

砂壤质褐土水力特性与物理性质的空间尺度效应*

——消除趋势波动分析法

舒乔生^{1, 2, 3} 刘作新^{1, 3†} 张自坤^{1, 2, 3} 王振营^{1, 3}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 辽宁省节水农业重点实验室, 沈阳 110016)

摘要 土壤水力特性与物理性质的空间异质性及其之间的关系在不同尺度上会有不同表现。采用消除趋势波动分析法对土壤水力特性(田间持水量、萎蔫系数和饱和导水率)和物理性质(机械组成、容重和有机碳含量)进行尺度分析。结果表明, 只有在一定尺度范围内才能进行土壤水力特性空间变异分析和尺度转换(外推)。过小的尺度范围内不能摆脱空间相关的束缚, 尺度太大时不能抓住主要控制因子, 因此无法进行尺度外推。所研究砂壤质褐土田间持水量、饱和导水率、容重和有机碳含量可外推尺度范围较大, 分别为 55~155、50~125、50~125 和 50~135 m; 砂粒、粉粒和黏粒含量的可外推尺度范围较小, 为 50~85 m, 因此在进行空间尺度转换前应先确定其尺度外推范围。

关键词 土壤水力特性; 空间异质性; 尺度分析; 消除趋势波动分析

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水力特性的获取在土壤水分运动、溶质运移和水文模型研究中至关重要。一般而言, 土壤水力特性可通过直接测定而得, 但需要大量的人力和物力, 而且其存在较大的空间变异性, 因此在大尺度、多采样点条件下并不实用; 较好的解决途径是用土壤其他易测的属性如机械组成、有机碳含量及容重、孔隙度等来推求, 然而水力特性与物理性质之间的关系会因尺度变化而发生改变^[1]。

一些学者^[2-6]采用地统计学方法或分形理论研究水力特性的空间变异和尺度特性。地统计学可用于描述水力特性的空间自相关性及其与土壤基本特性的协相关程度^[7]; 在自相关距外, 半方差仅能对空间变异进行定性描述, 且地统计仅为二阶统计方法, 不能对非平稳性数据序列进行分析^[8, 9]。

一些研究表明许多过程(如水力特性的空间分布)的尺度特征存在噪声和非平稳性^[10, 11], 这种尺度特征对研究对象来说不是内在的, 由于环境因子之间的相互作用, 其不能真实反映原位置波动特征, 因此基于这种关系上的尺度转换可能是错误的, 这就需要识别土壤水力特性波动在田间尺度上

的内在尺度特征和空间范围。为评价尺度特性, 需要对非平稳数据和噪声进行转换(如转成无局部趋势或有最少的奇异值), 较常用的为小波变换和消除趋势波动分析法(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)。

DFA 是 Peng 等物理学家和生物学家在探测 DNA(脱氧核糖核酸)内部分子链相关性时提出的^[12]。与小波分析不同, 其不受观测数量的限制、直接而灵活^[11, 13], 是检测非平稳时间序列相关性最重要、可靠的工具之一。经该方法变换后的序列与原序列保持着相同的持久性(或反持久性), 且可较好地“滤除”其自身演化的趋势成分, 剩下的离差序列主要是波动成分, 因此可以避免对相关性的错误判断。在 DFA 的基础上, Kantelhardt 等^[13]又进一步提出非稳定有限序列的多重分形消除趋势波动分析法(Multifractal Detrended Fluctuation Analysis, MFDEFA)。MFDEFA 实际是 DFA 思想的进一步广义化, 具有更强的功能, 不仅可以检测长程相关性、标度不变性, 还能判定序列是否具有多重分形属性并确定多重分形特征。

* 中国科学院知识创新工程项目 (No. KSCX2-YW-N-004) 和辽宁省节水农业重点实验室基金项目 (No. 05KJ21002) 共同资助

† 通讯作者, E-mail: liuzioxin@iae.ac.cn

作者简介: 舒乔生 (1973~), 男, 江西余干人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤空间变异与节水农业研究。E-mail: cysq@163.com

