

# 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征

姜敏<sup>1,3</sup>, 刘毅<sup>1,2</sup>, 刘闯<sup>1</sup>, 李志国<sup>1</sup>, 顾炽明<sup>1</sup>, 谢娟<sup>1</sup>, 陈防<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉植物园, 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为分析南水北调(中线)丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及其分形特征, 揭示人类活动对土壤结构的影响, 以库区内不同土地利用方式(水田、旱地、果园、人工林地、自然林地)土壤为研究对象, 经干筛和湿筛法测定团聚体组成, 以土壤团聚体稳定性指标(大团聚体含量( $R_{>0.25}$ ))和团聚体破坏率(PAD)、土壤团聚体直径指标(平均质量直径(MWD)和几何均重直径(GMD))以及分形维数(D)作为评价指标, 对比分析丹江口库区不同土地利用方式下土壤团聚体组成及其稳定性。结果表明, 对土壤团聚体组成的测定, 湿筛法相对干筛法重现性更好, 能更真实反映土壤团聚体组成及其稳定性。各土地利用方式总体上表现为林地(人工林和自然林)土壤稳定性和抗蚀性更好, 其 MWD 和 GMD 值相对较高, D 值相对较低; 相反, 旱作农地(果园和旱地)土壤团聚结构及其稳定性较弱, 其 MWD 和 GMD 值相对较低, D 值相对较高。说明各团聚体稳定性指标均能从不同角度反映不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响。相关性分析表明, 土壤团聚体 MWD、GMD 值和 D 值与各粒径团聚体含量呈明显线性关系, 在土壤团聚化过程中, 土壤团聚体从微团聚体( $<0.25$  mm)—中等团聚体( $0.25\sim5$  mm)—大团聚体( $>5$  mm)的转化中,  $0.25, 1, 5$  mm 粒级是较为关键的临界点。

**关键词:** 土壤团聚体; 团聚体稳定性; 团聚体直径; 分形维数

中图分类号:S152.4 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2016)06-0265-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.044

## Study on the Stability and Fractal Characteristics of Soil Aggregates Under Different Land Use Patterns in the Danjiangkou Reservoir

JIANG Min<sup>1,3</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>, LIU Chuang<sup>1</sup>, LI Zhiguo<sup>1</sup>, GU Chiming<sup>1</sup>, XIE Juan<sup>1</sup>, CHEN Fang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** In order to reveal the role of human activities on soil quality, 5 land use patterns were examined, including paddy field, dry land, citrus orchard, artificial forest and natural forest. Each land use pattern was evaluated for its effectiveness at retaining soil aggregate stability and its fractal features in Danjiangkou Reservoir area, in China. The rate of  $>0.25$  mm macro-aggregates ( $R_{>0.25}$ ), the percentage of aggregate destruction (PAD), the mean weight diameter (MWD), and the geometric mean diameter (GMD) were tested in this study, and the fractal dimension (D) were also compared. Results showed that the wet sieving method was accurate, reliable and reproducible, and the results based on this method could better reflect the composition and stability of soil aggregate compare to those based on dry sieving method. To some degree, each of aggregate stability indexes could reflect the variation of soil aggregates under different land use patterns. The forests (natural forest and artificial forest) had better soil stability and erosion resistance, with relatively high values of MWD and GMD and relatively low D. However, dry farmland (dry land, and citrus orchard) showed an opposite trend. Its soil stability was weak, the MWD and GMD were relatively low and the D was relatively high. The correlation analysis indicated that aggregate content of each size had significant linear relationship to the indexes of MWD, GMD and D. And in the transformation of soil

aggregate from micro-aggregates ( $<0.25$  mm) to medium aggregates (0.25—5 mm), and to large aggregates ( $>5$  mm), 0.25 mm, 1 mm and 5 mm particle size were more critical points.

**Keywords:** soil aggregate; soil aggregate stability; soil aggregate diameter; fractal dimension

土壤团聚体作为土壤结构基本单位,既是土壤的基本组成部分,也是评价土壤肥力状况的重要指标<sup>[1]</sup>。20世纪以来,国内外土壤工作者对土壤团聚体稳定性及其形成过程开展了大量的研究,涌现出很多团聚体构建模型<sup>[2-4]</sup>,其中最通用的是 Tisdall 等<sup>[2]</sup>提出的团聚体等级发育模型,经过长期发展与改进,Six 等<sup>[4]</sup>进一步提出以大团聚体周转为核心,考虑土壤有机质动态变化的胚胎发育模型。目前,评价团聚体稳定性的指标主要有大团聚体含量、土壤平均质量直径、几何平均直径以及分形维数等<sup>[5]</sup>。一般认为,大团聚体含量、土壤平均质量直径和几何平均直径越大,土壤团聚体分布状况与稳定性越好<sup>[6]</sup>。而分形维数越小,土壤结构的稳定性越好,抗蚀能力越强<sup>[5]</sup>。土地利用方式可改变土壤结构、有机胶结物质以及土壤微生物的活动<sup>[7]</sup>,使得土壤有机质在土壤团聚体中重新组合和再分配<sup>[8]</sup>,进而影响土壤团聚体的稳定性。

