汉江与嘉陵江源区土壤团聚体分布特征及机制研究

刘艳玲，庞奖励，黄春长，查小春，周亚利，王海鹏

（陕西师范大学地理科学与旅游学院，西安 710119）

摘要：以汉江与嘉陵江源区黄土母质上发育的土壤为研究对象，通过对土壤团聚体和理化性质的试验分析和数据解析，研究了两地土壤团聚体的分布规律及发生机制。结果表明：(1)汉江源区(LJH)团聚体的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值由 A 层的 83.73%，2.17 和 1.11 分别降为 C 层的 59.18%，0.40 和 0.26，嘉陵江源区(YJS)由 A 层的 69.72%，1.03 和 0.46 降为 C 层的 56.55%，0.52 和 0.27，分形维数(D)则随土层深度的加深而增大，即前者的 D 值由 A 层的 2.46 增为 C 层的 2.53，后者由 A 层的 2.50 增为 C 层的 2.57，表明土壤团聚体稳定性随土层深度增大而减弱，其中＞2，1～2 mm 团聚体对保持土壤的稳定性具有重要贡献。(2)土壤有机质、铁铝氧化物和颗粒组成中的粉粒是促进土壤大团聚体形成并维持其稳定性的重要影响因素，而 SiO_2、K_2O、黏粒、砂粒和碳酸钙在不同土壤环境中对团聚体稳定性起到截然相反的作用，即前三者在 LJH 剖面中对团聚体稳定性不利，在 YJS 剖面中反而有利于维持其稳定性，后两者促进 LJH 剖面团聚体形成，却破坏 YJS 剖面稳定性，Na_2O 水溶解后则对团聚体具有分散作用。(3)汉江源区的土壤，A 层团聚体稳定性强于嘉陵江源区，粉粒、有机质和铁铝氧化物为其主导因素，Bt 层土体致密，通透性弱，不利形成团聚体，稳定性弱于后者，C 层为母质层，两地团聚体稳定性皆较差，其不同发生层之间土体稳定性的差异要大于嘉陵江源区。

关键词：汉江源区；嘉陵江源区；土壤团聚体；分布特征

中图分类号：S152.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)02-0235-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.031

Study on the Distribution Characteristics and Mechanism of Soil Aggregates in the Source Area of Hanjiang River and Jialing River

LIU Yanling, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, ZHA Xiaochun, ZHOU Yali, WANG Haipeng

(*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119)

Abstract: The distribution and mechanism of soil aggregates in the source area of the Hanjiang river and Jialing River were studied by experimental and data analysis of soil aggregates and physic－chemical properties. The results showed that: (1) The content of aggregates of ＞0.25 mm ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of aggregates in the source area of Hanjiang River decreased from 83.73%, 2.17 and 1.11 of surface layer to 59.18%, 0.40 and 0.26 of parent material layer, respectively, while those of Jialing River decreased from 69.72%, 1.03 and 0.46 of surface layer to 56.55%, 0.52 and 0.27 of parent material layer. While the fractal dimension (D) increased with the depth deepening, and the D of the former increased from 2.46 of surface layer to 2.53 of parent material layer, and those of the latter increased from 2.50 of surface layer to 2.57 of parent material layer, indicating that the stability of soil aggregates decreased with the increases of depth. The ＞2 mm and 1～2 mm aggregates had important contribution to the stability of soil. (2) Organic matter, iron and aluminum oxides and silt in particle composition were important factors to promote the formation of soil aggregates and maintain their stability, while SiO_2, K_2O, clay, sand and calcium carbonate had the opposite effects on aggregate stability in different soil environments. In other words, the first three factors were unfavorable to the stability of aggregates in LJH profile, but are beneficial to maintain their stability in YJS profile. The last two factors promoted the formation of aggregates in LJH profile, but destroyed the stability of YJS profile. It had a dispersion effect on aggregates after Na_2O dissolved by water. (3) In the source area of Hanjiang River, the stability of aggregates in surface

收稿日期：2020-09-01

资助项目：国家自然科学基金项目(41271108)；国家自然科学基金重点项目(41030637)

第一作者：刘艳玲(1996—)，女，在读硕士研究生，主要从事土地利用与气候变化研究。E-mail：yanling_hn@163.com

通信作者：庞奖励(1963—)，男，教授，博士生导师，主要从事土地利用与土壤演变研究。E-mail：jlpang@snnu.edu.cn

layer was stronger than that in Jialing River source area, and the main factors were silt, organic matter and iron aluminum oxide. The soil mass of leaching layer was dense and weak in permeability, which was unfavorable for the formation of aggregates, and the stability was weaker than the latter. The stability of aggregates of the parent material layer in both places was poor. Besides, the stability difference of soil in the source area of Hanjiang River in different genetic layers was greater than that in the Jialing River.