收稿日期: 2007-04-28; 收到修改稿日期: 2007-08-30

近几年, DFA 成功地应用于地质学^[14]、气象学^[15]和经济学^[16]等领域, 用于检测非平稳时间序列的尺度特性, 而采用 DFA 方法进行土壤特性的空间尺度研究还极少。

本研究采用消除趋势波动分析方法, 对砂壤质褐土水力特性(田间持水量、萎蔫系数和饱和导水率)和土壤物理性质(机械组成、容重和有机碳含量)的尺度外推范围进行描述, 为土壤空间变异的成因分析、水力特性与物理性质的尺度关系及其尺度转换研究奠定基础。

1 消除趋势波动分析法

一维时间或空间数据序列 DFA 可描述为:

设 X_j 为一长度为 N 的数据序列 ($j=1, 2, \dots, N$), 建立一新序列 $Y(i)$ ^[13, 14]:

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i (X_k - \langle X \rangle), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, $\langle X \rangle$ 为原序列的均值。

将新序列 $Y(i)$ 可分割成 N_s 个大小为 s 的不相交等长子区间, 因序列长度 N 不一定为 s 的整数倍, 在剖面序列的末端会存在 $< s$ 的较短部分, 为保证序列信息不丢失, 可从序列末端开始向前再划分一次, 这样共得到 $2N_s$ 个等长子区间。

对每个子区间 ν ($\nu=1, 2, \dots, 2N_s$) 的数据进行多项式回归拟合, 得到局部趋势函数 $y_\nu(i)$, $y_\nu(i)$ 可以是一次、二次或更高次多项式(分别记为 DFA1, DFA2, ...); 然后, 消除各子区间内趋势, 计算序列 $[Y(i)]$ 与拟合多项式 $[y_\nu(i)]$ 之间的方差均值:

$$F(s, \nu) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y(i) - y_\nu(i)\}^2 \quad (2)$$

式中, i 和 ν 分别与数据点和区间大小 s 相对应; $F(s, \nu)$ 可用来计算波动函数, 其中标准波动函数(二阶) $F_2(s, \nu)$ 为 $F(s, \nu)$ 在所有区间上的平方根:

$$F_2(s, \nu) = \sqrt{\frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} [F(s, \nu)]} \quad (3)$$

若将波动函数扩展为更高阶(如 q 阶), 则 q 阶波动函数为:

$$F_q(s, \nu) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} [F(s, \nu)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (4)$$

其中 q 为非零的任意实数, 当 $q=0$ 时按下式计算:

$$F_0(s, \nu) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} \ln [F(s, \nu)] \right\} \quad (5)$$

对每一 q 值, 画出 $F_q(s, \nu) \sim s$ 双对数坐标图, 若序列 X_i 存在大范围的幂律相关, 则 $F_q(s, \nu)$ 会随着 s 呈幂律升高, 即:

$$F_q(s, \nu) \propto s^{h(q)} \quad (6)$$

式中, $h(q)$ 为广义赫斯特标度函数(尺度指数)^[14], 当 $q=2$ 时为标准赫斯特指数(H)。

2 材料与方方法

2.1 土壤样品的采集与分析

研究区位于辽宁省阜蒙县他本镇节水农业示范区, 该示范区农地总面积 20 hm^2 , 东西长 500 m , 南北宽 400 m , 地势平坦, 土壤为砂壤质褐土。取样于 2004 年 10 月进行, 首先在东北—西南对角线上 (640 m) 建立一维取样剖面, 每隔 5 m 设一取样点, 共 128 个。用 100 cm^3 环刀选取深度为 $8 \sim 13 \text{ cm}$ 的原状土, 测定土壤砂粒 ($Sa, \%$)、粉粒 ($Si, \%$)、黏粒 ($Cl, \%$) 含量、容重 ($Bd, \text{g cm}^{-3}$)、有机碳含量 ($OC, \%$)、田间持水量 ($\theta_{33}, \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)、萎蔫系数 ($\theta_{-1500}, \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) 和饱和导水率 ($K_s, \text{cm h}^{-1}$)。田间持水量和萎蔫系数的测定采用压力膜仪法(水势分别为 -33 kPa 和 -1500 kPa), 机械组成、有机碳含量、导水率分别用吸管法、 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法^[17]和常水头入渗法进行测定。

