

# 晋西北黄土丘陵区小流域土壤团聚体 稳定性及其分异特征

胡磊<sup>1</sup>, 余冬立<sup>2</sup>, 杨震<sup>1</sup>

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 210098; 2.中国科学院

教育部水土保持与生态环境研究中心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)

**摘 要:**土壤团聚体是土壤结构的基本组成部分,在影响水分入渗和转移、土壤肥力方面起到重要作用。分析土壤团聚体结构特征及其稳定性影响机制,对揭示黄土高原退耕还林还草生态环境效应具有重要意义。研究以晋西北朱家川流域内 7 个坝控小流域不同土地利用方式(林地、草地、农地)下土壤团聚体为研究对象,利用 GIS 平台空间分析模块提取样点地形因子,用湿筛法分析水稳性团聚体粒径组成,借助通径分析法分析各理化因子对于分形维数的影响。结果表明:晋西北朱家川流域不同土地利用方式下,土壤团聚体稳定性存在显著差异,团聚体稳定性从高到低顺序为:林地>草地>农地。分形维数和小粒径团聚体含量呈显著正相关,而与大粒径团聚体含量呈显著负相关。处于流域下游的后会沟流域土壤团聚体稳定性最低,中游柳树咀沟流域土壤团聚体结构稳定性最优。对土壤团聚体分形维数影响最大的因子是有机质含量,其次是海拔高度,直接通径系数分别为 $-0.427$ 和 $-0.229$ ,决策系数分别为 $0.168$ 和 $0.085$ 。研究结果可为黄土高原生态恢复和土地合理利用提供科学依据。

**关键词:**土壤团聚体;土壤结构;土地利用;流域;通径分析

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0072-06

## Stability of Soil Aggregates and Its Differentiation Characteristics in Small Watersheds in Loess Hilly Region of Northwestern Shanxi

HU Lei<sup>1</sup>, SHE Dongli<sup>2</sup>, YANG Zhen<sup>1</sup>

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil aggregates are the basic components of soil structure and play an important role in affecting water infiltration and transfer, and soil fertility. Analysis of the structure characteristics of soil aggregates and their stability influencing mechanism is of great significance to reveal the ecological and environmental effects of Grain for Green on the Loess Plateau. We took soil aggregates under different land use patterns (forest, grass, farmland) in seven dam-controlled small watersheds in the Zhujiachuan Watershed of northwest Shanxi as the research objects, and used the spatial analysis module of the GIS platform to extract the topographic factors of the sample points, and the wet sieve method to analyze the particle size composition of water-stable agglomerates, and analyzed the influence of physical and chemical factors on the fractal dimension by the method of path analysis. The results show that there are significant differences in the stability of soil aggregates under different land use methods in the Zhujiachuan watershed of northwestern Shanxi; the order of stability of aggregates is: forest>grass>farmland; the fractal dimension is significantly positively correlated with the contents of small-sized aggregates, but is significantly negatively correlated with the contents of large-sized aggregates; the soil aggregate stability of the Houhuigou watershed in the lower reaches of the watershed is most susceptible and the structure stability of the soil aggregates in the Liushu-zuigou watershed in the middle reaches is optimal; the factor that has the greatest influence on the fractal

收稿日期:2020-12-14

修回日期:2021-01-10

资助项目:中国科学院“西部之光”计划项目“淤地坝水沙变化对坝控小流域侵蚀环境演变的响应机理”

第一作者:胡磊(1998—),男,江苏徐州人,在读硕士研究生,主要从事水土保持生态修复研究。E-mail:1263060711@qq.com

通信作者:余冬立(1980—),男,湖南长沙人,教授,博士,主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail:shedongli@hhu.edu.cn

dimension of soil aggregates is organic matter content, followed by altitude, and the direct path coefficients are  $-0.427$  and  $-0.229$ , and the decision coefficients are  $0.168\ 0$  and  $0.085\ 6$ , respectively. These research results can provide the scientific basis for ecological restoration and rational use of land in the Loess Plateau.