作为南水北调中线工程水源地的丹江口水库,位于南北气候分界的过渡地带,库区 50% 以上属于土石山区和丘陵沟壑区,生态环境脆弱且水土流失严重<sup>[9]</sup>。水源地低山地区频繁的人类活动造成了土地退化,水土保持、水源涵养、减少泥沙入库或淤积等生态系统服务功能低下<sup>[10]</sup>。土壤团聚体可有效抑制水土流失过程中泥沙和有机物的流动,受土地利用和植被覆盖的影响很大<sup>[11]</sup>。有必要对丹江口库区土地利用改变对土壤团聚体组成及其稳定性进行全面系统的调查研究,本文选择了丹江口库区 5 种不同的土地利用方式对其团聚体数量、大小、稳定性及分形维数进行研究,旨在为协调丹江口库区土地利用及调控管理提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤于 2014 年 4 月取自南水北调中线工程水源地—丹江口库区习家店镇大柏河和小茯苓 2 个小流域(图 1),根据土地利用方式选取水田(夏季种植水稻,冬季种植小麦或者油菜)、旱地(夏季种植玉米或者烟草,冬季种植小麦或者油菜)、果园(种植柑橘)、人工林地(主要树种为杨树、柏树、水杉)、自然林地(主要树种为柏树或者油松)5 种不同土地利用方式。每一种土地利用方式下布设 10 个样方作为重复,在每一样点内按“梅花”型采集 0—20 cm 土层的原状土样。

### 1.2 测定方法

本研究拟采用沙维诺夫干筛法<sup>[5]</sup>和湿筛法<sup>[6]</sup>相结合进行研究,其中干筛法筛分粒级为: $>5, 2\sim 5, 1\sim 2$ ,

$0.25\sim 1, <0.25$  mm 5 个粒级团聚体;湿筛法筛分粒级为: $>5, 1\sim 5, 0.25\sim 1, 0.1\sim 0.25, <0.1$  mm 5 个粒级团聚体。

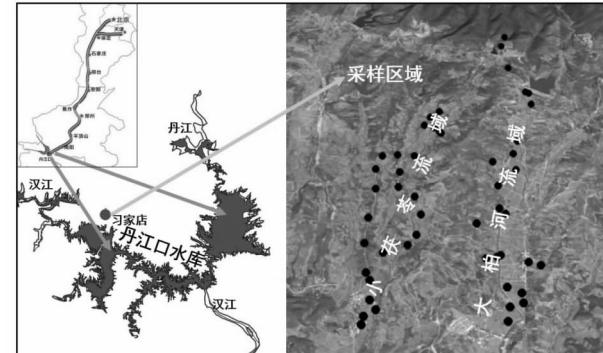


图 1 研究区地理位置及样点布置

### 1.3 指标计算

土壤机械(干筛)和水(湿筛)稳定性大团聚体含量( $R_{>0.25}$ )( $>0.25$  的团聚体)用计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\%$$

式中: $R_{>0.25}$  为大团聚体含量; $M_{>0.25}$  为 $>0.25$  mm 团聚体重量; $M_T$  为未筛分之前土壤总重。

土壤团聚体破坏率(Percentage of aggregate destruction, PAD)计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$PAD = (DR_{>0.25} - WR_{>0.25}) / DR_{>0.25} \times 100\%$$

式中:PAD 为团聚体破坏率(%); $DR_{>0.25}$  为 $>0.25$  mm 机械稳定性团聚体含量(%); $WR_{>0.25}$  为 $>0.25$  mm 水稳定性团聚体含量(%).