Keywords: the source area of Hanjiang River; the source area of Jialing River; soil aggregate; distribution characteristics

汉江与嘉陵江源区分布有大量风成黄土,这些黄土发育的土壤成为当地主要的土壤资源,是粮食作物与多种经济作物的主要利用土地,故关注土壤质量状况对农业生产发展至关重要。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是衡量土壤质量的重要指标,也是土壤水、肥、气、热的重要交换场所,关系到土壤中物质与能量的循环转化,进而影响着植物的生长发育[1-5]。在小流域尺度的空间范围内,团聚体与土壤理化性质存在复杂的耦合关系,并对维持土壤结构稳定性和水土保持起到重要作用,对植被恢复、土地利用和作物生产具有重要意义[6-10]。在两江源地区,针对这些土壤的理化性质、肥力、资源、利用方式等问题研究较多,而有关它们的土壤团聚体的研究有限,且现有关于团聚体的研究多集中于土壤表层,而对其表下层研究较少,团聚体在整个土壤剖面上的纵向含量变化状况知之甚少。

本文选取两江源区自母质层发育的全剖面土壤,通过湿筛法研究两地不同发生层土壤团聚体分布特征,阐明两地团聚体稳定性状况与变异特点,并结合影响团聚体的土壤理化性质进一步探究其在不同区域对土壤结构稳定性的影响机制,这可为两江源区土壤质量评价、土壤结构的改善与土壤资源的合理利用提供一定的科学参考依据。

1 研究区概况

汉江自西向东穿行于秦岭与大巴山之间,其源区位于秦岭南侧的汉中盆地,属于北亚热带湿润季风气候区,温和湿润,降水充沛,降雨集中在 5—10 月,年平均降水量 873 mm,植被为常绿阔叶与落叶阔叶混交林。光热资源丰富,无霜期长,年均日照总时间约 2 000 h,年平均气温约 14.5 ℃,年积温约 5 000 ℃,无霜期 240 d 左右,年干燥度为 0.8～1。主要土壤类型为黄褐土和黄棕壤。

嘉陵江源区位于南秦岭山区,为暖温带半湿润山地气候,冬不严寒,夏无酷暑,小气候地区差异大,降雨集中在 4—10 月,年平均降水量 613 mm,植被多为暖温带落叶阔叶林。光热条件不足,年日照时间平均为 1 840 h,年平均气温约 11 ℃,年积温约 3 400 ℃,无霜期 190 d 左右,年干燥度约为 1.35。主要土壤类型为褐土和棕壤。

2 材料与方法

2.1 样品采集

基于野外的详细调研,选择李家河村和杨家山村为采样点(图 1)。李家河村(LJH)样地位于汉江源区,汉江左岸一级阶地上(33°11′24″N,107°11′24″E),地势平坦,长期栽种旱作农业,周边主要农作物有小麦、油菜、柑橘、樱桃等。杨家山村(YJS)样地位于嘉陵江源区河流阶地上(34°N,106°39′E),长期种植旱作农业,农作物主要有油菜、苹果树等。野外采样为自剖面顶部往下每 2 cm 连续采样(2019 年 5 月),其中李家河剖面采样深度为 178 cm,杨家河剖面采样深度为 110 cm 深度,其中未受干扰的原状土样用于土壤团聚体分析,受到人为干扰的土样用于进行理化性质分析。

