

保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响

周 虎, 吕贻忠, 杨志臣, 李保国

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:【目的】研究华北平原保护性耕作制度对土壤团聚数量、大小和稳定性的影响。【方法】本文采集了华北平原河北栾城试验站经过4年保护性耕作(旋耕和免耕)与传统耕作(翻耕)处理下原状土壤样品,测定了土壤容重、有机质和粘粒含量等物理性质,重点应用干筛和湿筛法分析了土壤团聚体数量、分布和分形维数。【结果】表层(0~5 cm)土壤容重的大小顺序为免耕>旋耕>翻耕,免耕使表层土壤的容重显著增加;旋耕与翻耕的表层土壤容重差异不显著,但旋耕使10~20 cm的土壤容重明显增加。干筛法分析表明,免耕处理下0~10 cm土层大于0.25 mm团聚体含量、平均重量直径(mean weight diameter, *MWD*)和几何平均直径(geometric mean diameter, *GMD*)均高于旋耕处理和翻耕处理,而旋耕与翻耕处理间没有显著的差异;湿筛法分析表明,土壤中的团聚体以非水稳性团聚体为主,水稳性团聚体的*MWD*和*GMD*大小顺序为免耕>旋耕>翻耕;在0~5 cm土层内免耕处理的水稳性团聚体分形维数(*D*)最小,而旋耕处理下5~10 cm的分形维数*D*值显著高于翻耕、免耕处理,说明旋耕使得该层内土壤团聚体的稳定性降低。【结论】免耕处理促进表层土壤团聚体的形成,并提高了其稳定性;旋耕和翻耕处理由于对土壤的强烈扰动,降低了耕作深度内土壤团聚体的团聚度和稳定性;在10~30 cm 3种耕作处理间没有显著差异。

关键词: 保护性耕作; 团聚体; 分形维数; 平均重量直径; 几何平均直径

Effects of Conservation Tillage on Soil Aggregates in Huabei Plain, China

ZHOU Hu, LÜ Yi-zhong, YANG Zhi-chen, LI Bao-guo

(Resource and Environment College, China Agricultural University, Beijing 100094)

Abstract: 【Objective】 Tillage will greatly influence the aggregation and stability of soil aggregates. The paper studied the effects of conservation tillage on the soil characteristics. 【Method】 Soils from no-tillage (NT), rotary tillage (RT) and conventional tillage (Moldboard tillage, CT) in plots of 4 years (2001-2005) at the Luancheng Research Station in Hebei Province were sampled. The aggregates amount, size distribution and fractal dimension were examined by dry and wet sieving methods. 【Result】 Results indicated that NT significantly increased the topsoil (0-5 cm) bulk density (BD), while RT maintained lower BD. CT significantly increased at 10-20 cm. Dry sieving results showed that NT was higher in macro-aggregate content ($R_{0.25}$), mean weight diameter (*MWD*) and geometric mean diameter (*GMD*) than other treatments at 0-10 cm. RT showed no difference with CT. Wet sieving results showed that most of the aggregates are unstable, and the *MWD* and *GMD* of water-table aggregates showed the same trend: NT>RT>CT. At 0-5 cm, the fractal dimension (*D*) of water-stable aggregates under NT was lower than RT and CT; while at 5-10 cm, RT yielded highest *D*, and showed the worst stability. 【Conclusion】 NT increased the aggregation and the stability of soil aggregates, while due to intense disturbance, the aggregation and stability within tillage depth under RT and CT decreased. At 10-30 cm, there were no significant differences observed among the three tillage systems.

Key words: Conservation tillage; Soil aggregate; Fractal dimension; *MWD*; *GMD*

收稿日期: 2006-11-20; 接受日期: 2007-03-13

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划—保护性土壤耕作关键技术与轮耕模式研究项目(2006BAD15B01)

作者简介: 周 虎(1982-), 男, 山东金乡人, 博士研究生, 研究方向为土壤结构和土壤微形态等。E-mail: zhouhu_1982@126.com。通讯作者吕贻忠(1965-), 男, 河南洛阳人, 博士, 研究方向为土壤化学、土壤退化等。Tel: 010-62732217; E-mail: lyz@cau.edu.cn