土壤平均质量直径 (Mean weight diameter, MWD) 和几何平均直径 (Geometric mean diameter, GMD) 计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i\right)$$

式中: $\bar{x}_i$  为土壤各粒径的平均直径(mm); $w_i$  为土壤各粒径的质量百分比(%)。

土壤分形维数(Fractal dimension, D)采用杨培岭等<sup>[14]</sup>的土壤颗粒分形模型:

$$D = 3 - \frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})}$$

式中: $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径; $W(\delta < \bar{d}_i)$  是土粒直径小于 $\bar{d}_i$  累积的重量; $W_0$  是全部粒级土粒重量之和。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体组成分析

团聚体组成是影响土壤肥力的重要因子,干筛

法获得的机械稳定性团聚体组成见表1。各土地利用方式下,五成以上的团聚体为 $>5\text{ mm}$ 粒级团聚体,以 $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体所占比例最小。从不同土地利用方式来看, $<0.25\text{ mm}$ 粒级微团聚体表现为自然林 $>$ 人工林 $>$ 旱地 $>$ 水田 $>$ 果园;0.25~

1,1~2,2~5 mm等中等团聚体表现为:果园 $>$ 旱地 $>$ 自然林 $>$ 水田 $>$ 人工林,所占比例分别为41.32%,40.35%,33.57%,31.31%和25.44%;对 $>5\text{ mm}$ 粒级大团聚体表现为:人工林 $>$ 水田 $>$ 自然林 $>$ 果园 $>$ 旱地。

表1 不同土地利用方式下机械稳定性团聚体组成

土地利用方式	$<0.25\text{ mm}$	0.25~1 mm	1~2 mm	2~5 mm	$>5\text{ mm}$
水田	$3.78 \pm 1.54\text{ a}$	$11.36 \pm 4.03\text{ a}$	$7.94 \pm 2.64\text{ ab}$	$12.00 \pm 1.85\text{ a}$	$64.91 \pm 8.17\text{ a}$
旱地	$4.92 \pm 2.85\text{ a}$	$17.46 \pm 9.03\text{ a}$	$9.84 \pm 4.06\text{ ab}$	$13.05 \pm 5.17\text{ a}$	$54.73 \pm 20.07\text{ a}$
果园	$3.47 \pm 1.58\text{ a}$	$17.33 \pm 5.84\text{ a}$	$10.80 \pm 4.72\text{ a}$	$13.08 \pm 3.77\text{ a}$	$55.31 \pm 12.40\text{ a}$
人工林	$5.12 \pm 4.02\text{ a}$	$8.96 \pm 4.90\text{ b}$	$5.76 \pm 1.88\text{ c}$	$10.73 \pm 2.97\text{ a}$	$69.44 \pm 13.03\text{ a}$
自然林	$6.58 \pm 6.32\text{ a}$	$12.97 \pm 9.10\text{ a}$	$7.38 \pm 3.53\text{ b}$	$13.22 \pm 5.91\text{ a}$	$59.85 \pm 23.74\text{ a}$

注:同列不同字母表示不同土地利用方式间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

湿筛法获得的水稳定性团聚体组成见表2。各土地利用方式下,以 $<0.1\text{ mm}$ 和 $0.25\sim1\text{ mm}$ 粒级团聚体所占比例最大,分布在29%~42%之间,0.1~0.25 mm和 $>5\text{ mm}$ 团聚体含量较低。对各土地利用方式, $<0.1$

mm团聚体以旱地最高,0.1~0.25 mm团聚体差别不明显,0.25~1 mm团聚体以果园含量最高。值得注意的是,自然林下 $<1\text{ mm}$ 各粒级团聚体含量均较其他利用方式低,而 $>1\text{ mm}$ 各粒级团聚体含量显著增加。