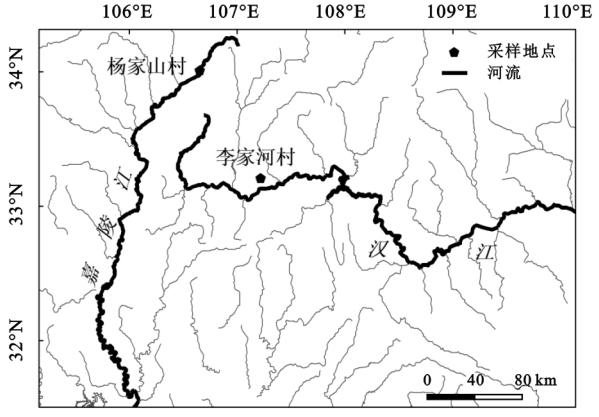


图 1 研究区域及采样地点

2.2 试验方法

不同粒级团聚体稳定机制各异,对团聚体粒径分布的研究通常以 0.25 mm 为界点,湿筛法中多数研究者[11-13]将最大筛目定为 2 mm 或 5 mm,最小筛目定为 0.25 mm 或 0.053 mm,而对后两者间的再分级研究相对较少,且更细(<0.1 mm)的团聚体易堵塞筛孔[14],相对难以筛分,影响测定的准确性,故结合实验室条件试将最小筛目定为 0.106 mm。

样品自然风干后开始进行试验分析。在土壤团聚体的测量中,由于所分析土样较为致密坚硬,为了尽量保持土壤原始团聚状态,未进行干筛,采用湿筛法[15]。轻轻剥掉采样时被破坏的土样外表面,称取

内部原状样品 50 g,用水进行缓慢润湿,再将样品置于由 2,1,0.5,0.25,0.106 mm 孔径筛组成的套筛中,使用土壤团粒分析仪以 30 次/min 频率与 38 mm 上下振荡幅度在水中振动 30 min,收集各个孔径筛上保留的土壤团聚体样品,先烘干大部分水分再自然风干至恒重,称重分析。筛分粒级分别为:>2,1~2,0.5~1,0.25~0.5,0.106~0.25,<0.106 mm,共 6 个粒级。

土壤 pH 的测定使用 PHSJ-4A 型实验室 pH 酸度计,采用水浸提法(水土比为 2.5∶1)。元素含量使用 S8TIGER型 X 射线荧光光谱仪进行测定,加入土壤标准参考样 GSS-8 和农业土壤成分分析标准物质 GBW(E)2 个标样以保证误差在 5%以下。烧失量测定使用箱式电阻炉灼烧。颗粒组成在 LS13320 型激光粒度仪中进行测量。碳酸钙测定采用气量法。土壤基本理化性质与主要氧化物含量分别见表 1 和表 2。

表 1　两江源区不同土层土壤理化性质

采样地	发生层	土层深度/cm	黏粒(<2 μm)/%	粉粒(2~50 μm)/%	砂粒(50~1000 μm)/%	烧失量/(g·kg^{-1})	pH	碳酸钙/(g·kg^{-1})
汉江	A	0—30	6.32	75.66	18.02	30.69	6.67	—
源区	Bt	30—140	17.52	77.99	4.49	30.43	7.13	—
(LJH)	C	140—178	7.73	76.83	15.44	19.74	7.06	—
嘉陵江	A	0—30	9.51	75.71	14.78	28.36	8.17	140.31
源区	Bt	30—78	13.64	78.71	7.64	27.88	8.13	129.24
(YJS)	C	78—110	7.41	74.35	18.24	21.76	8.28	194.19

表 2　两江源区不同土层土壤主要氧化物含量

采样地	土层深度/cm	Si_2O/(g·kg^{-1})	Al_2O_3/(g·kg^{-1})	Fe_2O_3/(g·kg^{-1})	CaO/(g·kg^{-1})	K_2O/(g·kg^{-1})	MgO/(g·kg^{-1})	Na_2O/(g·kg^{-1})
汉江	0—30	655.16	152.79	57.26	10.88	25.03	17.69	10.07
源区	30—140	659.11	153.96	57.68	10.12	26.10	18.46	9.85
(LJH)	140—178	669.82	149.62	55.07	9.39	25.87	17.37	9.47
嘉陵江	0—30	548.50	126.05	47.27	98.14	23.55	22.45	12.17
源区	30—78	554.23	127.28	47.19	92.73	23.82	21.93	12.78
(YJS)	78—110	514.95	116.78	43.02	127.91	21.61	21.67	13.03

2.3　土壤团聚体指标

评价土壤团聚体稳定性的常用指标为大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及分形维数(D)。计算公式分别为:

$R_{0.25}$为>0.25 mm 的土壤团聚体的质量百分含量(%):

$$R_{0.25}=\left(\frac{M_{i>0.25}}{M_T}\right)\times 100\% \quad (1)$$

注:$M_{i>0.25}$为粒级>0.25 mm 的团聚体质量(g);M_T为样品总质量(g)。

MWD 为每一级团聚体重量百分数乘以该粒级的平均直径之和,其上限是 7.5 mm,下限为 0.375 mm:

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n}(\overline{R}_i W_i) \quad (2)$$

以及 GMD 公式:

$$\mathrm{GMD}=\exp\left[\sum_{i=1}^{n}(W_i \ln \overline{R}_i)\right] \quad (3)$$

式中:$\overline{R}_i$ 为第 i 级团聚体的平均直径(mm);W_i 为第 i 级团聚体质量占样品总质量百分比(%)。

D 值采用的公式:

$$\lg(M_{r<R_i}/M_T)=(3-D)\lg(\overline{R}_i/\overline{R}_{\max}) \quad (4)$$

式中:R_i 为第 i 级团聚体的粒级(mm);$\overline{R}_{\max}$为土壤团聚体的最大粒级的平均直径(mm);$M_{r<R_i}$为粒级小于 R_i 的土壤团聚体的累积质量(g)。

3　结果与分析

3.1　土壤团聚体的分布特征

水稳定性团聚体可分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)。试验结果(表 3)显示,不同发生层土壤团聚体的粒径分布有明显差异。在 LJH 剖面中,大团聚体含量随土层深度加深而递减,最大值出现在 A 层(83.73%),最小值出现在 C 层(59.18%),微团聚体含量变化相反(A 层为 16.27%,C 层上升至 40.83%);而 YJS 剖面中,大团聚体含量A 层(69.72%)与 Bt 层(71.27%)较为接近,最小值出现在 C 层(56.55%),微团聚体含量为先减后增(A 层为30.29%,Bt 层降为 28.73%,C 层上升为 43.46%)。

两江源区相同发生层团聚体的粒径分布模式也存在差异。对于大团聚体,在 A 层 LJH 剖面含量为 83.73%,YJS 剖面为 69.72%,前者显著多于后者,在 Bt 层 LJH剖面含量为 65.39%,YJS 剖面为 71.27%,后者多于前者,在 C 层两剖面大团聚体较为接近,分别为 59.18%和 56.55%;对于微团聚体,在 A 层 LJH 剖面含量为16.27%,YJS 剖面为 30.29%,前者显著少于后者,在

Bt 层 LJH 剖面含量(34.62%),多于 YJS 剖面(28.73%),在 C 层两剖面微团聚体也较为接近,分别为 40.83%和 43.46%。可以看出,2 个土壤剖面的团聚体都以大团聚体为主(其含量占 56.55%～83.73%),微团聚体较少(其含量占 16.27%～43.46%),团粒结构均在 A 层最为发育;团聚体含量皆随着土层深度的变化而改变,其中在 A 层两剖面的团聚体含量差异较大,Bt 层次之,C 层差异最小。

表 3 两江源区不同土层水稳性土壤团聚体粒径分布 单位:%

采样地	发生层	大团聚体(>0.25 mm)				微团聚体(<0.25 mm)	
		>2 mm	1～2 mm	0.5～1 mm	0.25～0.5 mm	0.106～0.25 mm	<0.106 mm
汉江源区(LJH)	A	34.03±19.93	17.76±1.69	19.17±6.21	12.77±7.23	4.61±2.01	11.66±3.11
	Bt	1.58±1.50	8.33±5.34	26.18±7.19	29.30±8.41	14.56±4.87	20.06±4.13
	C	0.39±0.22	3.48±1.16	20.38±4.71	34.93±3.71	17.33±3.45	23.50±2.64
嘉陵江源区(YJS)	A	11.01±8.10	13.31±5.82	20.74±1.31	24.66±7.82	11.38±2.33	18.91±4.67
	Bt	12.18±3.58	17.95±5.26	21.58±1.95	19.56±4.09	11.01±2.24	17.72±3.16
	C	2.53±1.44	7.01±3.78	16.91±3.15	30.10±3.85	18.34±3.92	25.12±1.50