2.2 研究方法

首先分析土壤水力特性和物理性质的基本分布和异质性, 再检验土壤水力特性和物理性质在取样尺度上的相关关系, 最后用 DFA 分析它们的尺度转换范围。

3 结果与讨论

3.1 描述性统计

土壤物理性质和水力特性的描述性统计见表 1。 Bd 和 θ_{33} 空间变异程度较小, 变异系数分别为 0.069 和 0.066 它们在整条取样线上均值较一致; 而 OC 和 K_s 为强变异, 变异系数均大于 0.5 主要是由于取样线中部和右尾 OC 的均值比左边高, 而 K_s 在左边有一明显上升趋势, 导致它们产生较强程度的变异; 其他特性的变异程度为中等(变异系数为 $0.108 \sim 0.227$), 主要由局部较小波动引起。偏度分析表明, θ_{33} 、 K_s 和 OC 存在正偏现象(偏度分别为 1.343 、 0.943 和 0.441 , 表 1), 且在 0.01 水平上显著, 其他变量均无明显偏态现象; 通过 K-S 正态检验

(最极端差异分析)表明,除 θ_{-33} 、 K_s 外,其他变量均符合正态分布,采用地统计学对 θ_{-33} 、 K_s 进行分析

时应进行相应的数学转换。

表 1 砂壤质褐土水力特性和物理性质的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of hydraulic characteristics and physical properties of sandy ban cinnon soil

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	最极端差异 Most extreme differences
θ_{-33}	0.288	0.417	0.325	0.022	0.066	1.343**	0.155**
θ_{-1500}	0.106	0.234	0.156	0.023	0.145	0.334	0.074
K_s	0.248	3.220	1.187	0.647	0.545	0.943**	0.112**
S_a	30.60	60.65	44.84	6.007	0.134	0.312	0.055
S_i	33.42	59.27	44.08	4.781	0.108	0.108	0.045
Cl	4.743	18.044	11.07	2.511	0.227	0.081	0.071
Bd	1.133	1.726	1.489	0.102	0.069	-0.399	0.060
Oc	0.050	3.650	1.292	0.698	0.540	0.441**	0.061

注: θ_{-33} 、 θ_{-1500} 分别为田间持水量和萎蔫系数, K_s 为饱和导水率, S_a 、 S_i 、 Cl 分别为砂、粉、黏粒含量, Bd 为容重, Oc 为有机碳含量。Notes: θ_{-33} and θ_{-1500} field capacity and wilting point respectively; K_s saturated hydraulic conductivity; S_a , S_i and Cl sand, silt and clay content respectively; Bd , bulk density; Oc organic carbon content. ** 表明在 $p < 0.01$ 上显著 **, Significant at $p < 0.01$

3.2 土壤水力特性与物理性质的相关关系

土壤水力特性与物理性质的相关性检验见表 2。在测定尺度上, θ_{-33} 与容重 (Bd)、有机碳含量 (Oc) 在 0.05 水平上显著相关, 相关系数分别为 -0.513 和 0.228; θ_{-1500} 与黏粒含量 (Cl)、 Bd 、 Oc 显著相关 (相关系数分别为 0.224、-0.402 和 0.229), 而 K_s 与所有物理性质均呈显著相关。由于各变量的尺度特性不同, 测定尺度上的强相关性并不意味着在其他尺度上也一定强相关。

表 2 测定尺度上砂壤质褐土水力特性与物理性质的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between hydraulic characteristics and physical properties of sandy ban cinnon soil at the measurement scale