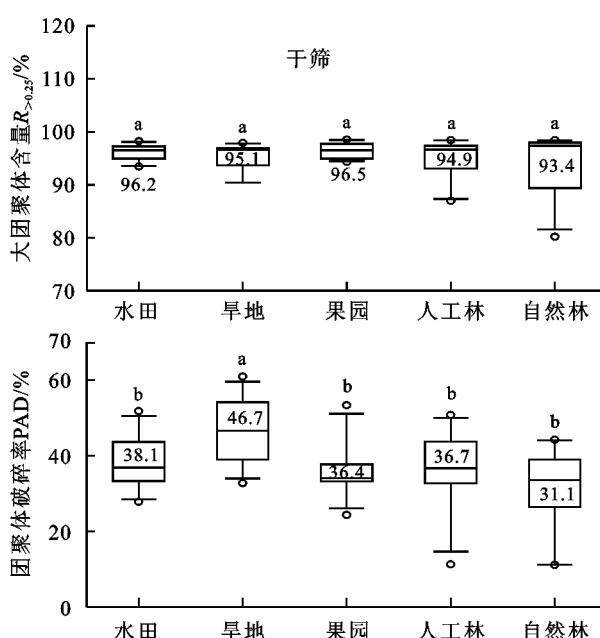
表2 不同土地利用方式下水稳定性团聚体组成

土地利用方式	$<0.1\text{ mm}$	0.1~0.25 mm	0.25~1 mm	1~5 mm	$>5\text{ mm}$
水田	$33.12 \pm 6.69\text{ b}$	$7.30 \pm 6.11\text{ a}$	$34.05 \pm 6.44\text{ b}$	$16.38 \pm 6.12\text{ b}$	$9.15 \pm 5.34\text{ a}$
旱地	$41.89 \pm 6.37\text{ a}$	$7.30 \pm 3.10\text{ a}$	$31.56 \pm 5.41\text{ b}$	$14.06 \pm 4.71\text{ b}$	$5.19 \pm 2.28\text{ b}$
果园	$32.22 \pm 7.13\text{ b}$	$6.33 \pm 1.62\text{ a}$	$40.30 \pm 6.16\text{ a}$	$16.70 \pm 5.12\text{ b}$	$4.45 \pm 3.67\text{ c}$
人工林	$33.54 \pm 10.21\text{ b}$	$6.22 \pm 2.08\text{ a}$	$33.69 \pm 7.42\text{ b}$	$17.83 \pm 5.89\text{ b}$	$8.72 \pm 3.94\text{ ab}$
自然林	$29.84 \pm 12.20\text{ b}$	$5.41 \pm 1.70\text{ a}$	$29.22 \pm 7.61\text{ b}$	$23.41 \pm 7.84\text{ a}$	$12.12 \pm 5.30\text{ a}$

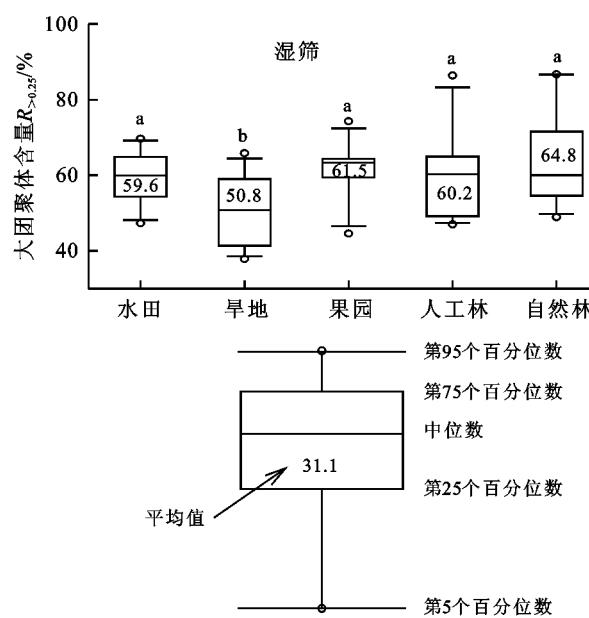
## 2.2 土壤团聚体稳定性分析

大团聚体含量 $R_{>0.25}$ 作为重要指标可定量评价土壤结构稳定性<sup>[4]</sup>。由图2可知,干筛获得的机械稳定性 $R_{>0.25}$ 在各土地利用方式间没有显著差异,分布在93.4%~96.5%之间。从湿筛法获得的水稳定性 $R_{>0.25}$ 来看,各土地利用方式 $R_{>0.25}$ 表现为:自然林64.8%,果园61.5%,人工林60.2%,水田59.6%,

旱地50.8%,以自然林水稳定性 $R_{>0.25}$ 最多,旱地最少,说明在自然林条件下土壤抗蚀性相对较好。团聚体破坏率(PAD)是湿筛后破碎的团聚体比率,其数值越小,土壤结构越稳定<sup>[12]</sup>。从图2可以看出,以旱地土壤团聚体湿筛后PAD最高,达到了47%,水田、果园和人工林的PAD基本相当,而以自然林团聚体PAD最低,说明自然林地土壤团聚体最稳定。



注:不同字母表示不同土地利用方式间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图2 不同土地利用方式下土壤机械(干筛)和水(湿筛)稳定性 $R_{>0.25}$ 含量及其PAD

## 2.3 土壤团聚体直径分析

土壤团聚体直径分析通常采用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)<sup>[13]</sup>。从图 3 可以看出,在干筛条件下,各土地利用方式下 MWD 表现为:人工林(4.69 mm)>水田(4.51 mm)>自然林(4.25 mm)>果园(4.05 mm)>旱地(4.00 mm);GMD 表现为:人工林(3.63 mm)>水田(3.40 mm)>自然林(3.24 mm)>旱地(2.89 mm)=果园(2.89 mm),其中人工林相对旱地和果园差异达到显著水平。说明在 5 种土地利用

