

多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理及其应用

丁启朔^{1,2}, 丁为民¹, 潘根兴²

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学资源与环境研究所, 南京 210095)

摘要: 在数学描述上, 应力小波破碎分析具有小波分析相同的形式, 因此, 能够将小波分析的理论进行重新阐释, 以使其适用于破碎研究。结果发现, 应力小波方法在描述破碎体结合面的结合强度方面具有特殊性。同时表明土壤破碎体分形维数是土壤结构的宏观统计学指标, 而土壤破碎体的单粒能量消耗值是土壤结构的微观应力小波指标, 只有综合使用这两个指标才能够全面地评价土壤的结构状态。在不同季节进行相同的机械耕作处理下, 南京水田农地的耕作层土壤结构表现差异明显。秋季耕作土壤的应力小波指标明显优于春季耕作的土壤, 同时, 秋季耕作土壤的分形维数也远大于春季耕作的土壤。

关键词: 土壤结构, 耕作力学, 应力小波, 分形维数

中图分类号: S152.2, S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-12-0132-05

丁启朔, 丁为民, 潘根兴. 多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理及其应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 132—136.

Ding Qishuo, Ding Weimin, Pan Genxing. Theory and application of multi-scale and multi-resolution fragmentation method for soil structure evaluation [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 132—136.(in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤的结构或者空间变异性主宰着土壤的所有物理特性, 从而决定着其功能。正是由于结构的存在才能够允许水与气体在土壤中传递并为土壤生物提供一个适合的生存空间^[1]。然而直到目前, 对于土壤物理构架的变异性的准确描述仍然无法通过实验和理论的方法得以解决^[2]。

对于土壤的耕作研究来说, 由于大田控制试验的固有弊端, 现代土壤耕作力学研究试图从机制上弄清耕作与土壤结构演变之间的关系^[3]。这样就首先要求提供合适的指标用于量化评价耕作前后土壤的结构状态。但是, 已进行的土壤学的土壤质量评价工作主要集中于土壤的农业资源、生态、生物学等方面^[4-9], 而很少关注土壤的耕作研究。因此, 目前的土壤耕作研究中通常使用一组参数(土壤破碎度、圆锥指数、容重、饱和导水率、孔隙度等)进行耕后土壤质量的评价^[10-15]。这样就造成在评价耕作机具的作业效果、选择最佳的工作参数、改进耕作机具的设计时没有一种被普遍接受的土壤结构的测试与评价方法。

关系到土壤耕作的一个重要指标是土壤的破碎度。破碎是土壤在外加压力作用下从整体状态分离变成较小土块的过程^[16]。Arshad^[17]等人将土壤破碎定义为土壤沿其自然的脆弱界面的分离。将土壤破碎到不同的尺度并对其进行分析能够在一定程度上展示土壤结构的特征。通常用于描述土壤破碎体的指标有平均重量直径

(MWD)^[18]、平均几何直径(GMD)^[19]等。这些指标又被转化成分布模型, 如 Gaudin-Schuhmann^[20]、Todin-Rammeler^[21,22]、对数—正态分布^[19,23]。这种转化的优点是明显的: 分布模型的特征有可能关连到土壤结构的某些重要信息。最近, 分形学已被成功地运用到土壤粒度的质量—尺度分布的描述中去^[24,25]。

除了土壤破碎体的分布特征之外, 土壤结构的稳定性是耕作研究重视的另一个指标。土壤的结构稳定性是指在施加机械压力或者冲击能量之后土壤结构单元能够抵抗外部作用而不发生破碎变形的能力。破碎变形是土壤颗粒之间结合界面的破坏, 用于将一定的结合界面分离开来的能量叫做表面结合能, 因此, 材料的任何界面的结合能都等于将其分开的冲击能量^[26]。

这些结论说明一个事实: 土粒尺度以及颗粒间的结合力是土壤结构的两个重要方面。用于土壤耕作力学研究的土壤质量评价指标应当同时注重这两个方面^[27]。为此, 本文探讨将多尺度多分辨率原理应用于土壤破碎分析的理论基础及其应用。