**Keywords:** soil aggregate; soil structure; land use; watershed; path analysis

土壤团聚体是土壤结构的基本组成部分<sup>[1]</sup>,由细小土壤颗粒经过纠缠、胶结和重排列作用形成<sup>[2]</sup>。土壤团聚结构在影响水分入渗和运移、碳氮物质循环和养分有效性等方面起到重要作用。土壤团聚体稳定性受大团聚体含量( $R_{0.25}$ )、水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数( $D$ )等影响, $R_{0.25}$ , MWD 和 GMD 越大, $D$  越小,土壤团聚体稳定性和抗蚀性越好<sup>[3]</sup>。土壤团聚体在形成过程中受到各种因素的共同作用,使其形态、组合和功能各有不同,具有一定的自相似性和分形特征,故可以用分形理论研究土壤团聚体结构问题<sup>[4]</sup>。

黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一。流域年均降水较少,土地沙化与土壤侵蚀问题制约着当地经济发展。土壤团聚体稳定性影响着土壤肥力和抵抗外界侵蚀的能力,因此,改善土壤团聚体稳定性,提高土壤抗蚀能力是黄土丘陵区土壤改良亟待解决的问题。目前很多学者致力于土壤团聚体稳定性的研究,如李娟等<sup>[5]</sup>研究认为黄土高原林地和水稻田利用方式有利于提高团聚体的含量和质量,安韶山等<sup>[6]</sup>认为有机质在大粒径土壤团聚体内含量更高,对土壤团聚体稳定性贡献较大,这些研究多集中于单个因子对团聚体稳定性的影响,而多因子影响下团聚体稳定性的探究却鲜有报道。基于此,本文以黄土高原晋西北朱家川流域为研究对象,借助通径分析法<sup>[7]</sup>分析土壤团聚体稳定性影响因子,并探究朱家川流域不同土地利用方式、不同小流域间土壤团聚体稳定性分异特征,为黄土高原生态恢复和土地合理利用提供理论支持和科学依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

供试土样来自山西省忻州市朱家川流域( $111^{\circ}04'—112^{\circ}12'E, 38^{\circ}39'—39^{\circ}24'N$ ),地处山西省西北部、黄土高原北部,发源于朔县利民沟,属黄河干流水系。流域范围大致北抵楼山,东至黑驼山及吕梁山,南达岢岚山地。境内地表黄土覆盖厚度较大,流水冲刷侵蚀作用导致其属于典型黄土丘陵沟壑区,总流域面积  $2\ 922\ km^2$ 。朱家川流域受温带大陆性季风气候影响,四季分明。年平均降水量为  $486.6\ mm$ ,年平均气温  $6^{\circ}C$ ,年无霜期  $137\ d$ ,年均日照时数  $2\ 844.4\ h$ 。

流域主要土壤类型为栗褐土和风沙土。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 于 2019 年 7—9 月在朱家川流域进行实地调查和土样采集。沿流域从上游到下游分别选取细岭沟、华家沟、郃家峪沟、柳树咀沟、高家沟、丛岭沟、后会沟 7 条典型淤地坝控制小流域进行采样研究。分别在各小流域内按土地利用类型面积比例选取林地、草地、农地 3 种利用方式下 10 个样点(林地 3 个、草地 3 个、农地 4 个),共计 70 个样点,利用 GPS 标记样点经纬度,利用 ArcGIS 提取坝控小流域面积(表 1)。采用直径  $5\ cm$  的环刀采集各样点  $100\ cm^3$  原状土样,同时采用五点法采集  $0—20\ cm$  土层约  $750\ g$  扰动土样带回实验室。利用无人机航拍结合 RTK 设备测量技术获取各小流域高清航拍影像,经软件处理后得到高精度 DEM 及正射影像图。利用校正后的 DEM 数字高程模型,在 GIS 平台空间分析模块下提取各样点的相关地形数据,包括海拔(Elevation)、坡度(Slope)、坡向(Aspect)、剖面曲率(Profile curvature)、平面曲率(Plan curvature)、粗糙度(Roughness)等。

1.2.2 试验方法 采用烘干法测定原状土土壤容重。扰动土样待自然风干后,沿土壤天然裂隙结构掰成小土块并除去植物残根和石块等,再过  $5\ mm$  筛。采用湿筛法<sup>[8]</sup>按  $5\sim2\ mm, 2\sim1\ mm, 1\sim0.25\ mm, 0.25\sim0.053\ mm, <0.053\ mm$  等 5 个粒级测定土壤团聚体组成。分别将土样碾碎后过  $2\ mm$  和  $0.149\ mm$  筛,采用激光粒度仪(Bettersize 2000)测定土壤机械组成(砂粒、粉粒、黏粒),采用重铬酸钾容量法—外加热法<sup>[9]</sup>测定土壤有机质含量。