0 引言

【研究意义】土壤团聚体是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境^[1]。不同粒级团聚体在养分的保持和供应中的作用不同^[2]，并且其数量分布和空间排列方式决定了土壤孔隙的分布和连续性，进而决定了土壤的水力性质，影响土壤生物的活动^[3]。同时，水稳性团聚体的数量和分布状况反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀的能力^[4]。保护性耕作是以减少土壤扰动和增加秸秆覆盖为主要特点的耕作方式，研究不同保护性耕作制度下的土壤团聚体特征，对评价和选择适当的耕作措施具有重要意义。另外，为了比较不同耕作制度下的土壤团聚体特征，选取能够准确反映团聚体分布状况和稳定性特征的定量指标也具有重要的意义。【前人研究进展】为了定量反映团聚体分布状况和稳定性特征，最初的做法是罗列出各粒级团聚体的数据，这种方法虽然详尽但是繁琐；或是对一部分粒级数据进行分析，如大于 0.25 mm 团聚体含量 ($R_{0.25}$)，但是这样就忽略了其它粒级的信息^[5]。人们更希望能够通过一个定量的参数准确反映土壤团聚体的状态，不但便于不同处理间团聚体数据的比较，而且有利于分析土壤团聚体同其他土壤参数之间的关系。van Bavel^[5]将各粒级数据的加权求和，提出了平均重量直径 (mean weight diameter, *MWD*) 的概念。Gardener^[6]在团聚体分布服从对数正态分布的假设的基础上，提出了几何平均直径 (geometric mean diameter, *GMD*) 的概念。有研究认为，*GMD* 比 *MWD* 更为准确，能更好的反映团聚体分布的变化情况^[7]。*MWD* 和 *GMD* 在一定程度上解决了上述问题，并为人们所广泛使用。Manderbrot 创立的分形几何在描述看似杂乱无章的自然界现象中发挥了独特的作用^[8]。团聚体的形成和变化过程是多种复杂因素综合作用的结果，很多研究表明土壤颗粒及其团聚体的性状具有明显的分形特征，并且用分形维数 (fractal dimension, *D*) 来描述团聚体的分布状态^[9-13]，如 Gülser^[14]研究了种植不同作物对土壤团聚体分形维数的影响，取得了很好的效果。一些研究通过对不同耕作措施下土壤团聚体分形特征的敏感性分析，认为分形维数可以用于比较不同耕作措施对团聚体的影响^[15,16]。【本研究切入点】近年来保护性耕作在国内发展很快，但对于华北平原保护性耕作措施下土壤团聚体特征的变化研究较少，本文综合应用分形维数 *D* 和 $R_{0.25}$ 、*MWD*、*GMD* 等指标来描述土壤团聚体的分布状况和稳定性特征。

【拟解决的关键问题】研究不同保护性耕作措施对土壤团聚体分布和稳定性特征的影响，为华北平原地区选择合理的耕作方式提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

试验地位于河北省栾城县的中国科学院栾城农业生态试验站内 (37.8°N, 114.7°E, 海拔 50.1 m)，属暖温带半湿润半干旱季风气候，年平均太阳辐射总量为 546.5 KJ·cm⁻²，年平均气温 12.2 °C，≥10 °C 积温 4 713 °C，无霜期 200 d 左右，全年平均降水量 536.8 mm。土壤为干润锥形土，质地为轻壤土，有机质含量 1.17 g·kg⁻¹。作物种植方式为冬小麦/夏玉米一年两熟。

试验于 2001 年~2005 年进行，设置翻耕 (conventional tillage, CT)、旋耕 (rotary tillage, RT) 和免耕 (no-tillage, NT) 3 个耕作处理。每个处理设 3 个重复，共 9 个小区，小区面积为 900 m² (60 m×15 m)。其中，翻耕：在玉米收获后利用秸秆粉碎机粉碎秸秆，然后翻埋于土壤中，翻耕深度约 20 cm；旋耕：在玉米收获后，用旋耕机将秸秆粉碎，然后利用旋耕机旋耕土壤 (深约 10 cm)；免耕：在玉米秸秆自然 (直立) 分布于田间的情况下，采用免耕播种机 (型号 2BMF-5/10) 一次性完成秸秆部分粉碎、播种、施肥及镇压作业。

