 杨玉玲, 田长彦, 盛建东, 等. 灌淤土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探 [J]. 干旱区农业研究, 2002, 20 (3): 26– 30.

[15] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异 [J]. 水土保持学报, 2004, 18 (1): 31– 34.

[16] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间

分布格局 [J]. 地理研究, 2003, 22 (3): 373– 379.

[17] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征 [J]. 地理研究, 2004, 23 (1): 63– 70.

[18] 舒建英, 张世熔, 孙波. 江西兴国土流失治理区土壤有机质时空变化特征 [J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1240– 1246.

[19] MUSHTAK T J. Application of GIS to estimate soil erosion using RUSLE [J]. Geo- Spatial Information Science, 2003, 6 (1): 34– 38.

[20] COCHRANE T A, FLANGAGAN D C. Effect of DEM resolutions in the run off and soil loss predictions of the WEPP watershed model [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 48 (1): 109– 116.

[21] JIANG P, THELEN K D. Effects of soil and topographic properties on crop yield in a north – central soybean cropping system [J]. Agronomy Journal, 2004, 96 (1): 252– 259.

[22] FERAS M Z. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (5): 1590– 1600.

[23] 张勇, 陈良富, 柳钦火, 等. 日照时间的地形影响与空间尺度效应 [J]. 遥感学报, 2005, 9 (5): 522– 530.

[24] BRUBAKER S C, JONES A J, LEWIS D T, *et al*. Soil properties associated with landscape position [J]. Soil Science Soc Am J, 1993, 67: 235– 239.

[25] MUELLER T G, PIERCE F J. Soil carbon maps: enhance spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales [J]. Soil Science Soc Am J, 2003, 67 (1): 259– 267.

[26] 路鹏, 黄道友, 宋变兰, 等. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征 [J]. 农业工程学报, 2005, 21 (8): 181– 184.

[27] 陈志彪. 花岗岩侵蚀山地生态重建及其生态环境效应 [D]. 福州: 福建师范大学, 2005.

[28] 邹爱平. 红壤退化区侵蚀景观格局及其演变——以长汀县朱溪河小流域为例 [D]. 福州: 福建师范大学, 2008.

[29] 岳辉, 陈志彪. 朱溪河小流域水土流失治理与生态环境效应 [J]. 福建地理, 2003, 18 (1): 6– 8.

[30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 107– 108.

[31] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[32] 张仁铎. 空间变异理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4– 7, 14– 16.

[33] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究 [J]. 水利学报, 1985 (9): 10– 21.

[34] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils [J]. Soil Sci Soc., 1994, 58: 1501– 1511.

(责任编辑：刘新永)