## 1.3 数据处理与分析

(1) 土样中大于  $0.25\ mm$  团聚体含量  $R_{0.25}$ , 计算公式为:

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{<0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_i x_i \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[ \left( \frac{\sum_i \omega_i \ln x_i}{\sum_i \omega_i} \right) \right] \quad (3)$$

土壤团聚体分形维数  $D$  采用杨培岭等<sup>[10]</sup> 提出的土壤颗粒分形模型计算:

$$(3-D)\lg(\overline{x_i}/x_{\max})=\lg[M(r<\overline{x_i})/M_T] \quad (4)$$

式中: $M(r<\overline{x_i})$  为小于某一粒径的土壤质量(g);

$M_{<0.25}$  为小于 0.25 mm 的土壤质量(g); $M_T$  为土壤总质量(g); $\overline{x_i}$  为土壤各粒径的平均直径(mm); $x_{\max}$  为最大粒径的平均直径(mm); $\omega_i$  为土壤各粒径的质量百分比(%)。

表 1 小流域地理位置及海拔信息

| 位置 | 名称   | 经度 E                        | 纬度 N                      | 面积/km <sup>2</sup> |
|----|------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|
| 下游 | 后会沟  | 111°0′58.66″—111°1′52.67″   | 38°59′9.99″—38°59′57.74″  | 1.029              |
|    | 丛岭沟  | 111°17′46.33″—111°18′19.96″ | 38°57′12.62″—38°57′55.87″ | 0.570              |
|    | 高家沟  | 111°27′5.05″—111°27′40.62″  | 39°4′38.34″—39°4′59.65″   | 0.292              |
| 中游 | 柳树咀沟 | 111°39′47.43″—111°40′23.30″ | 38°57′20.73″—38°57′42.22″ | 0.377              |
|    | 郃家峪  | 111°35′18.43″—111°35′56.05″ | 39°5′1.70″—39°5′22.26″    | 0.370              |
|    | 华家沟  | 111°39′51.99″—111°40′21.12″ | 39°11′35.15″—39°12′5.07″  | 0.408              |
| 上游 | 细岭沟  | 111°55′7.35″—111°55′43.22″  | 39°6′11.52″—39°6′47.30″   | 0.613              |

(2) 通径分析理论中当许多自变量共同影响一个因变量时,自变量  $x_i$  与因变量  $y$  间的通径关系:

$$r_{iy}=P_{iy}+\sum P_{ij} \quad (5)$$

$$P_{ij}=r_{ij}\times P_{jy} \quad (6)$$

$$R_{(i)}^2=P_{iy}^2+2P_{iy}\sum P_{ij} \quad (7)$$

式中: $r_{iy}$  为  $x_i$  与  $y$  相关系数; $P_{iy}$  为  $x_i$  与  $y$  直接通径系数; $P_{ij}$  为  $x_i$  通过  $x_j$  对  $y$  间接通径系数; $r_{ij}$  为  $x_i$  与  $x_j$  相关系数; $P_{jy}$  为  $x_j$  与  $y$  直接通径系数; $R_{(i)}^2$  为  $x_j$  对  $y$  的决策系数。

采用 Excel 2016 软件对数据进行整理和分形维

数的线性回归拟合;利用 SPSS 23.0 软件进行数据间 Pearson 相关性分析和通径分析。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤团聚体组成和分形特征  
借助土壤团聚体组成(表 2)可以分析土壤结构的稳定性<sup>[11]</sup>。大团聚体(>0.25 mm)含量越大,土壤团聚体稳定性和分布情况较好。农地、草地、林地的  $R_{0.25}$  分别为 33.55%,35.56%和 41.67%,林地土壤团聚体稳定性优于农地和草地。

表 2 土壤水稳性团聚体组成及分形维数

| 类型 | 土壤水稳性团聚体组成/mm |       |        |            |        | $R_{0.25}$ | 分形<br>维数 $D$ | $R^2$ |
|----|---------------|-------|--------|------------|--------|------------|--------------|-------|
|    | 5~2           | 2~1   | 1~0.25 | 0.25~0.053 | <0.053 |            |              |       |
| 农地 | 0.81          | 13.32 | 19.42  | 35.75      | 30.70  | 33.55      | 2.833        | 0.922 |
| 草地 | 3.63          | 17.83 | 14.10  | 35.00      | 29.43  | 35.56      | 2.831        | 0.915 |
| 林地 | 2.97          | 20.66 | 18.04  | 33.50      | 24.82  | 41.67      | 2.805        | 0.911 |