3 个耕作处理的灌溉、施肥、作物品种及其他管理措施均相同，在冬小麦播种时施用基肥尿素和磷酸二铵，施肥量分别为 75 kg·ha⁻¹ 和 300 kg·ha⁻¹；春季返青时追施尿素，施肥量为 300 kg·ha⁻¹。在小麦入冬、拔节和抽穗 3 个时期采用喷灌方式灌水，灌水量分别为 450、525 和 600 m³·ha⁻¹。用除草剂 (苯磺胺) 控制杂草。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 在 2005 年冬小麦收获后采样，分 0~5、5~10、10~20 和 20~30 cm 4 个层次分别采集混合土样和原状土样，每小区 3 个重复。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动，以免破坏团聚体。实验室内风干土样。

1.2.2 测定方法 土壤容重采用环刀法，土壤有机质采用重铬酸钾外加热法，土壤质地用吸管法测定。

土壤团聚体的分布状况和稳定性采用干筛法和湿筛法^[17]。干筛法：取 100 g 风干土样置于套筛 (孔径依次为 10、7、5、3、2、1、0.5 和 0.25 mm) 顶部，以 30 次/min 手工上下震荡 5 min，测定各孔径筛子上

土样重量 W_{di} 。湿筛法: 将 50 g 风干土样置于 1L 量筒中, 沿量筒边缘缓慢加去离子水至饱和, 然后将饱和土样转移至放置于水桶中的套筛 (孔径依次为 5、2、1、0.5 和 0.25 mm) 顶部, 利用自制的震荡仪以 30 次/min 上下震荡 5 min, 将各级孔径筛子上土样置于铝盒烘干称重得 W_{wir} , 然后再加入 10 mol·L⁻¹ 六偏磷酸钠溶液 10 ml 并用玻璃棒搅拌分散, 置于相应孔径筛子震荡, 将留在筛子上的沙粒烘干并称重, 记为 W_{wis} , 则各粒级团聚体重量 W_{wi} 由公式 (1) 式获得:

$$W_{wi} = W_{wir} - W_{wis} \quad (1)$$

1.2.3 数据处理 w_i 为 i 粒级团聚体重量所占的比例, 干筛和湿筛分别按式 (2) 和式 (2-1) 计算。

$$w_i = \frac{W_{di}}{100} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{或 } w_i = \frac{W_{wi}}{50} \times 100\% \quad (2-1)$$

利用各粒级团聚体数据, 计算大于 0.25 mm 团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GWD。

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} = 1 - \frac{M_{r<0.25}}{M_T} \quad (3)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (5)$$

分维数 D 的计算采用杨培岭等^[18]推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

对公式 (6) 两边取对数, 可得:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right) \quad (7)$$

利用公式 (6) 或公式 (7), 通过数据拟合, 可方便的求得 D 。

其中, \bar{x}_i 为某级团聚体平均直径, $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒

径小于 \bar{x}_i 的团聚体的重量, M_T 为团聚体总重量, x_{\max} 为团聚体的最大粒径。

数据利用 SAS8.0 软件分析。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作对土壤基本性质的影响

表 1 是不同耕作处理的土壤容重、有机质和粘粒 (<0.002 mm) 含量分析结果。从表 1 可以看出, 0~5 cm 层土壤容重的大小顺序为 NT>RT>CT, 免耕显著地增加了表层土壤的容重, 但 RT 与 CT 的差异不显著; 免耕处理下的各层土壤容重均最高, 说明经过 4 年的免耕土壤的紧实度增加。

旋耕处理下 0~5 cm 土层的容重比免耕显著降低, 但以下各层差异不显著; 旋耕处理 0~10 cm 土层

表 1 不同耕作方式下土壤容重 (BC)、有机质含量 (OM) 和粘粒 (<0.002 mm) 含量 (CC)