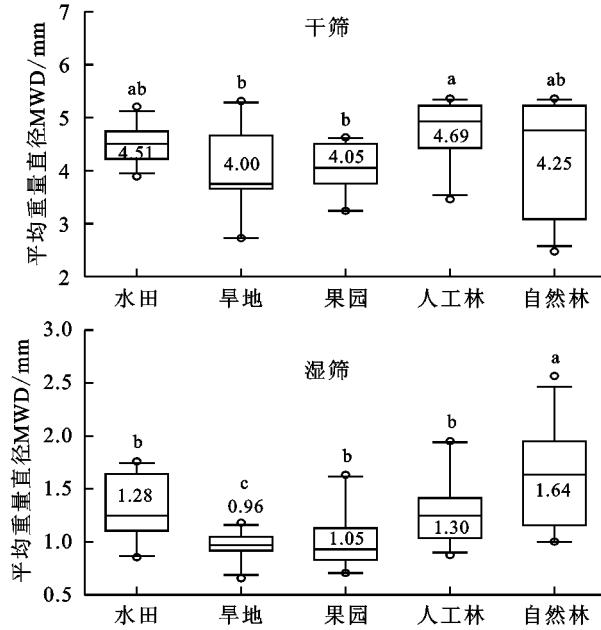


图 3 不同土地利用方式下土壤机械(干篩)和水(湿篩)稳定性团聚体的 MWD 和 GMD

## 2.4 土壤团聚体分形维数

本研究在获得  $\lg(W_i/W_0)$  和  $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$  的基础上,通过回归分析计算得到不同土地利用方式下土壤团聚体的分形维数  $D$  值(图 4)。因土壤团聚体表面的拓扑是 2,其干篩和湿篩的分维增值分别介于 0.17~0.27 和 0.70~0.80 之间,故其  $D$  值分别分布在 2.17~2.27 和 2.70~2.80 之间。从图 4 可以看出,2 种篩分方

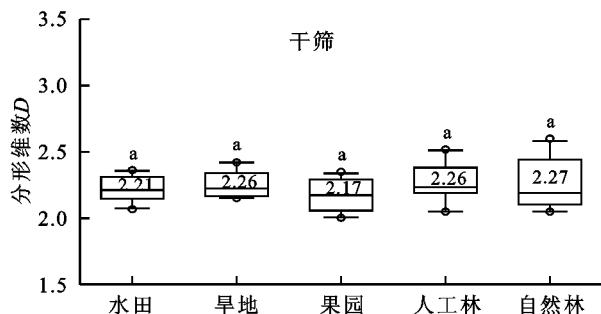
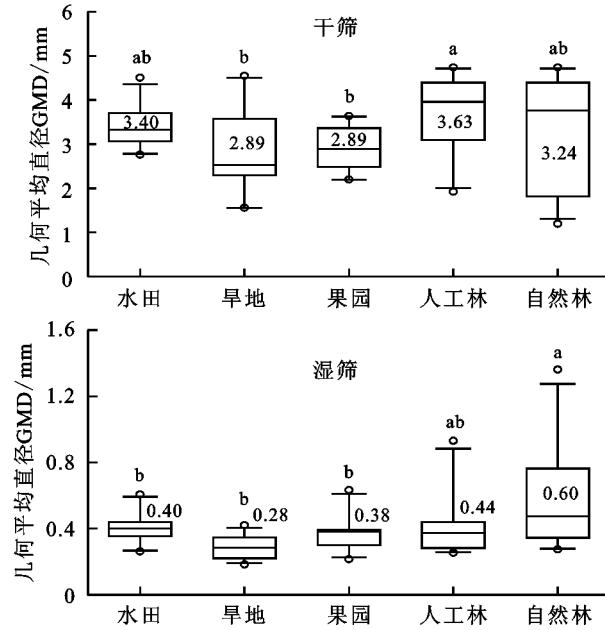