土壤团粒结构分形维数  $D$  能反映土壤水稳性大团聚体含量对土壤稳定性及结构的影响<sup>[12]</sup>,表现为团聚体分形维数越小,土壤结构和稳定性越好,而 MWD 和 GMD 则相反。

本研究土壤团聚体分形维数用线性方程拟合度

高, $R^2$  均在 0.9 以上。分形维数  $D$  表现出林地<草地<农地,而对于 MWD,GMD,则均表现出林地>草地>农地(图 1),表明林地土壤结构稳定性较好,树木种植降低了土壤结构分形维数,土壤团粒结构得到改善。

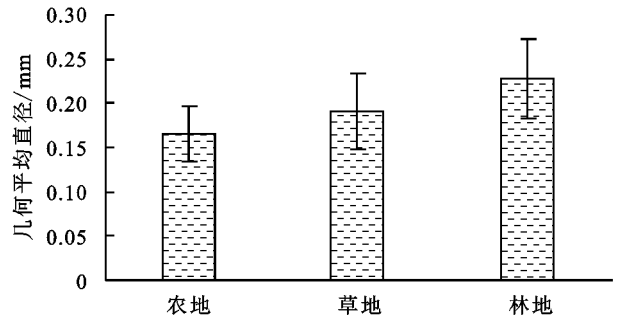
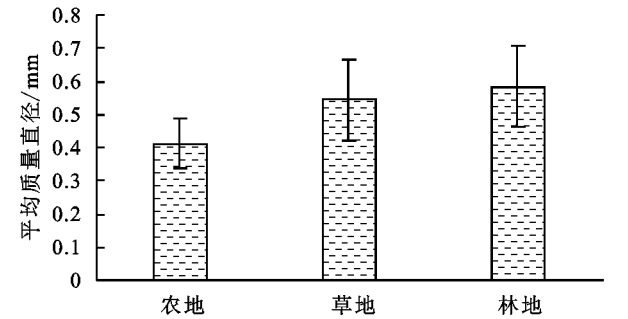


图 1 不同土地利用方式特征直径

2.2 不同土地利用方式下土壤团聚体各参数间相关性分析

平均重量直径 MWD、几何平均直径 GMD 和分

形维数  $D$  均可反映土壤团聚体的团聚程度,各参数间存在显著或极显著的相关性(表 3)。朱家川流域土壤 MWD 和 GMD 均与  $D$  呈极显著负相关,而流

域内 3 种土地利用方式 MWD 和 GMD 之间均呈极显著正相关( $p<0.01$ )。农地土壤 MWD 和 GMD 均与 2~1 mm 和 1~0.25 mm 团聚体含量呈极显著正相关,与<0.25 mm 的小粒径团聚体含量呈极显著负相关,两者与各粒径团聚体含量的正负相关性均以 0.25 mm 为界。草地土壤 MWD 和 GMD 均与 5~2 mm 和 2~1 mm 团聚体含量呈极显著正相关,与 0.25~0.053

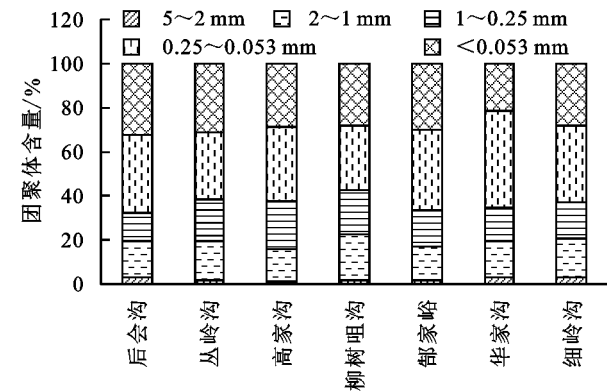
mm 团聚体含量呈极显著负相关,两者与各粒径团聚体含量的正负相关性界线为 1 mm。林地土壤 MWD 和 GMD 均与 5~2 mm 和 2~1 mm 团聚体含量呈极显著或显著正相关( $p<0.05$ ), GMD 与<0.053 mm 小粒径团聚体含量呈极显著负相关,两者与各粒径团聚体含量的正负相关性界线为 1 mm。因此,大粒径团聚体含量对提高土壤 MWD 和 GMD 有显著效果。