Table 1 Soil bulk density (BD), organic matter (OM) and clay content (CC) under different tillage systems

| 层次 Depth(cm) | NT | | | RT | | | CT | | |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | BD (g·cm ⁻³) | OM (g·kg ⁻¹) | CC (g·kg ⁻¹) | BD (g·cm ⁻³) | OM (g·kg ⁻¹) | CC (g·kg ⁻¹) | BD (g·cm ⁻³) | OM (g·kg ⁻¹) | CC (g·kg ⁻¹) |
| 0~5 | 1.58a | 19.52a | 21.99a | 1.47b | 24.05a | 21.25a | 1.44b | 16.15ab | 21.93a |
| 5~10 | 1.49bc | 17.42ab | 21.35a | 1.50b | 16.45b | 22.44a | 1.42b | 17.54ab | 22.33a |
| 10~20 | 1.52b | 13.24bc | 20.82a | 1.61a | 12.16bc | 21.86a | 1.46b | 14.39bc | 21.54a |
| 20~30 | 1.62a | 10.23c | 21.26a | 1.61a | 7.93c | 23.18a | 1.62a | 7.46c | 21.85a |

同行相同指标后不同字母表示差异达显著水平 ($P<0.05$) (LSD)。下同

Different letters in the same row mean significantly different at 5% level of probability (LSD). The same as below

内与翻耕处理下的土壤容重没有显著差异, 均在 1.44~1.50 之间, 但旋耕处理下 10~20 cm 的土壤容重高于翻耕下的该层土壤容重值, 说明浅旋耕这种少耕的保护性耕作方式可导致该地区农田土壤犁底层上移。

翻耕处理的耕层 (0~20 cm) 土壤容重均低于旋耕和免耕处理下的相同层次的土壤容重, 说明翻耕可有效地降低土壤的容重, 从而改变土壤的松紧状况; 而 20 cm 以下的土壤层次由于不受耕作的影响, 各处

理间土壤容重均没有显著差异。

各处理有机质含量自上而下均呈下降趋势，但免耕和旋耕处理表层有机质含量高于翻耕处理，各处理间土壤有机质含量和土壤粘粒含量没有显著差异。

2.2 保护性耕作对土壤团聚体的数量的影响

根据团聚体形成的多级团聚理论，微团聚体（直径 <0.25 mm）聚合形成大团聚体（直径 >0.25 mm）^[19]，

大团聚体破碎形成小团聚体^[20]，二者既互为基础又互为消长。一般把 >0.25 mm的团聚体称为土壤团粒结构体，团粒结构是土壤中最好的结构体，其数量与土壤的肥力状况呈正相关^[21]。因此本研究采用 >0.25 mm团聚体的比例来说明土壤团聚体的数量变化，试图反映不同耕作措施下土壤的肥力和稳定性状况（表2）。

表2 不同耕作处理干湿筛下的 >0.25 mm团聚体含量

Table 2 Macroaggregates content by dry and wet sieving under different tillage systems

| 层次 Depth(cm) | $R_{0.25}^*$ (%) (干筛法 Dry sieving) | | | $R_{0.25}$ (%) (湿筛法 Wet sieving) | | |
|-----------------|------------------------------------|--------|--------|----------------------------------|--------|-------|
| | NT | RT | CT | NT | RT | CT |
| 0~5 | 91.5a | 76.6b | 78.3b | 34.9a | 32.4a | 24.7b |
| 5~10 | 93.3a | 88.3ab | 84.6ab | 32.8a | 14.8bc | 22.6b |
| 10~20 | 86.1ab | 88.2ab | 88.6ab | 30.1a | 12.8c | 20.2b |
| 20~30 | 87.2ab | 84.2ab | 88.6ab | 19.9b | 8.3c | 8.6c |

* $R_{0.25}$ 指土壤中 >0.25 mm的团聚体数量 Aggregates of diameter >0.25 mm

通过干筛法可以获得原状土壤中团聚体的总体数量，这些团聚体包括非水稳性团聚体和水稳性团聚体。如表2所示，在干筛法中，免耕处理下0~10 cm土层内的 $R_{0.25}$ 显著高于翻耕和旋耕处理，而10~30 cm土层中的 $R_{0.25}$ 在各处理间没有显著差异，说明免耕显著地提高了表层0~10 cm土层内的 >0.25 mm的团聚体的数量，使土壤团粒结构体的数量增多。旋耕与翻耕处理相比，干筛的 >0.25 mm的团聚体含量在所有相同层次间都没有显著的差异，都在76.6%~88.6%之间。3种耕作处理下的所有层次的 >0.25 mm土壤团聚体数量都在75%以上，而免耕相对于翻耕，可使0~5 cm土层的团聚体数量提高19.5%，5~10 cm土层的团聚体数量提高5.7%。