图 4 不同土地利用方式下土壤机械(干篩)和水(湿篩)稳定性团聚体的分形维数  $D$

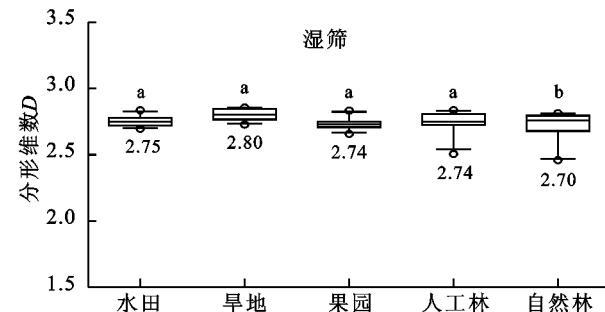
## 2.5 土壤团聚体组成与各参数的相关性分析

相关性结果表明(表 3 和表 4),无论是机械稳定性团聚体还是水稳定性团聚体,其 MWD 和 GMD 均与  $D$  值呈显著负相关,干篩条件下其相关系数分别为 -0.634 和 -0.709,湿篩条件下其相关系数分别

方式中,人工林的土壤团聚体机械稳定性相对较好。在湿篩条件下,各土地利用方式下 MWD 表现为:自然林(1.64 mm)>人工林(1.30 mm)>水田(1.28 mm)>果园(1.05 mm)>旱地(0.96 mm),其中自然林地团聚体 MWD 显著高于其他 4 种土地利用方式;GMD 表现为:自然林(0.60 mm)>人工林(0.44 mm)>水田(0.40 mm)>果园(0.38 mm)>旱地(0.28 mm),说明自然林地土壤 MWD 和 GMD 值均体现了其土壤团聚体水稳定性最好。



法下 5 种土地利用方式土壤团聚体  $D$  值表现出不同的变化规律。干篩条件下的  $D$  值以自然林最高(2.27),旱地、人工林、水田次之(分别为 2.26, 2.21),果园最低为 2.17。湿篩条件下的  $D$  值表现为:旱地(2.80)>水田(2.75)>果园(2.74)=人工林(2.74)>自然林(2.70),其中自然林地  $D$  值显著低于其他 4 种土地利用方式。



为 -0.741 和 -0.933,说明土壤团聚体的 MWD 和 GMD 越大,  $D$  值就越小。

从计算过程可知,MWD、GMD 值的计算与团聚体由小到大的累积含量有关,对机械稳定性团聚体(表 3), $<0.25, 0.25\sim1, 1\sim2, 2\sim5$  mm 粒径的土壤机械稳定性团聚

体与 MWD 和 GMD 均呈显著负相关,但 $>5$  mm 粒径的土壤机械稳定性团聚体与 MWD 和 GMD 均呈显著正相关,其正负相关性的团聚体粒级界线为 5 mm。对水稳定性团聚体(表 4), $0.1\sim0.25, 0.25\sim1$  mm 粒径的土壤水稳定性团聚体与 MWD 和 GMD 均呈显著负相关,而 $1\sim5, >5$  mm 粒径的土壤水稳定性团聚体与 MWD 和 GMD 均呈显著正相关,其正负相关性以 1 mm 团聚体粒级为界。

从土壤团聚体 D 值与不同大小团聚体含量的相关性来看(表 3 和表 4),机械稳定性团聚体的 D 值与粒径 $<0.25, 0.25\sim1, 1\sim5$  mm 的团聚体均呈显著正相关,相关系数分别为 0.917, 0.533, 0.412, 与 $1\sim2$

mm 粒径的机械稳定性团聚体也呈正相关但不显著;而与 $>5$  mm 粒径的机械稳定性团聚体呈显著负相关,相关系数为-0.592。其正负相关性以 5 mm 为界,其 D 值与 $>5$  mm 团聚体含量呈负相关,与 $<5$  mm 团聚体含量呈正相关。水稳定性团聚体 D 值与粒径 $<0.1$  mm 的土壤水稳定性团聚体呈显著正相关,相关系数为 0.96;与 $0.1\sim0.25$  mm 粒径的土壤水稳定性团聚体呈正相关但不显著,相关系数为 0.291;而与 $0.25\sim1, 1\sim5, >5$  mm 粒径的土壤水稳定性团聚体呈显著(或极显著)负相关,相关系数分别为-0.313, -0.713 和-0.518,正负相关性以 0.25 mm 为界。

表 3 土壤机械稳定性团聚体各参数间相关性分析

参数	MWD	GMD	D	不同粒级土壤机械稳定性团聚体				
				$<0.25$ mm	$0.25\sim1$ mm	$1\sim2$ mm	$2\sim5$ mm	$>5$ mm
平均质量直径 MWD	1.000	0.984 <sup>**</sup>	-0.634 <sup>**</sup>	-0.741 <sup>**</sup>	-0.972 <sup>**</sup>	-0.856 <sup>**</sup>	-0.853 <sup>**</sup>	0.996 <sup>**</sup>
几何平均直径 GMD		1.000	-0.709 <sup>**</sup>	-0.767 <sup>**</sup>	-0.952 <sup>**</sup>	-0.815 <sup>**</sup>	-0.816 <sup>**</sup>	0.975 <sup>**</sup>
分形维数 D			1.000	0.917 <sup>**</sup>	0.533 <sup>**</sup>	0.200	0.412 <sup>**</sup>	-0.592 <sup>**</sup>