表 3 团聚体各参数间相关性分析

| 类型 | 参数  | MWD | GMD     | D        | 土壤水稳性团聚体粒径/mm |          |          |            |          |
|----|-----|-----|---------|----------|---------------|----------|----------|------------|----------|
|    |     |     |         |          | 5~2           | 2~1      | 1~0.25   | 0.25~0.053 | <0.053   |
| 农地 | MWD | 1   | 0.820** | -0.533** | 0.024         | 0.889**  | 0.574**  | -0.727**   | -0.675** |
|    | GMD |     | 1       | -0.681** | 0.008         | 0.579**  | 0.722**  | -0.603**   | -0.601** |
|    | D   |     |         | 1        | -0.147        | -0.130   | -0.441*  | 0.461*     | 0.989**  |
| 草地 | MWD | 1   | 0.838** | -0.977** | 0.803**       | 0.605**  | -0.054   | -0.801**   | -0.122   |
|    | GMD |     | 1       | -0.604** | 0.872**       | 0.655**  | -0.353   | -0.637**   | -0.138   |
|    | D   |     |         | 1        | -0.076        | -0.793** | -0.418*  | 0.759**    | 0.977**  |
| 林地 | MWD | 1   | 0.818** | -0.630** | 0.882**       | 0.652**  | -0.207   | -0.128     | -0.318   |
|    | GMD |     | 1       | -0.652** | 0.651**       | 0.504*   | -0.277   | -0.301     | -0.763** |
|    | D   |     |         | 1        | -0.101        | -0.069   | -0.587** | 0.832**    | 0.958**  |

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

朱家川流域 3 种土地利用方式下土壤分形维数 D 均与 1~0.25 mm 团聚体含量呈显著或极显著负相关,与<0.25 mm 小粒径团聚体含量均呈显著或极显著正相关,其正负相关性的团聚体粒径界线均为 0.25 mm。小粒径团聚体含量对于分形维数提高贡献较大,大粒径团聚体含量增加可以显著降低土壤分形维数。



2.3 不同坝控小流域土壤团聚体稳定性差异分析

水稳性团聚体粒径分析显示,7 个坝控小流域 0—20 cm 土层中土壤  $R_{0.25}$  平均在 36% 左右(图 2)。其中,中游柳树咀沟流域土壤  $R_{0.25}$  达到 42.4%,为所有小流域中最高值,下游后会沟流域土壤  $R_{0.25}$  最低,仅为 32.2%,其余各小流域土壤  $R_{0.25}$  差异不显著。

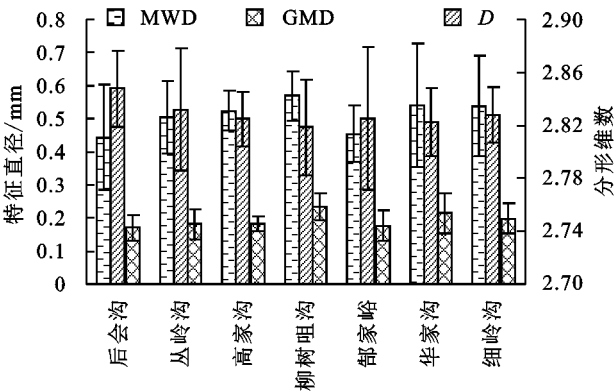


图 2 各坝控小流域土壤水稳性团聚体粒径分布及稳定性指标

下游后会沟流域土壤 MWD 和 GMD 均最低,分别为 0.44 mm 和 0.17 mm,而中游柳树咀沟流域土壤 MWD 和 GMD 最大,分别为 0.57 mm 和 0.23 mm,其余各坝控小流域土壤 MWD 和 GMD 值差异不显著。下游后会沟流域土壤团聚体分形维数 D 最大,达到 2.85,其余各小流域土壤分形维数差异不明显。土壤团聚体分形维数最小的流域为中游的柳树咀沟流域,其值为 2.82,柳树咀沟流域土壤团聚体稳定性优于后会沟流域,这与上述 MWD 和 GMD 分析结果一致。下游后会沟流域土壤团粒结构最不稳定,