项目 Item	θ_{-33}	θ_{-1500}	K_s
S_a	0.034	0.025	0.256*
S_i	-0.022	-0.123	-0.214*
Cl	-0.040	0.224†	-0.261*
Bd	-0.513*	-0.402*	-0.650*
Oc	0.228*	0.229†	0.235*

注: * 表示在 $p < 0.05$ 上显著。Note: *, Significant at $p < 0.05$

3.3 DFA 分析

线性 (DFA1)、二次幂 (DFA2)、三次幂 (DFA3) 和四次幂 (DFA4) 消除趋势波动分析结果见图 1。随着多项式次幂 (1~3) 的提高, 消除非平稳性效果亦逐渐提高。根据 DFA 与尺度双对数图的回归系数和标准差比较, 三次幂与四次幂相差甚微, 因此四次幂足以消除大部分趋势。虽然次幂数提高消

除趋势的效果会更好, 但一般认为, DFA 仅在一定次幂数上可靠, 过高有可能改变序列的内在格局, 由于 n 次多项式可消除所有小于 n 次的趋势, 故本研究采用四次多项式的消除趋势序列进行尺度分析。

所有特性双对数图拟合的决定系数均大于 0.86, 表明波动函数和尺度呈近幂律相关; 拟合度和尺度指数随尺度发生变化, 表明不同尺度范围有不同尺度特性如多重尺度特性。

利用分段逐步回归拟合不同尺度下的尺度指数, 可将尺度分为 A、B、C 3 个区 (见表 3)。根据 Baumert 等的描述^[18], 在 A 区, 所有特性的尺度指数均大于 1, 表明波动与尺度的关系呈非幂律衰减, 不能进行尺度规律研究, 这可能来源于土壤特性强烈的空间相关; 且所有特性在该区的范围相似, 为 50~55 m; B 区的尺度指数均为 0.5~1, 表明所有序列在该区有持久性和大范围自相关, 即与 A 区相比, 以幂律为基础的尺度转换和预测具有更高精度, 该区中 θ_{-33} 、 K_s 、 Bd 和 Oc 范围较大 (≥ 125 m), 其他特性的范围较小 (< 100 m)。C 区的尺度指数接近 0.5 (Cl 除外), 表明在这个尺度内土壤特性呈纯随机分布, 在这个区域 (尺度) 不适合进行基于幂律的尺度转换和水力特性预测。

根据以上解释, 区域 A 的尺度太小, 很难从强烈的空间依赖性中找出规律, 因而只能反映局部尺度特征, 即该尺度上的波动格局不能用简单尺度定

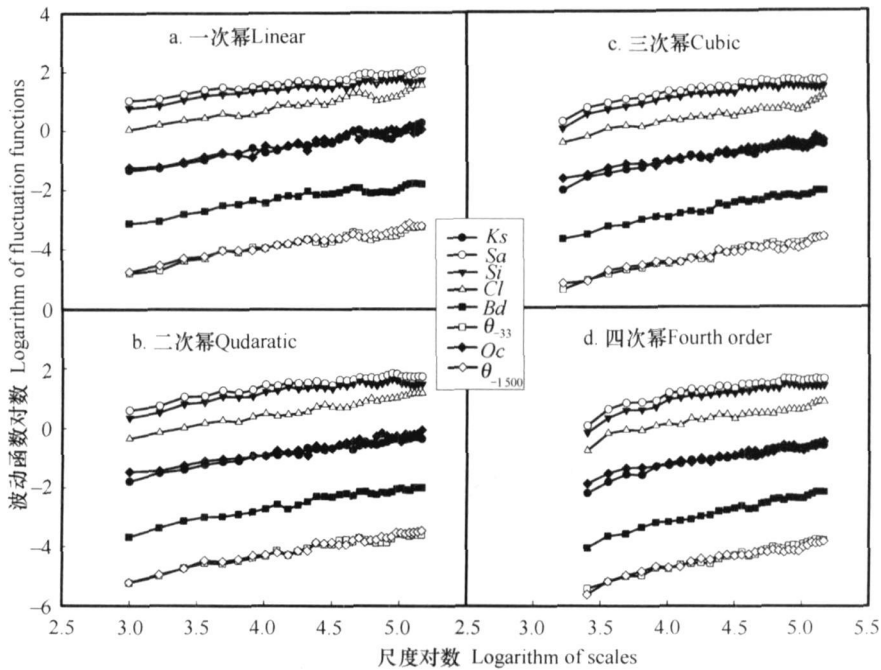


图 1 不同次幂多项式消除趋势的波动函数双对数图

Fig 1 Double logarithmic plots of the fluctuation function that are detrended using different power of polynomials