1 多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理

以尺度控制的土块破碎过程开始于原始尺度 D_0 的土块, 在经过一个四级破碎的过程时, 每一级破碎都由相应尺度的筛子筛分控制。如, 当破碎体全部通过 ΦD_1 的筛子后, 第一级破碎结束, 经过 ΦD_2 尺度的筛子后, 第二级破碎结束, 依次类推。

从物理直观上看, 可将待破碎的土体视为由破碎体相互结合的整体, 因此, 将破碎体相互间分离开来就需要消耗相应的破碎能量, 这一能量与破碎体相互间结合面的尺度相关, 随着尺度的降低, 所需的能量随之变小。以尺度控制的这种筛分过程与小波分析有相同的表现形式^[28, 29]。

收稿日期: 2007-03-20 修订日期: 2007-09-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20080431104)

作者简介: 丁启朔(1968—), 男, 江苏邳州人, 副教授, 博士, 主要从事土壤耕作力学研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。

Email: qsding@njau.edu.cn

在数学上, 小波分析的实质表现为下面的一个积分关系:

$$Wf(u, s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (1)$$

这个积分关系可以被重新阐释并应用于土壤破碎的分析中去:

可令 $f(u, s)$ 代表原待破碎土体的能量构成 (能量信号);

而 $\psi_{u,s} = \psi\left(\frac{t-u}{s}\right)$ 可被视为冲击能量小波, 它对应于落锤下落对土体施加的冲击能量。当该冲击能量与破碎体的表面结合能量相匹配时, 土壤破碎体就被分离出来, 这样就在物理形式上符合式 1 的积分原理。

另外, 在使用一个 j 尺度的筛子对破碎体进行筛分时, 我们可将该筛分过程进行如下表达:

$$V'_{j-1} = V'_j \oplus W'_j \quad (2)$$

式中 V'_{j-1} ——某一级破碎后的总破碎体集合; V'_j ——在筛分过程中留在 j 级筛片上的破碎体集合; W'_j ——该筛片以下的土壤破碎体集合, 这一表达又与小波分析所进行的空间分解或滤波处理 ($V'_{j-1} = V'_j \oplus W'_j$) 具有完全一致的形式。

因此, 一个多级筛分的过程使用尺度逐一减小的组合筛, 从而满足类似于信号“滤波”的处理:

$$\begin{array}{ccccccc} V_0 & \rightarrow & W_1 & \rightarrow & W_2 & \cdots & W_{i-1} & \rightarrow & W_i & \cdots \\ & \searrow & & & \searrow & & & & \searrow & \\ & & V_1 & & V_2 & & \cdots & & V_i & \cdots \end{array}$$

其中 V_i 是留在 i 级筛片上的破碎体集合, W_i 是 i 级筛片下的破碎体集合。

最后, 从能量的角度看, 如果在经过某一级的破碎后使用级筛筛分, 那么, 该级破碎所消耗的总能量 E 就是各破碎体表面结合能量 e_i 的总和, 这一关系可由下式表示:

$$E_j = N_{j1} \cdot e_1 + N_{j2} \cdot e_2 + \cdots + N_{ji} \cdot e_{ji} \quad (3)$$

式中 E_j —— j 级破碎的总能量; N_{ji} ——破碎体经级筛筛分时留在筛孔尺度为 i 的筛面上的破碎体颗粒数; e_{ji} ——尺度为 i 的破碎体的表面结合能。

因此, 一个使用 4 级级筛进行筛分的 5 级破碎过程的能量构成可以由下面的方程组表示:

$$\begin{aligned} N_{11} \cdot e_1 + N_{12} \cdot e_2 + N_{13} \cdot e_3 + N_{14} \cdot e_4 + M_1 \cdot k &= E_1 \\ N_{22} \cdot e_2 + N_{23} \cdot e_3 + N_{24} \cdot e_4 + M_2 \cdot k &= E_2 \\ N_{33} \cdot e_3 + N_{34} \cdot e_4 + M_3 \cdot k &= E_3 \\ N_{44} \cdot e_4 + M_4 \cdot k &= E_4 \\ M_5 \cdot k &= E_5 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 k ——4 号筛筛面以下的破碎体比破碎能 (由于经过 4 号筛的破碎体不再继续筛分, 在操作中只能以其质量 M 进行计算, 因此单位为 J/g); M ——该级破碎过程生成的 4 号筛面以下的破碎体总质量。这样, 该方程组就实现了破碎能量的分解, 从而可以获取不同尺度下破