土壤抗蚀性较差,而中游柳树咀沟流域相反。

2.4 土壤团聚体分形维数影响因子的通径分析

应用通径分析法分析朱家川流域土壤团聚体分形维数 D 与其影响因子的关系,以土壤容重( $x_1$ )、有机质含量( $x_2$ )、粉粒含量( $x_3$ )、黏粒含量( $x_4$ )、海拔( $x_5$ )、坡度( $x_6$ )、坡向( $x_7$ )、剖面曲率( $x_8$ )、平面曲率( $x_9$ )、粗糙度( $x_{10}$ )作为影响分形维数的影响因子,参考与通径分析有关的矩阵算法<sup>[13]</sup>和数学模型<sup>[14]</sup>,分析团聚体分形维数与影响因子的相关性、通径系数与决策系数。表 4 为土壤团聚体影响因子指标间相关



性分析,表 5 为团聚体分形维数影响因子的通径分析,表中相关系数、直接通径系数、间接通径系数、间接通径系数之和及决策系数分别用  $r_{iy}$  ,  $P_{iy}$  ,  $P_{ij}$  ,  $\sum P_{ij}$  ,  $R^2_{(i)}$  表示。

表 4 各指标间相关性分析

| 变量       | $x_1$ | $x_2$     | $x_3$   | $x_4$    | $x_5$  | $x_6$    | $x_7$  | $x_8$   | $x_9$  | $x_{10}$ | $y$       |
|----------|-------|-----------|---------|----------|--------|----------|--------|---------|--------|----------|-----------|
| $x_1$    | 1     | -0.365 ** | 0.287 * | 0.271 *  | 0.121  | -0.053   | -0.005 | -0.154  | 0.094  | -0.021   | 0.195     |
| $x_2$    |       | 1         | 0.207   | 0.180    | 0.133  | -0.148   | 0.037  | 0.058   | 0.058  | -0.161   | -0.411 ** |
| $x_3$    |       |           | 1       | 0.851 ** | -0.122 | -0.304 * | 0.101  | -0.111  | 0.137  | -0.263 * | 0.081     |
| $x_4$    |       |           |         | 1        | -0.163 | -0.274 * | 0.038  | -0.166  | 0.112  | -0.249 * | 0.103     |
| $x_5$    |       |           |         |          | 1      | 0.159    | -0.090 | 0.252 * | -0.048 | 0.185    | -0.301 *  |
| $x_6$    |       |           |         |          |        | 1        | 0.130  | 0.164   | -0.060 | 0.958 ** | -0.016    |
| $x_7$    |       |           |         |          |        |          | 1      | 0.156   | -0.075 | 0.126    | -0.040    |
| $x_8$    |       |           |         |          |        |          |        | 1       | 0.061  | 0.132    | -0.110    |
| $x_9$    |       |           |         |          |        |          |        |         | 1      | -0.038   | 0.097     |
| $x_{10}$ |       |           |         |          |        |          |        |         |        | 1        | -0.005    |
| $y$      |       |           |         |          |        |          |        |         |        |          | 1         |