湿筛法获得的团聚体是土壤中的水稳性团聚体，水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有重要的贡献，因而比非稳性团聚体更为重要。从表2可以看出，湿筛处理下水稳性团聚体的 $R_{0.25}$ 最高为34.9，远小于干筛处理下的最小值76.6，说明该土壤的土壤团聚体大部分为非水稳性团聚体，水稳性团聚体的数量较少。

分析发现，免耕处理下的0~30 cm土层的水稳性团聚体数量均大于30%，比旋耕、翻耕处理下的相同层次的数值都高，且5 cm以下土层与旋耕、翻耕之间差异显著，说明免耕有利于土壤水稳性团聚体的形成；旋耕与翻耕相比，在0~5 cm表土层内，旋耕处理的 >0.25 mm的水稳性团聚体的数量显著高于翻耕处理，但5~20 cm土层内的水稳性团聚体的数量却显著

低于翻耕处理。翻耕处理下耕层（0~20 cm）的水稳性团聚体的含量在20%左右，但犁底层的水稳性团聚体显著降低（8.6%），土壤呈明显的片状结构，而免耕处理可使犁底层消失，显著提高其水稳性团聚体的含量，与翻耕相比增加了131.4%。

以上分析表明，对于华北平原的农田土壤，不同耕作方式会导致土壤团聚体的含量发生变化，免耕处理有利于耕层（0~20 cm）土壤团聚体的形成，并且具有较高的水稳性；旋耕处理虽然会提高0~5 cm层水稳性团聚体的含量，但5~30 cm层水稳性团聚体的含量反而降低。

2.3 保护性耕作对土壤团聚体大小的影响

不同粒径团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物运动具有不同的作用^[2,3]，因此在团聚体总量的基础上，团聚体大小分布状况与土壤的质量关系更加密切。 MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标。 MWD 和 GMD 值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高，稳定性越强^[22]。

如表3所示，干筛处理下，0~5 cm和5~10 cm层土壤团聚体的 MWD 和 GMD 均是 $NT>RT>CT$ ，说明免耕处理的团聚状况好于旋耕和翻耕处理。在10~30 cm各处理间差异不显著。湿筛处理下水稳性团聚体 MWD 在0~5 cm层为 $RT>NT>CT$ ，其下各层均为 $NT>RT>CT$ ，但统计结果表明处理间的差异多不显著；湿筛法的 GMD 在3种耕作方式下的各层大小顺序均为 $NT>RT>CT$ ，其值以0~5 cm层最大，

向下依次降低，且免耕处理与旋耕、翻耕处理相比其差异均为显著。干筛法的 *GMD* 和 *MWD* 远比湿筛法

的大，这是因为在水分的浸泡下大量的非水稳性团聚体分解的结果。

表 3 不同耕作处理下土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径

Table 3 *MWD* and *GMD* of dry and wet sieving under different tillage systems

| 方法 Methods | 干筛法 Dry sieving | | | | | | 湿筛法 Wet sieving | | | | | |
|--------------|-----------------|--------|--------|---------|--------|--------|-----------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | MWD(mm) | | | GMD(mm) | | | MWD(mm) | | | GMD(mm) | | |
| 层次 Depth(cm) | NT | RT | CT | NT | RT | CT | NT | RT | CT | NT | RT | CT |
| 0~5 | 3.50ab | 2.34c | 2.44c | 3.27ab | 1.49d | 1.46d | 0.43ab | 0.51a | 0.34bc | 0.56a | 0.37bc | 0.21cd |
| 5~10 | 3.92a | 3.45ab | 2.95bc | 3.74a | 2.92ab | 2.10c | 0.41ab | 0.33bc | 0.31bc | 0.54a | 0.29cd | 0.19cd |
| 10~20 | 3.40ab | 3.56ab | 3.46ab | 2.53b | 2.98ab | 2.90ab | 0.33bc | 0.26cd | 0.27cd | 0.52b | 0.28cd | 0.19d |
| 20~30 | 3.54ab | 3.08bc | 3.64ab | 2.79b | 2.28c | 3.05ab | 0.26cd | 0.19d | 0.18d | 0.47ab | 0.25cd | 0.14d |