碎体的表面结合能。

2 多尺度多分辨率破碎法评价土壤结构的应用

为了便于验证, 笔者于 2004—2005 年进行了田间试验, 研究土壤在机械耕作后不同的土壤动力学过程对于耕作层土壤结构的影响^[30]。

田间试验在江苏南京地区盘城镇农地进行, 比较水稻田在秋季耕作与春季耕作所形成的土壤结构的差异。试验农地以 2×2 区块化, 每块大小为 $40 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。所有的耕作都由旋耕机完成, 但是两块地在水稻收获后立即耕作, 作业日期为 2004 年 11 月 8 号, 另外两块在初春耕作, 作业日期为 2005 年 2 月 18 号, 平均耕深为 12 cm。在 2005 年 5 月 22 号于实验农地随机取样。共从秋季耕作的农地取出 9569 g 土样, 从春季耕作的农地取出 6367 g 土样, 将取出土样带回实验室风干。

取样土壤的实验室分析从 2005 年 7 月 11 日开始, 分析内容包括利用常规的分形学方法分析取样土壤的颗粒分形维数, 以及使用本文的应力小波方法计算取样土壤的多尺度多分辨率指标。

2.1 不同处理方式下土壤颗粒的分形维数表现

为了便于将应力小波方法与分形方法进行比较, 首先计算土壤颗粒的分形维数: 将土样分别过 32、16、8、4、2、1、0.5、0.25 mm 的分级筛, 获取不同尺度下的土壤样本, 然后进行计数, 得到不同尺度下的土样颗粒数量。

土壤颗粒分形维数按式 5 计算, 该式已被 Hallett 等人^[31]以及 Gulser 等人^[32]应用于土壤的分形研究中去:

$$N_i = c \bar{x}_i^{-D} \quad (5)$$

式中 N_i ——存于 i 级筛面上的土壤颗粒体的比累积数量, N_i 按式 (6) 计算; \bar{x}_i ——存在于 i 级筛面上土壤颗粒体的平均尺度, 平均尺度的计算方法是 $(x_i + x_{i-1}) / 2$; c ——常量; D ——破碎分形维数, D 的数值通过拟和 $\log N_i$ 与 $\log \bar{x}_i$ 获得, 是拟和曲线的斜率。

$$N_i = \sum_{i=1}^k n_i / M \quad (6)$$

式中 n_i ——土样在每个尺度级别上的颗粒数目; M ——被处理土样的总质量。

经过筛分的秋季与春季耕作的取样土壤在不同尺度范围内的质量与数量分布列于表 1。依据式 (1) 的关系, 得到 $\log N_i$ 与 $\log x_i$ 的对应关系图 1。图中显示, 秋季耕作的土壤颗粒分形维数 ($D=2.46$) 明显高于春季耕作的土壤颗粒分形维数 ($D=1.86$)。

高的土壤颗粒分形维数表明土壤具有更高的破碎度, 即土壤的颗粒尺度分布更多地为小尺度的土壤团聚体占据。而较低的土壤颗粒分形维数表明较大尺度的土壤团聚体所占比重较大^[33]。由此可见, 机械耕作只能在一定程度上造成土体的破碎, 而冬季的土壤动力学过程造成秋季耕后土壤更程度的破碎。

表 1 每级筛面上的土壤颗粒质量与数量分布

Table 1 Mass and number of soil fragments above each size scale

颗粒尺度 /mm	质量/g		数量	
	秋季	春季	秋季	春季
>32	2790	1790	58	46
16	1770	2180	315	355
8	730	1248	800	1252
4	575	1437	3664	15135
2	263.3	1283	20676	116109
1	71.6	483.6	30181	176489
0.5	93.5	705.5	138754	1420490
0.25	40.4	261.6	529180	5104390