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 5 分形维数影响因子的通径分析

| 因子       | $r_{iy}$  | $P_{iy}$ | $P_{ij}$      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |          | $R^2_{(i)}$ |
|----------|-----------|----------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|-------------|
|          |           |          | $\sum P_{ij}$ | $x_1$  | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$  | $x_5$  | $x_6$  | $x_7$  | $x_8$  | $x_9$  | $x_{10}$ |             |
| $x_1$    | 0.195     | -0.045   | 0.240         |        | 0.156  | 0.024  | 0.020  | 0.028  | 0.002  | 0.000  | 0.002  | 0.009  | -0.001   | -0.0195     |
| $x_2$    | -0.411 ** | -0.427   | 0.017         | 0.016  |        | 0.018  | 0.013  | -0.030 | 0.006  | -0.002 | -0.001 | 0.005  | -0.009   | 0.1680      |
| $x_3$    | 0.081     | 0.085    | -0.004        | -0.013 | -0.088 |        | 0.064  | 0.028  | 0.012  | -0.005 | 0.001  | 0.013  | -0.015   | 0.0066      |
| $x_4$    | 0.103     | 0.075    | 0.028         | -0.012 | -0.077 | 0.072  |        | 0.037  | 0.011  | -0.002 | 0.002  | 0.010  | -0.014   | 0.0098      |
| $x_5$    | -0.301 *  | -0.229   | -0.072        | 0.005  | -0.057 | -0.010 | -0.012 |        | -0.006 | 0.004  | -0.003 | -0.004 | 0.010    | 0.0856      |
| $x_6$    | -0.016    | -0.039   | 0.023         | 0.002  | 0.063  | -0.026 | -0.021 | -0.037 |        | -0.006 | -0.002 | -0.005 | 0.054    | -0.0002     |
| $x_7$    | -0.040    | -0.049   | 0.010         | 0.000  | -0.016 | 0.009  | 0.003  | 0.021  | -0.005 |        | -0.002 | -0.007 | 0.007    | 0.0014      |
| $x_8$    | -0.110    | -0.011   | -0.099        | 0.007  | -0.025 | -0.009 | -0.012 | -0.058 | -0.006 | -0.008 |        | 0.006  | 0.007    | 0.0023      |
| $x_9$    | 0.097     | 0.092    | 0.005         | -0.004 | -0.025 | 0.012  | 0.008  | 0.011  | 0.002  | 0.004  | -0.001 |        | -0.002   | 0.0094      |
| $x_{10}$ | -0.005    | 0.056    | -0.062        | 0.001  | 0.069  | -0.022 | -0.019 | -0.042 | -0.037 | -0.006 | -0.001 | -0.003 |          | -0.0038     |

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

由表 5 及各变量间的回归分析,各因子( $x_1$ — $x_{10}$ )与分形维数( $y$ )间的线性回归方程为:

$$y=27.23-0.21x_1-0.042x_2+0.014x_3+0.043x_4-4.751x_5+0.036x_6-1.834x_7+0.013x_8+0.029x_9+0.334x_{10}$$

回归方程参数中, $F=21.03$ , $p=0.038<0.05$  达到显著水平,表明各因子对分形维数的综合线性影响显著,通径分析有意义。经计算误差项  $e$  对分形维数  $D$  直接通径系数为 0.263,表明部分对分形维数影响较大的指标未被考虑进本次通径分析中。各项影响因子对分形维数  $D$  的贡献不同。各因子与分形维数相关性按因子排序依次为  $x_2,x_5,x_1,x_8,x_4,x_9,x_3,x_7,x_6,x_{10}$ ,其中  $x_2,x_5,x_6,x_7,x_8,x_{10}$  均与  $D$  呈负相关, $x_2$ 和  $x_5$ 均与  $D$ 呈极显著( $p<0.01$ )或显著( $p<0.05$ )负相关。各因子对分形维数的直接通径系数由降序排列依次为  $x_2,x_5,x_9,x_3,x_4,x_{10},x_7,x_1,x_6,x_8$ ,有机质含量( $x_2$ )对分形维数的直接影响最大,且为制约作用( $P_{iy}=-0.427$ ),海拔高度( $x_5$ )位

于其次( $P_{iy}=-0.229$ )。按因子影响程度将决策系数  $R^2_{(i)}$ 排序列依次为  $x_2,x_5,x_1,x_4,x_9,x_3,x_{10},x_8,x_7,x_6$ ,表明有机质含量( $x_2$ )对分形维数的综合决定能力最大,对降低分形维数、提高土壤团粒结构稳定性作用显著,其次则为海拔高度( $x_5$ )。

3 讨论

朱家川流域土壤水稳性团聚体稳定性受土地利用方式影响显著。3 种土地利用类型对土壤团聚体稳定性影响强度为林地>草地>农地,表明退耕还林使土壤团聚结构得到改善。其主要机制是林地受人为扰动较少,残枝败叶等凋落物进入土壤分解出的有机质等养分对土壤的抚育,导致此种类型土壤团聚程度比其他土地利用类型更好<sup>[15]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤养分的富集库。所有坝控小流域中,下游后会沟流域  $R_{0.25}$  最低,仅为 32.2%,中游柳树咀沟流域  $R_{0.25}$  达到最高值 42.4%。除此之外,MWD 和 GMD 的最小值以及  $D$  的最大值都出现