2.4 保护性耕作下土壤团聚体分维特征研究

杨培岭等^[18]分析土壤颗粒分形维数时指出，粘粒含量越高，质地越细，分形维数越高。吴承祯等^[23]也指出，团粒结构越好、结构越稳定则分形维数越小。

本文利用公式(7)对团聚体干筛和湿筛数据进行了拟合， R^2 值均大于 0.92，图是 3 种不同耕作方式下土壤团聚体的分形维数在 0~30 cm 剖面上的分布图。

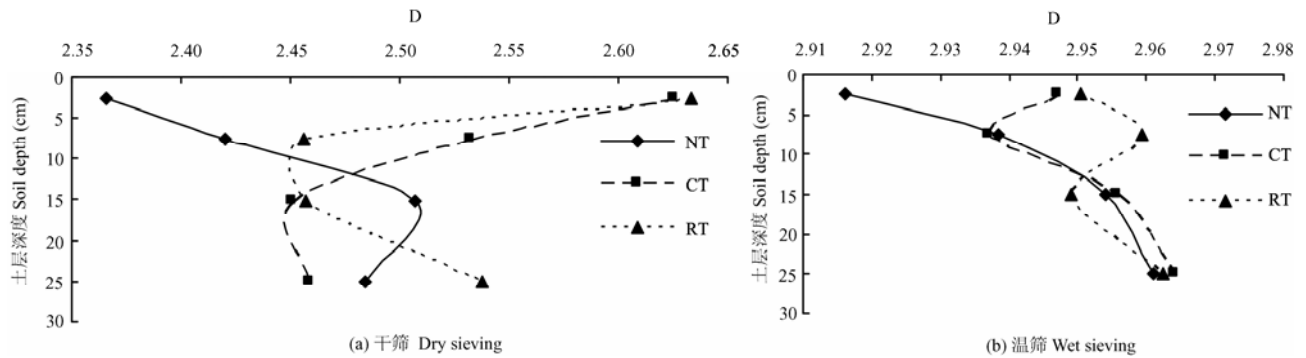


图 不同耕作方式下土壤团聚体分维数
Fig. Fractal dimension of water-stable aggregates under different tillage systems

从图-a 可以看出，免耕处理下的非水稳性团聚体的分形维数在表层 0~5 cm 最低(2.37)，从 0~15 cm 土层向下逐渐增大，15 cm 土层以下趋于稳定；而翻耕和旋耕处理的非水稳性团聚体的分形维数表层最大，在 0~5 cm 土层内土壤非水稳性团聚体的分形维数几乎相等(约为 2.63)，从 0~15 cm 土层向下逐渐减小，15 cm 以下土层的非水稳性团聚体的分形维数趋于稳定；3 种耕作处理 15 cm 以下土层中非水稳性团聚体的分形维数的变化范围为 2.45~2.55，其变幅明显小于表层土壤；在 0~5 cm 内，土壤非水稳性团聚体的分形维数的大小顺序为 NT<RT≈CT，说明免耕处理使土壤非水稳性团聚体的稳定性增强；在 5~10 cm 土层内各处理分维数也有明显的差异，表现为 NT<RT<CT；在 10~20 cm 土层内，非水稳性团聚

体的分形维数大小顺序为 NT>CT≈RT；在 20~30 cm 土层中，D 值的顺序为 RT>NT>CT，旋耕处理下非水稳性团聚体的分维数最高(2.54)，免耕和翻耕处理次之(2.48 和 2.46)。这表明不同耕作措施对土壤团聚体特性的影响主要发生在表层土壤 0~10 cm 土层中，尤其在表层(0~5 cm)，免耕处理有利于改善土壤的土壤团聚状况，使其非稳性团聚体的分形维数显著降低；而翻耕和旋耕处理由于机械动力对土壤的扰动较大，可使土壤团聚体破坏而分散，故其分形维数较高。在 20~30 cm，翻耕处理团聚状况优于免耕处理，旋耕处理最差。这可能是由于翻耕的犁底层大致处于 20~30 cm，受到机械压力而使土壤颗粒形成较大的团聚体。