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

3.2 团聚体大小与土壤稳定性

$R_{0.25}$、MWD、GMD 和 D 值是表征土壤结构特征的重要指标,其中 $R_{0.25}$ 与 MWD 和 GMD 值呈正相关的线性关系,而与 D 值呈现负相关关系(图 2、图 3),即 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值越高,表示土壤结构越稳定[16-18],D 值越小,指示土壤团粒分散程度越小,土壤团聚作用越强[19-20]。

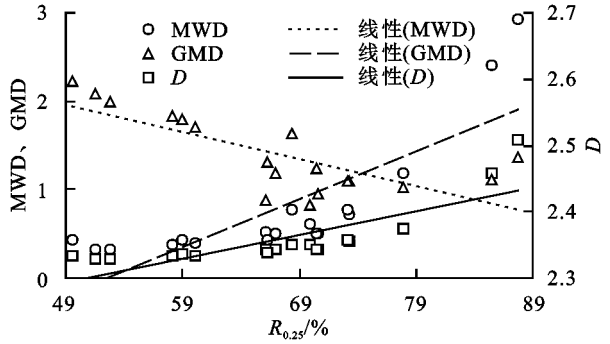


图 2 汉江源区团聚体各稳定性指标相关关系

由表 4 可知,汉江源区与嘉陵江源区土壤团聚体的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值和 D 值与大多数粒级团聚体含量呈现显著的线性关系,其中 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值与 0.5～1 mm 粒级的团聚体相关性最低,D 值与 0.25～1 mm 粒级的团聚体相关性最低,表明 0.5～1,0.25～1 mm 粒级的团聚体在维持其稳定性方面的作用较小。两江源区土壤团聚体的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值皆与>2 mm 和 1～2 mm 粒级的团聚体呈极显著正相关($P<0.01$),且相关系数较大,而与 0.25～0.5,0.106～0.25,<0.106 mm 的团聚体呈极显著负相关($P<0.01$),D 值则与前三者呈现相反的关系,表明在大团聚体中>2,1～2mm 粒级的团聚体可能含有更多的胶结物质,聚合作用强,对保持土壤稳定性具有更重要的贡献。由表 3 可知,汉江源区 A 层土壤中这 2 个粒级的团聚体含量为 34.03%和 17.76%,嘉陵江源区分别为 11.01%和 13.31%,前者含量较后者占优势,显示前者土壤可能具有更强稳定性。

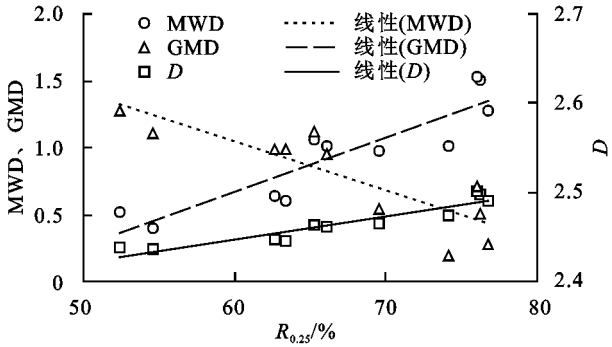


图 3 嘉陵江源区团聚体各稳定性指标相关关系

表 4 各指标与团聚体粒径相关关系

采样地	指标	>2 mm	1～2 mm	0.5～1 mm	0.25～0.5 mm	0.106～0.25 mm	<0.106 mm
汉江源区(LJH)	$R_{0.25}$	0.862**	0.835**	0.189	−0.511*	−0.965**	−0.893**
	MWD	0.981**	0.967**	0.245	−0.701**	−0.853**	−0.878**
	GMD	0.942**	0.938**	0.282	−0.678**	−0.891**	−0.889**
	D	−0.608**	−0.639**	−0.416	0.119	0.521*	0.829**
嘉陵江源区(YJS)	$R_{0.25}$	0.873**	0.927**	0.345	−0.736**	−0.882**	−0.964**
	MWD	0.973**	0.945**	0.282	−0.964**	−0.836**	−0.791**
	GMD	0.900**	0.982**	0.355	−0.855**	−0.891**	−0.900**
	D	−0.555	−0.709*	−0.445	0.382	0.718*	0.918**

注:** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著;* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。下同。