在下游后会沟流域, MWD 和 GMD 的最大值、 $D$  的最小值均出现在中游柳树咀沟流域, 表明后会沟流域土壤抵抗侵蚀保持结构稳定、维持肥力性能最弱, 柳树咀沟流域土壤质量最高。柳树咀沟流域所处的中游地区植被群落多样性高且稳定, 植被枝叶繁密, 减少了降雨雨滴机械打击和消散作用对大团聚体结构的破坏<sup>[16]</sup>, 此外植物根系可以分泌高分子胶结物质, 把土壤的微团聚体纠缠为稳定的大团聚体<sup>[17]</sup>。

通径分析通过对自变量和因变量间相关性分解, 研究自变量对因变量的直接影响和间接影响, 准确反映其影响程度。利用通径分析统计和相关性分析发现, 有机质含量( $x_2$ )与海拔高度( $x_5$ )与  $D$  呈极显著( $p < 0.01$ )或显著( $p < 0.05$ )负相关, 说明土壤有机质含量越大、土壤所处海拔高度越高, 土壤分形维数越小, 土壤团粒结构稳定性越强。研究发现在各因子对分形维数的直接作用程度上, 有机质含量( $x_2$ )的直接通径系数最大且为负值, 对分形维数的提高起制约作用, 其次是海拔高度( $x_5$ ), 其影响也为负效应, 其余因子对分形维数直接影响并不显著。有机质含量( $x_2$ )对分形维数的综合决定能力(决策系数)也更大, 对降低分形维数作用更显著。导致以上结果的主要原因是有机质在土壤团聚体的形成中起重要胶结作用, 微团聚体中富集的活性矿物(铝/氧化铁)容易吸附有机质<sup>[18]</sup>, 在有机质的胶结作用下形成稳定的大团聚体, 使分形维数降低。海拔高度的增加对分形维数有负效应主要是流域海拔较高处受人为影响少, 土壤结构受破坏少, 团聚体稳定性好。误差项  $e$  对于土壤团聚体分形维数  $D$  的直接通径系数为 0.263, 表明回归方程中仍有部分对分形维数影响较大的指标未被考虑, 需进一步深入研究。

## 4 结论

(1) 晋西北朱家川流域不同土地利用方式下, 土壤团聚体稳定性存在显著差异, 团聚体稳定性从高到低顺序为: 林地 > 草地 > 农地。土壤团聚体分形维数和小粒径团聚体含量呈显著正相关, 与大粒径团聚体含量呈显著负相关。下游后会沟流域土壤团聚体稳定性最低, 土壤易受到侵蚀破坏, 而中游柳树咀沟流域土壤团聚体结构稳定性最优。

(2) 通过选取土壤容重、有机质含量、粉粒含量、黏粒含量、海拔、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、粗糙度等因子, 对土壤团聚体分形维数进行通径分析发现, 土壤有机质对土壤团聚体分形维数影响最大, 其次是海拔高度。

## 参考文献:

- [1] 杨燕, 张学鹏, 宁堂原, 等. 套作及秸秆还田对西兰花连作田土壤团聚体分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(Z2): 85-93.
- [2] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [3] 朱利霞, 陈志鹏, 任晓东, 等. 河南周口市杨树和女贞林地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布[J]. 湖北民族大学学报: 自然科学版, 2020, 38(3): 247-252.
- [4] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-55.
- [5] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 248-253, 259.
- [6] 安韶山, 张玄, 张扬, 等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 109-113.
- [7] Zhang F Y, Li L H, Ahmad S, et al. Using path analysis to identify the influence of climatic factors on spring peak flow dominated by snowmelt in an alpine watershed[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 990-1000.
- [8] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 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[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 265-270.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [10] 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[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [11] 任雅阁, 成杭新, 徐殿斗, 等. 典型农耕区棕壤水稳性团聚体及其有机碳特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 234-237, 266.
- [12] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 半湿润区长期施肥对土壤结构体分形特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 417-422.
- [13] 崔党群. 通径分析的矩阵算法[J]. 生物数学学报, 1994, 9(1): 71-76.
- [14] 程新意, 李少疆. 通径分析的数学模型[J]. 工程科学, 1990, 6(4): 99-105.
- [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] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 827-835.
- [17] 刘海威, 张少康, 焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 31-39.
- [18] 王莹, 尧水红, 李辉信, 等. 长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系[J]. 土壤, 2013, 45(4): 666-672.