图-b 是水稳性团聚体的 D 值拟合曲线，其 R^2 值

在 0.78~0.95 之间。从图-b 可以看出, 在 0~5 cm 层, 免耕处理分形维数最小, 表明团聚体的水稳性最高, 且土壤水稳性团聚体分形维数自表层向下逐渐增加, 表明底层的土壤水稳性逐渐降低。翻耕处理的团聚体的分形维数则是先下降 (5~10 cm), 然后再增加。旋耕处理变化呈倒“S”形, 在 5~10 cm 层的团聚体的分形维数显著升高, 说明该层中土壤水稳性团聚体稳定性降低。在 20~30 cm 层次, 各处理分形维数趋于一致, 说明耕作对 20 cm 以下土壤水稳性团聚体的影响较小, 但 20 cm 以下土壤中水稳性团聚体的分形维数最高, 说明其颗粒最小, 稳定性最低。

3 讨论

本文的研究结果表明了不同的耕作方式在较短的时间内 (4 年) 对土壤的团聚体特性发生了明显的影响。土壤容重的变化并不能直接反映土壤结构的变化。免耕虽然使土壤表层容重增大, 但通过干筛法和湿筛法对土壤团聚体数量与大小分布的调查发现, 免耕处理的表层 0~10 cm 土壤团聚体的数量、分布和稳定性显著优于旋耕处理和翻耕处理, 而旋耕处理和翻耕处理间没有差异。但干筛法和湿筛法的结果有所不同。干筛法反映的是原状土壤中非水稳性团水体和水稳性团聚体的总体状况; 而湿筛法反映的是水稳性团聚体的特征, 能更准确地反应不同耕作措施对土壤结构的影响。如用干筛法调查旋耕与翻耕处理下的 >0.25 mm 的土壤团聚体数量、大小没有显著的差异, 分形维数的剖面变化趋势也相同; 而湿筛调查的结果显示了水稳性团聚体的数量和大小有较显著的差异, 土壤团聚体的 *GMD* 和 *MWD* 结果相一致, 为免耕>旋耕>翻耕; 但是旋耕处理下分形维数 *D* 值在 0~30 cm 剖面上呈倒“S”形, 与 *GMD* 和 *MWD* 自上而下逐渐降低的趋势并不一致, 显示出旋耕层的土壤团聚体的分形维数明显增大的现象。

目前, 在华北地区已经大面积地推广玉米、小麦的少免耕技术, 作物收获后大量地使用低功率的农机进行秸秆旋耕还田, 由于耕作深度浅, 旋耕刀片长期对表层 0~10 cm 土壤的扰动较大, 尽管该层土壤的容重变小, 但犁底层有上移的趋势。由于进行了秸秆还田, 其有机质含量有所增加, >0.25 mm 的团聚体数量有所增加, *GMD* 和 *MWD* 与翻耕相比有所增大, 但其水稳性团聚体的分形维数增大, 表明旋耕可能使旋耕层团聚体的稳定性下降, 这对该地区土壤肥力的稳定是不利的。

本文研究表明, 用 *GMD*、*MWD* 和分维数 *D* 等定量化的结构参数比仅用容重、孔隙度等指标更好地反映土壤结构的变化, 可以把大于 0.25 mm 团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径用作评价土壤团聚体特性的参数。在本研究中, *GMD* 反映非水稳性团聚体变化同 *MWD* 具有相同的趋势, 且相关系数为 0.95; 通过对水稳性团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 的分析表明, *GMD* 比 *MWD* 更能反应不同处理间团聚体的差异, 对不同耕作方式下土壤水稳性团聚体的差异更敏感。

GMD 是建立在团聚体分布服从对数正态分布的基础上的, 然而很多研究认为团聚体分布并不是对数正态分布而是具有分形特征^[24,25]。本文结果证实分形维数能很好的描述团聚体分布, 而且能够反映出免耕、旋耕和翻耕 3 种不同耕作措施下团聚体的变化。土壤扰动程度越大, 土壤结构的分形维数也越大, 免耕对表层土壤的扰动大大减少, 从而使表层土壤的团聚体的分形维数明显减小, 且水稳性团聚体 *D* 值变化同 *GMD* 和 *MWD* 趋势不一致。本文虽然没有验证各参数孰优孰劣, 但是考虑到旋耕处理的深度以及机械压实作用, 本文认为分形维数 *D* 值的结果更为可信。