3.3　土壤团聚体分布与土壤性质的耦合关系

不同土壤理化性质参数耦合分析(表 5)显示,汉江源区 LJH 剖面的大团聚体含量($R_{0.25}$)、MWD、GMD 值与 Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO(或碳酸钙)呈极显著正相关($P<0.01$),与粉粒呈显著正相关($P<0.05$),而与黏粒、SiO_2 和 K_2O 呈极显著负相关($P<0.01$)。<0.25 mm 团聚体含量和 D 值则与前 3 种指标相反,且其中 D 值与 Na_2O 显著正相关($P<0.05$),与黏粒、SiO_2 呈极显著正相关($P<0.01$)。嘉陵江源区 YJS 剖面的大团聚体含量($R_{0.25}$)、MWD 和 GMD 值与黏粒、粉粒、烧失量、SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 和 K_2O 皆呈极显著正相关($P<0.01$),与砂粒、pH、碳酸钙(或 CaO)、Na_2O 和 MgO 呈负相关,其中与砂粒、碳酸钙(或 CaO)呈极显著负相关($P<0.01$)。<0.25 mm 团聚体含量和 D 值同样与前 3 种指标相反,D 值与砂粒、碳酸钙(或 CaO)、Na_2O 呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 5　土壤团聚体与土壤理化性质相关性

采样点	理化性质	>0.25 mm($R_{0.25}$)	<0.25 mm	MWD	GMD	D
汉江源区(LJH)	黏粒	−0.705**	0.705**	−0.672**	−0.664**	0.427**
	粉粒	0.223*	−0.223*	0.279*	0.257*	−0.182
	砂粒	0.208	−0.208	0.142	0.176	0.100
	烧失量	0.212	−0.212	0.382**	0.378**	−0.172
	pH	−0.190	0.190	−0.138	−0.150	−0.372**
	SiO_2	−0.704**	0.704**	−0.730**	−0.725**	0.549**
	Al_2O_3	0.339**	−0.339**	0.359**	0.338**	−0.579**
	Fe_2O_3	0.396**	−0.396**	0.451**	0.419**	−0.615**
	CaO	0.510**	−0.510**	0.568**	0.560**	−0.238*
	K_2O	−0.375**	0.375**	−0.325**	−0.356**	−0.034
	Na_2O	−0.044	0.044	−0.052	−0.057	0.242*
	MgO	−0.175	0.175	−0.098	−0.127	−0.245*
嘉陵江源区(YJS)	黏粒	0.570**	−0.570**	0.607**	0.558**	−0.491**
	粉粒	0.551**	−0.551**	0.386**	0.466**	−0.510**
	砂粒	−0.580**	0.580**	−0.545**	−0.544**	0.508**
	烧失量	0.495**	−0.495**	0.406**	0.319*	−0.447**
	pH	−0.168	0.168	−0.429**	−0.203	0.002
	$CaCO_3$	−0.525**	0.525**	−0.655**	−0.561**	0.413**
	SiO_2	0.473**	−0.473**	0.583**	0.500**	−0.402**
	Al_2O_3	0.498**	−0.498**	0.598**	0.554**	−0.450**
	Fe_2O_3	0.462**	−0.462**	0.541**	0.512**	−0.413**
	CaO	−0.478**	0.478**	−0.582**	−0.504**	0.427**
	K_2O	0.496**	−0.496**	0.626**	0.557**	−0.409**
	Na_2O	−0.263	0.263	−0.113	−0.267*	0.401**
	MgO	−0.069	0.069	−0.004	−0.041	0.058