表 3 不同空间相关格局区域上的尺度指数

Table 3 Scaling exponents for regions different in spatial correlation pattern

项目 Item	A 区 Region A		B 区 Region B		C 区 Region C	
	S (m)	$h(4)$	S (m)	$h(4)$	S (m)	$h(4)$
θ_{-33}	0~ 55	1. 15	55~ 155	0. 84	> 155	0. 54
θ_{-1500}	0~ 55	1. 52	55~ 95	0. 85	> 95	0. 61
K_s	0~ 50	1. 64	50~ 125	0. 62	> 125	0. 49
S_a	0~ 50	1. 52	50~ 85	0. 68	> 85	0. 52
S_i	0~ 50	1. 59	50~ 85	0. 70	> 85	0. 44
C_l	0~ 50	1. 42	50~ 85	0. 61	> 85	0. 99
B_d	0~ 50	1. 62	50~ 125	0. 87	> 125	0. 54
O_c	0~ 50	1. 37	50~ 135	0. 62	> 135	0. 55

注: S为尺度; $h(4)$ 表示 $q=4$ 时的尺度指数 Note: S, scales $h(4)$, scaling exponent at $q=4$

律(如幂律)进行扩展。C区尺度太大,往往由于其他外在因子(如地形、土壤侵蚀等)的引入而忽略了主要因子,因此在该尺度上不能进行尺度转换研究。只有B区能抓住所有控制因子引起的内在波动格局,并且可以不受空间相关的束缚,即在该尺度范围内的结果可进行尺度外推。田间持水量、饱和导水率、容重和有机碳含量可外推尺度范围较大,分别为 55~ 155、50~ 125、50~ 125和 50~ 135 m; 萎蔫系数的外推尺度范围为 55~ 95 m; 砂粒、粉

粒和黏粒含量的可外推尺度范围较小,为 50~ 85 m。

4 结 论

1) 土壤水力特性、物理性质在不同尺度上空间结构存在不一致性。尺度太小只能反映局部尺度特征;而尺度太大时又呈纯随机分布,从而不能进行空间变异分析和尺度转换。只有在一定的尺度

范围内才能进行尺度转换(外推)。所研究砂壤质褐土的田间持水量、饱和导水率、容重和有机碳含量可外推尺度范围较大,分别为 55~155、50~125、50~125和 50~135 m。萎蔫系数的可外推尺度居中,为 55~95 m。砂粒、粉粒和黏粒含量的可外推尺度范围较小,为 50~85 m。

2) 由于物理性质与土壤水力特性空间变异和尺度转换的范围不同,因此在应用土壤物理性质与土壤水力特性之间关系(如土壤转换函数, PTF)研究水力特性的空间变异时,要考虑它们的空间尺度因素,在测量范围内的相关性并不一定适用于其他尺度,如将物理点或农田尺度上的相关性放大至区域范围,由于地形、土壤侵蚀等因子的引入,这种关系可能会发生变化。因此今后研究重点在于研究土壤水力特性与其他性质之间的空间尺度关系。