注: \* 代表相关性达到显著水平( $P<0.05$ ); \*\* 代表相关性达到极显著水平( $P<0.01$ )。下同。

表 4 土壤水稳定性团聚体各参数间相关性分析

参数	MWD	GMD	D	土壤水稳定性团聚体				
				$<0.25$ mm	$0.25\sim1$ mm	$1\sim2$ mm	$2\sim5$ mm	$>5$ mm
平均质量直径 MWD	1.000	0.903 <sup>**</sup>	-0.741 <sup>**</sup>	-0.742 <sup>**</sup>	-0.331*	-0.317*	0.814 <sup>**</sup>	0.902 <sup>**</sup>
几何平均直径 GMD		1.000	-0.933 <sup>**</sup>	-0.875 <sup>**</sup>	-0.346*	-0.018	0.824 <sup>**</sup>	0.718 <sup>**</sup>
分形维数 D			1.000	0.960 <sup>**</sup>	0.291	-0.313*	-0.713 <sup>**</sup>	-0.518 <sup>**</sup>

### 3 讨论

本研究采用沙维诺夫法干筛法和湿筛法相结合进行分析,2 种筛分方法在土壤样品的预处理和筛分过程各有优缺点<sup>[15]</sup>。通过干筛法获得的机械稳定性团聚体主要以 $>5$  mm 粒级为主,在 5 种土地利用方式中均占到 55% 以上,与陈山等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。与干筛法相反, $>5$  mm 的水稳定性团聚体在 5 种土地利用方式中占的比例相对最少,而 $<0.1$  mm 的团聚体占的比例最高。其原因是在湿筛中非水稳定性的大团聚体容易破碎形成小粒径的团聚体,说明湿筛法结果相对于干筛法重现性更好,更能真实反映土壤团聚体组成及其稳定性<sup>[15]</sup>。

土地利用方式的改变使土壤植被覆盖发生变化,植被类型造成的土壤质量变化<sup>[8]</sup>,会影响土壤团聚体稳定性指标(如 $R_{>0.25}$  和 PAD)。本研究中,干筛下获得机械稳定性 $R_{>0.25}$  变化依次是果园 $>$ 水田 $>$ 旱地 $>$ 人工林 $>$ 自然林,但彼此之间含量差异不大,最大差异仅为 3.1%。而在湿筛下,水稳定性 $R_{>0.25}$  变化依次是自然林 $>$ 果园 $>$ 人工林 $>$ 水田 $>$ 旱地,彼此之间差异相对较大,说明南水北调丹江口库区水稳定性团聚体稳定性受土地利用类型的影响更大。PAD 与水稳定性 $R_{>0.25}$  变化趋势基本一致,均表现为自然林土壤抗蚀性及稳定性更好;而旱地土壤团聚结构及其稳定性较

弱。其主要机制是自然林分受到人为扰动较小,落叶残枝等凋落物对土壤的抚育,致使土壤团聚程度及其稳定性较其他土地利用类型更好<sup>[15]</sup>。

众多研究表明<sup>[5-6, 12-13]</sup>,土壤团聚体直径指标 MWD 和 GMD 值越大说明土壤团聚体稳定性越好,团聚度越高。本研究综合干筛法和湿筛法结果,林地(人工林和自然林)MWD 和 GMD 值较高,果园和旱地相对较低,其原因可能是果园和旱地相比于林地,耕作频率和使用强度较高,土壤得不到休息,造成团聚体稳定性变差<sup>[16]</sup>。陈山等<sup>[15]</sup>研究发现,果园和旱地的 MWD 值较低,而林地的 MWD 值相对最高;杨慧等<sup>[17]</sup>也证明了受人为扰动较大的旱地稳定性较差,而受人为扰动较小的林地稳定性较好。对水田土壤,水稻土团聚体的胶结物质主要是粘粒、铁氧化物和有机物等<sup>[18]</sup>,水稻土长期干湿交替循环,机械稳定性很难反映其实际情况,多数学者采用湿筛法来研究水田团聚体稳定性<sup>[18]</sup>。