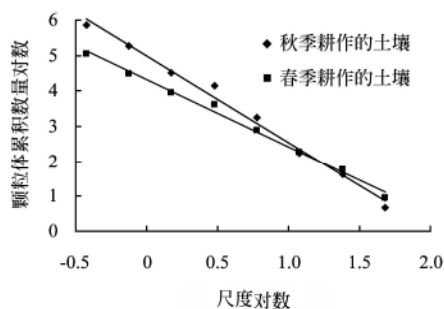


图 1 土壤颗粒的数量 - 尺度的对数关系

Fig.1 Logarithmic relationship between soil number and size

2.2 不同处理方式下的土壤应力小波表现

多尺度多分辨率破碎分析的过程如下：将从秋季耕作农地获得的土样过 64 mm 和 32 mm 的土壤筛，并取出留在 32 mm 筛面上的土壤样本，并再次从中取出两个子样， A_1 和 A_2 ，分别为 125.3 g 和 101.5 g。利用同样的方法，获取春季耕作土壤的两个子样， S_1 和 S_2 ，分别为 154.2 g 和 115.8 g。然后，开始对四个子样进行破碎分析。破碎的过程分五步进行，即对单个子样实施破碎，直到其完全通过 16 mm 土壤筛并进行筛分；然后进行下一级破碎，令其完全通过 8 mm 土壤筛；再次按照同样的要求，直到第五级破碎完成。通过破碎过程的筛分及计数，获得不同尺度土壤破碎颗粒体的质量与数量。

A_1 样本的第一级破碎使用了 57 次冲击，平均冲击行程为 10.6 cm；第二级破碎使用了 49 次冲击，平均冲击行程为 10.91 cm；第三级破碎使用了 156 次冲击，平均冲击行程为 11.47 cm；第四级破碎使用了 135 次冲击，平均冲击行程为 20.44 cm；第五级破碎使用了 100 次冲击，平均冲击行程为 20.53 cm；冲击破碎过程中的质量与破碎体尺度及数量分布列于表 2。

其中，单级破碎过程所需的总冲击能量 E 由式 (7) 计算：

$$E = mg \sum h_i \quad (7)$$

式中 m ——冲击锤的质量，为 200 g； g ——重力加速度； h_i ——是 i 次冲击的行程。

土壤破碎体的单粒能量消耗由式 (4) 计算，得到：

$$G \cdot N = E \quad (8)$$

式中 $G = (e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ k)'$ ， e_1 、 e_2 、 e_3 和 e_4 ——破碎后 16 至 8、8 至 4、4 至 2、2 至 1 mm 尺度范围的土壤颗粒体消耗的

破碎能级系数， J ； k ——1 g 尺度在 1 mm 以下的破碎土体所消耗的破碎能级系数， J/g ； N ——土体破碎全过程中土壤破碎体的尺度分布的数量矩阵，对于 A_1 来说，这一矩阵为：

$$N = \begin{pmatrix} 62 & 186 & 1236 & 1705 & 13.99 \\ 0 & 236 & 690 & 898 & 3.23 \\ 0 & 0 & 2580 & 2565 & 19.65 \\ 0 & 0 & 0 & 8898 & 41.98 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 46.45 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$E = (11.85 \ 10.48 \ 35.07 \ 54.09 \ 40.24)'$ ， E 中的每一个数值对应于不同破碎级别所消耗的总冲击能量。求解该线性方程得到：

$G = (-0.19 \ 0.01031 \ 0.005015 \ 0.001991 \ 0.8663)'$ 按照同样的方法，得到 A_2 、 S_1 和 S_2 的单粒能量消耗矩阵 G_s 分别为： $(-0.1227 \ 0.007047 \ 0.00477 \ 0.002747 \ 0.827)'$ ； $(0.2138 \ 0.03336 \ 0.01039 \ 0.004018 \ 1.1414)'$ ； $(0.2936 \ 0.01603 \ 0.01188 \ 0.00731 \ 1.0479)'$ 。

以上数据显示，春季耕作的土壤破碎体的单粒能量消耗高于秋季耕作的土壤，而且在所有的尺度上都体现出同样的特点。因此可以推断，虽然机械耕作能够将土壤松动，起到改善苗床土壤环境的效果，但是其在土堡尺度上对于土壤结构的改善效果是不理想的。与此不同，冬季的土壤动力学过程能够在土堡尺度上明显改善其结构状态，这一改善通过降低土壤破碎体的单粒能量消耗体现出来。然而，今后我们进一步需要弄清的问题是冬季的土壤动力学过程是如何造成这样的效果的、以及这一过程对于土堡尺度上土壤结构的改善（主要是降低土粒相互间的表面结合能）是否能够对作物生长起到积极的作用。