本文只是对保护性耕作试验实施 4 年后的结果进行分析, 要研究不同保护性耕作方式对土壤结构的影响, 还需要进行长期的试验。只有综合分析不同耕作方式对土壤结构、水分运动、生物性质和作物生长状况的影响, 才能评价不同耕作方式的优劣。

4 结论

首先, 3 种不同的耕作方式对土壤团聚体特性有明显的影响。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层内, 免耕处理 >0.25 mm 团聚体含量、*MWD* 和 *GMD* 均显著高于旋耕处理和翻耕处理, *D* 值低于旋耕和翻耕处理, 说明免耕可促进表层土壤团聚体的形成, 增加其颗粒直径, 降低其团聚体的分形维数; 但不同耕作方式对 10 cm 以下的土壤的团聚体含量、大小和分形维数影响不大, 在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层内, 各处理团聚体数量、大小分布状况趋于一致。旋耕和翻耕对土壤具有扰动作用, 其土壤团聚体的数量较低, 直径较小, 分形维数较高, 尤其是强烈的浅旋耕, 使 5~10 cm 土壤内的水稳性团聚体显著减少, 分形维数升高, 对土壤水稳性团聚体的破坏作用较大。

其次, 通过 4 年的保护性耕作试验, 免耕、旋耕等保护性耕作措施对土壤有机质含量还没有显著的影响, 但 3 种耕作方式对 0~30 cm 内土壤的容重产生了

较显著的影响。免耕使土壤的容重明显增加, 土壤变得紧实, 而旋耕处理下 0~5 cm 土层的容重比免耕显著降低, 但 10~20 cm 的容重显著增加, 使犁底层变浅; 翻耕可使耕层土壤保持较低的容重值, 但不利于土壤团聚体, 尤其是水稳性团聚体的形成。

References

- [1] Six J, Bossuyt B, Degryze H, Deneff K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79: 7-31.
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义. *土壤学报*, 1994, 31(1): 18-25.
Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(1): 18-25. (in Chinese)
- [3] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11: 199-238.
- [4] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936, 28: 337-351.
- [5] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [6] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1956, 20: 151-153.
- [7] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystems Engineering*, 2005, 90: 227-234.
- [8] 陈 颢, 陈 凌. 分形几何学. 北京: 地震出版社, 2005: 1-3.
Chen Y, Chen L. *Fractal Geometry*. Beijing: Seismological Press, 2005: 1-3. (in Chinese)
- [9] Erfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review. *Soil & Tillage Research*, 1995, 36: 1-20.
- [10] 李保国. 理论在土壤科学中的应用及其展望. *土壤学进展*, 1994, 22(1): 1-10.
Li B G. Application of fractal theory in pedology and its prospects. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(1): 1-10. (in Chinese)
- [11] Young I M, Crawford J W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *Journal of Soil Science*, 1991, 42: 187-192.
- [12] Crawford J W, Verrall S, Young I M. The origin and loss of fractal scaling in simulated soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48: 643-650.
- [13] Young I M, Crawford J W, Rappoldt C. New methods and models for characterising structural heterogeneity of soil. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61: 33-45.
- [14] Gülser C. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma*, 2006, 131: 33-44.
- [15] Filgueira R R, Fournier L L, Sarli G O, Aragón A, Rawls W J. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a phaeozem in central Argentina. *Soil & Tillage Research*, 1999, 52: 217-222.
- [16] Giménez D, Karmon J L, Posadas A, Shaw R K. Fractal dimensions of mass estimated from intact and eroded soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64: 165-172.
- [17] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed Madison, WI: Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, 1986: 425-442.
- [18] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Use the weight-size distribution to characterize the soil fractal features. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896-1899. (in Chinese)
- [19] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [20] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29: 815-828.
- [21] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1042-1049.
- [22] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 2002: 317-328.
- [23] 吴承祯, 洪 伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. *土壤学报*, 1999, 36(2): 162-167.
Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162-167. (in Chinese)
- [24] Anderson A N, Mcbratney A B. Soil aggregates as mass fractals. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, 33: 757-772.
- [25] Guber A K, Pachepsky Ya A, Levkovsky E V. Fractal mass-size scaling of wetting soil aggregates. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 317-322.

(责任编辑 吴晓丽)