土壤团聚体分形维数(D)可客观反映土壤团聚体的结构特征,D 值愈小,土壤的结构与稳定性愈好<sup>[5]</sup>。本研究结果表明,干筛法和湿筛法的结果有所不同,对机械稳定性团聚体 D 值为自然林 $>$ 旱地 $\approx$ 人工林 $>$ 水田 $>$ 果园;对水稳定性团聚体 D 值为旱地 $>$ 水田 $>$ 果园 $\approx$ 人工林 $>$ 自然林。其主要原因是机械稳定性团聚体 D 值反映的是非水稳定性团聚体和

水稳定性团聚体的总体状况<sup>[4]</sup>;而水稳定性团聚体D值排除了非水稳定性团聚体的影响,可更稳定地体现不同土地利用方式对土壤结构的影响<sup>[4]</sup>。刘毅等<sup>[19]</sup>对黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究发现,不同土地利用方式土壤D值同样呈现出人工林>农地>自然林地>裸地。

相关性分析结果表明,机械稳定性土壤团聚体MWD、GMD值和D值与各粒径团聚体含量的皆呈明显线性关系(除D值与1~2 mm粒径相关性不显著外,均达显著水平),其中正负相关性以5 mm为界。然而,水稳定性土壤团聚体MWD、GMD值和D值与各粒径团聚体含量的皆呈明显线性关系,其MWD、GMD值与各粒径团聚体含量的正负相关性以1 mm为界,而其D值与各粒径团聚体含量的正负相关性以0.25 mm为界。说明在土壤团聚化过程中,土壤团聚体从微团聚体(<0.25 mm)—中等团聚体(0.25~5 mm)—大团聚体(>5 mm)的转化中,0.25,1,5 mm粒级是较为关键的临界点。刘毅等<sup>[19]</sup>研究也认为,土壤团聚体从微团粒(<0.25 mm)到团粒(>0.25 mm)的转化中,0.25 mm粒级分界起着及其重要的作用,进而影响土壤团聚体分形维数以及土壤的结构性。

## 4 结论

(1)干筛获得的机械稳定性 $R_{>0.25}$ 在各土地利用方式间没有显著差异。湿筛法获得的水稳定性 $R_{>0.25}$ 以自然林最高,而以旱地最低且显著低于其他处理。PAD结果也进一步说明旱地土壤团聚体稳定性最差,自然林土壤团聚体稳定性相对较好。

(2)不同土地利用对土壤团聚体直径大小和D值的影响表现为林地(人工林和自然林)土壤结构性更好,其MWD和GMD值相对较高,D值相对较低。旱作农地(果园和旱地)土壤团聚结构性较差,其MWD和GMD值相对较低,D值相对较高。

(3)相关性分析结果表明,土壤团聚体MWD、GMD值和D值与各粒径团聚体含量的总体上呈明显线性关系,且在土壤团聚化过程中,土壤团聚体从微团聚体(<0.25 mm)—中等团聚体(0.25~5 mm)—大团聚体(>5 mm)的转化中,0.25,1,5 mm粒级是较为关键的临界点。

## 参考文献:

- [1] Cates A M, Ruark M D, Hettcke J L, et al. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155(1): 371-380.
- [2] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [3] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68(1): A4-A9.
- [4] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1042-1049.
- [5] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].*农业工程学报*,2011,27(1):340-347.
- [6] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].*环境科学*,2014,35(12):4696-4704.
- [7] 郑子成,何淑勤,王永东,等.不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J].*水土保持学报*,2010,24(3):170-174.
- [8] Spaccini R, Piccolo A. Effect of field managements for soil matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129(6): 45-51.
- [9] 刘冬碧,张小勇,巴瑞先,等.鄂西北丹江口库区大气氮沉降[J].*生态学报*,2015,35(10):3419-3427.
- [10] Cheng X L, Yang Y H, Li M, et al. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 415-424.
- [11] Liu Y, Tao Y, Wan K, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(3): 34-40.
- [12] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].*水土保持学报*,2014,28(1):129-135.
- [13] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J].*生态学报*,2006,26(2):364-372.
- [14] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征土壤分形特征[J].*科学通报*,1993,38(20):1896-1899.
- [15] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(5):211-216.
- [16] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(5):187-199.
- [17] 杨慧,张连凯,于爽,等.桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳定性团聚体特征的影响[J].*中国岩溶*,2012,31(3):265-271.
- [18] 郭菊花.不同施肥措施对水稻土团聚体结构和有机碳稳定性的影响[D].南京:南京农业大学,2007.
- [19] 刘毅,李世清,李生秀.黄土高原不同生境土壤结构体分形维数研究[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2008,36(1):86-100.