表 2 每级土体破碎获得的土壤颗粒相关指标

Table 2 Related indices of soil fragments from pulverization

	质量/g	总能量/J	尺度/mm	总质量/g	颗粒数量
第一级破碎	125.3	11.85	16	63.71	62
			8	26.54	186
			4	15.75	1236
			2	5.31	1705
			1	7.32	12872
			0.5	6.67	
第二级破碎	63.71	10.48	8	48.72	236
			4	9.43	690
			2	2.33	898
			1	3.07	6092
			0.5	0.16	
第三级破碎	75.26	35.07	4	47.86	2580
			2	7.75	2565
			1	9.04	17939
			0.5	10.61	
第四级破碎	73.04	54.09	2	31.06	8898
			1	22.02	25754
			0.5	19.96	
第五级破碎	46.45	40.24	1	28.5	33333
			0.5	17.95	

4 个子样土壤破碎体的单粒能量消耗值示于表 3。表中显示, 尽管 4 个土样能够表现出一定的变化趋势, 但是, 在 8~16 mm 尺度区间秋季耕作土壤的单粒能量消耗出现的负值难于被解释。

表 3 单粒土体的破碎能
Table 5 Per fragment fragmentation energy

	e_1 /J	e_2 /J	e_3 /J	e_4 /J	k /J · g ⁻¹
A ₁	-0.1900	0.010310	0.005015	0.001991	0.9663
A ₂	-0.1227	0.007047	0.004770	0.002747	0.8270
S ₁	0.2138	0.033360	0.010390	0.004018	1.1414
S ₂	0.2936	0.016030	0.011880	0.007310	1.0479

3 结 论

应力小波的破碎分析方法在破碎过程与筛分操作方面完全符合小波分析理论的形式与要求, 这种符合体现在尺度、分辨率等多个方面。因此, 应力小波分析方法不仅具有严格的数学阐释而且适用于土壤耕作研究。

明确描述土壤结构需要两个基本的参数: 土壤破碎体分形维数与土壤破碎体的单粒能量消耗值。这两个基本参数互不相关: 一个是属于统计学的, 而另一个是属于力学的。由于土壤的机械耕作同时关联到统计的和力学的这两个方面, 因此综合这两个参数才能够完整地评价土壤机械耕作系统的性能、指导合理的土壤耕作机具的设计。

应力小波与分形学指标同时显示, 土壤的冬季动力学过程对于土壤的结构起到明显的改善效果: 前者显示了土垡尺度上的土壤结构在力学表现方面的改善, 适用于单个土壤颗粒的力学性质描述; 后者显示了土壤在颗粒尺度—数量分布上的改善, 是土壤颗粒总体的统计学性质描述。这两个参数反映出的结果表明, 机械耕作并不是一个完全有效的改善苗床土壤结构的途径, 必须重视农业大田土壤的过程管理, 在调控土壤的结构方面还需要重视气候环境因子的影响。