参 考 文 献

- [1] Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. *Geoderma*, 2006, 134: 440~452
- [2] Wilson G V, Alfonsi J M, Jardine P M. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of two forested watersheds. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1989, 53: 679~685
- [3] Bosch D D, West L T. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1998, 62: 90~98
- [4] Sobieraj J A, Elsenbeer H, Cameron G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *Catena*, 2004, 55: 49~77
- [5] 姜娜, 邵明安, 雷迁武. 水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 2005, 42(6): 904~908. Jiang N, Shao M A, Lei Q W. Fractal dimension and spatial variability of soilwater infiltration properties on natural slope in a waterwind erosion interlaced region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 904~908
- [6] Liu J L, Xu S H. Applicability of fractal models in estimating soilwater retention characteristics from particle size distribution data. *Pedosphere*, 2002, 12(4): 301~308
- [7] 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. *土壤*, 2003, 35(1): 30~33. Ou M M, Wang J W. Review of research on soil spatial variability (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(1): 30~33
- [8] Kravchenko A N, Boast C W, Bueck D G. Multifractal analyses of soil properties. *Agron. J.*, 1999, 91: 1033~1041
- [9] Seuront L, Lagadeuc F S Y, Schertzer D, *et al*. Universal multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns. Example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. *J Plankton Res.*, 1999, 21: 87
- [10] Bhattacharya R N, Gupta V K, Waymire E C. The Hurst effect under trends. *J App Probab.*, 1983, 20: 649~662
- [11] Koscielny-Bunde E, Kantelhardt J W, Braun P, *et al*. Long-term persistence and multifractality of river runoff records. Detrended fluctuation studies. *J Hydrol.*, 2006, 322: 120~137
- [12] Peng C K, Havlin S, Stanley H E. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos*, 1995, 5(1): 82~87
- [13] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, *et al*. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, 2002, 316: 87~114
- [14] Telesca L, Colangelo G, Lapenna V, *et al*. Fluctuation dynamics in geoelectrical data and investigation by using multifractal detrended fluctuation analysis. *Phys. Lett.*, 2004, 332: 398~404
- [15] Kiraly A, Janosi A M. Detrended fluctuation analysis of daily temperature records. Geographic dependence over Australia. *Metrol Atmos Phys.*, 2005, 88: 119~128
- [16] Grau-Carles P. Long-range power-law correlations in stock returns. *Physica A*, 2001, 299: 521~527
- [17] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In*: Pages A L, Miller R H, Keeney D R, eds. *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy No. 9, 2nd Ed. Wisconsin, USA: Madison, 1982: 577~595
- [18] Baumert M, Brechtel L M, Juergen L, *et al*. Scaling graphs of heart rate time series in athletes demonstrating the VLF, LF and HF regions. *Physiol Meas.*, 2006, 27: N35~N39

SPATIAL SCALING EFFECTS OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND PHYSICAL PROPERTIES OF SANDY LOAM CINNAMON SOIL —DETRENDED FLUCTUATION ANALYSIS

Shu Qiasheng^{1,2,3} Liu Zuoxin^{1,3†} Zhang Zikun^{1,2,3} Wang Zhenying^{1,3}

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016 China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China)

(3 Liaoning Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Shenyang 110016 China)

Abstract Spatial heterogeneities of soil hydraulic characteristics and soil physical properties and their relationship may be different at different scales. Scaling analysis of soil hydraulic characteristics (field capacity, wilting point and sat

urated hydraulic conductivity) and physical properties (particle size distributions, bulk density and organic carbon content) was carried out using the Detrended Fluctuation Analysis (DFA) method. Results show that spatial variability analysis and scaling transformation (e.g. up-scaling) could be performed only within a certain range of scales. The fluctuation pattern cannot be up-scaled when the scale is too small because it can not get free from spatial interdependency and hence reflects local scale features only. But when the scale is too large scale, it is hard to define dominant factors including those with certain characteristic length scale. For the sandy loam cinnamon soil in the study, the ranges of up-scaling for field capacity, hydraulic conductivity, bulk density and organic carbon content are relatively large, being 55~155, 50~125, 50~125 and 50~135 m, respectively, but small for sand, silt and clay contents, being 50~85 m, indicating that it is essential to determine the range of up-scaling before spatial scaling transformation is performed.

Key words Soil hydraulic characteristics; Spatial heterogeneity; Scaling effects; Detrended Fluctuation Analysis