【参 考 文 献】

- [1] Dexter A R. Physical properties of tilled soils[J]. Soil Till Res, 1997, 43: 41—63.
- [2] Young I M, Ritz K. Tillage, habitat space and function of soil microbes[J]. Soil Till Res, 2000, 53: 201—213.
- [3] 丁启朔, 丁为民. 现代土壤机械耕作研究的综述[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 149—153.
- [4] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 131—134.
- [5] 胡春胜. 土壤质量诊断与评价理化指标及其应用[J]. 生态农业研究, 1999, 7(3): 16—18.
- [6] 孙 波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展, 1996, 18(2): 118—128.
- [7] 俞 慎, 李 勇, 王俊华, 等. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 413—422.
- [8] 赵其国, 孙 波, 张桃林. 土壤质量与持续环境, 土壤质量的定义与评价方法[J]. 土壤, 1997, (3): 113—120.
- [9] 刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较[J]. 自然资源相比, 2003, 23(3): 414—420.
- [10] Dam R F, Mehdi B B, Burgess M S E, et al. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada[J]. Soil Till Res, 2005, 84(1): 41—53.
- [11] Chen Y, Tessier S, Monero F, et al. Short-term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil[J]. Soil Till Res, 2005, 82(2): 161—171.
- [12] Osunbitan J A, Oyedele D J, Adekalu K O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria[J]. Soil Till Res, 2005, 82(1): 57—64.
- [13] Fabrizio K P, Garcia F O, Costa J L, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina[J]. Soil Till Res, 2005, 81(1): 57—69.
- [14] Licht M A, Al-Kaisi M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties[J]. Soil Till Res, 2005, 80(1-2): 233—249.
- [15] Anken T Weisskopf P, Zihlmann U, et al. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland[J]. Soil Till Res, 2004, 78(2): 171—183.
- [16] Perfect E, Diaz-Zorita M, Grove J H. A prefractal model for predicting soil fragment-size distributions[J]. Soil Tillage Res, 2002, 64: 79—90.
- [17] Arshad M A, Lowery B, Grossman B. Physical test for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America[M]. Madison, WI Press, 1996: 123—141.
- [18] Stirk G B. A simplified technique for the determination of soil aggregation[J]. Soil Sci, 1958, 86: 133—135.
- [19] Gardner W R. Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1956, 20: 151—153.
- [20] Baldock J A, Kay B D. Influence of cropping history and chemical treatments on the water-stable aggregation of a silt loam soil[J]. Can J Soil Sci, 1987, 67, 501—511.
- [21] Irani R R, Callis C F. Particle Size: Measurement, Interpretation, and Application[M]. Wiley Press, New York, 1963: 165.
- [22] Perfect E, Kay B D, Ferguson J A, et al. Comparison of functions characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil[J]. Soil Till Res, 1993, 28, 123—139.
- [23] Wagner L E, Ding D. Representing aggregate size distributions as modified lognormal distributions[J]. Trans ASAE, 1994, 37: 815—821.
- [24] Perfect E. Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review[J]. Engineering Geology, 1997, 48: 185—198.
- [25] Gimenez D, Perfect E, Rawls W J, et al. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review[J]. Engineering Geology, 1997, 48: 161—183.
- [26] Berntsen R, Berre B. Soil fragmentation and the efficiency of tillage implements[J]. Soil Till Res, 2002, 64: 137—147.
- [27] 丁启朔. 应力小波: 利用冲击破碎法的土壤结构多尺度多分辨率分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [28] Ding Qishuo, Ding Weimin. Stress wavelets: Multi-scale and multi-resolution assessment of soil structure by the drop-shatter method[J]. Soil and Tillage Research, 2006,

- 88(1): 168—179.
- [29] Ding Qishuo, Ding Weimin, Ji Changying. Wavelets and scale-controlled fragmentation plus sieving process: A preliminary mathematical interpretation[J]. *Current Development in Theory and Applications of Wavelets*, 2007, 1(2): 183—195.
- [30] Ding Qishuo, Ding Weimin. Comparing stress wavelets with fragment fractals for soil structure quantification[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(2): 316—323.
- [31] Hallett P D, Dexter A R, Seville J P K. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye[J]. *Soil Till Res*, 1995, 33: 163—184.
- [32] Gulser C. Effect of forage cropping treatments on soil structure relationships with fractal dimensions[J]. *Geoderma*, 2006, 131: 33—44.
- [33] Perfect E, Rasiah V, Kay B D. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 1407—1409.

Theory and application of multi-scale and multi-resolution fragmentation method for soil structure evaluation

Ding Qishuo^{1,2}, Ding Weimin¹, Pan Genxing²

(1. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;*

2. *Institute of Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: The stress-wavelets method for soil fragmentation analysis has the same mathematical form with the wavelets method. Therefore, the wavelets theories can be re-interpreted, and then it applies to soil fragmentation research. Speciality was revealed from the results by applying stress-wavelets method to describe soil surface contacting energies. It also showed that fragment fractal dimension was a macroscopic statistical index for soil structure, while per fragment energy consumption was related to microscopic stress-wavelets index. A combination of those two indices gave a comprehensive evaluation of soil structural properties. The structure of paddy soil in Nanjing had significant difference under the same treatment but in different seasons. The stress-wavelets index was well improved in autumn-tilled soil when compared with spring-tilled soil, and the fragment fractal dimension was also higher in autumn-tilled soil.

Key words: soil structure, tillage mechanics, stress-wavelets, fractal dimensions