两剖面的粉粒、烧失量和铁铝氧化物(Al_2O_3 和 Fe_2O_3)皆与 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 这 3 个指标呈正相关,与 D 值呈负相关,表明粉粒、有机质以及铁铝氧化物是促进土壤大团聚体形成并维持其稳定性的重要影响因素[21-23]。团聚体的稳定性与其颗粒组成相关,其中粉粒占颗粒组成的绝大部分(LJH 剖面为 75.66%～77.99%,YJS 剖面为 74.35%～78.71%),相较于黏粒(LJH 剖面为 6.32%～17.52%,YJS 剖面为7.41%～13.64%)和砂粒(LJH 剖面为 4.49%～18.02%,YJS 剖面为 7.64%～18.24%)对团聚体的影响更大,且颗粒组成又与有机质化学特性相关,而粉粒与土壤中有机物质的吸附作用强于黏粒和砂粒[24]。土壤团聚体的形成需要胶结物质的参与,尤其以有机胶结物质为主,故土壤中的有机质对于团聚体形成与稳定尤为重要[25]。两地区均以土壤表层(A 层)的烧失量为最大值(LJH 剖面为 30.69 g/kg,YJS 剖面为 28.36 g/kg),团聚体稳定性最强($R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值达最大值,D 值为最小值),土壤表层接收植物枯枝落叶作为有机质来源,并受到植物根系的缠绕作用与微生物分泌物质的影响,且表层疏水性强,土壤孔隙中闭塞空气对团聚体的破坏力较弱,故易于形成大量团聚体。铁铝氧化物作为成壤作用强烈的产物,与土壤团聚体也有重要关联。LJH 剖面 A—Bt 层氧化铝和氧化铁含量(分别约为 153.38,57.47 g/kg)高于 C 层(分别为 149.62,55.07 g/kg),YJS 剖面 A—Bt 层氧

化铝和氧化铁含量(分别约为 126.67,47.23 g/kg)也高于 C 层(分别为 116.78,43.02 g/kg),且两剖面 A—Bt 层的 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值大于 C 层,D 值小于 C 层,这表明铁铝氧化物含量越高,团聚体稳定性越强(表 6)。此外,通常认为铁铝氧化物能够通过降低临界凝聚的浓度以减弱黏粒的分散性和膨胀程度,从而增强土壤的持水性、导水率,减小土壤的容重和破裂系数[26]。

表 6 两江源区不同土层团聚体稳定性指标分布

采样地	发生层	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D
汉江源区(LJH)	A	83.73±5.13	2.17±0.9	1.11±0.51	2.46±0.02
	Bt	65.39±8.15	0.55±0.16	0.33±0.07	2.48±0.06
	C	59.18±6.07	0.40±0.05	0.26±0.03	2.53±0.04
嘉陵江源区(YJS)	A	69.72±6.43	1.03±0.46	0.46±0.18	2.50±0.04
	Bt	71.27±5.03	1.14±0.22	0.51±0.11	2.49±0.05
	C	56.55±5.39	0.52±0.12	0.27±0.04	2.57±0.02

Na_2O、MgO 和 pH 都对团聚体的稳定程度成一定的负相关作用,尤其是 Na_2O 与分形维数 D 值明显呈正相关,说明可能由于 Na_2O 化学活动性较强,且进入溶液中置换出的钠离子具有更强的分散性,从而阻碍大团聚体的聚合并使其分散成微团聚体,打破了土壤结构的稳定性。MgO 属于化学性质较为活泼的碱土金属,可能也存在与 Na_2O 类似但相对较弱的消散作用。pH 与稳定性指标的相关性说明,相对而言,偏酸性的环境更利于形成团聚体,这可能由于此环境有利于土壤中生物化学作用的进行,进而促进有机或无机胶体的絮凝。

黏粒、砂粒、SiO_2、K_2O、碳酸钙(或 CaO)在两剖面的稳定性指标相关关系中截然相反,说明由于 LJH 与 YJS 剖面所处土壤环境条件的不同,使得黏粒、砂粒、SiO_2、K_2O 和碳酸钙等部分影响团聚体稳定机理的因素也存在着促进作用和阻碍作用的差异。一方面黏粒、SiO_2、K_2O 对 LJH 剖面团聚体稳定性具有阻碍作用;另一方面却能维持 YJS 剖面团聚体稳定,砂粒和碳酸钙能促进 LJH 剖面团聚体的稳定性,却对 YJS 剖面团聚体具有分散作用。一般来说,黏粒是土壤中的无机胶结剂,细小黏粒矿物对土壤中大团聚体的形成有促进作用,但有研究[27]表明,黏粒含量主要对干团聚体稳定性有较为显著的影响,而对水稳性团聚体影响较小;还有研究[28]表明,黏粒含量越高,相应的其 D 值会越大,则团聚体也越分散。土壤中 K_2O 易被黏粒吸附固定[29],表明其在团聚体的形成中有着与黏粒类似的影响。砂粒属于较大固相颗粒,通常不利于形成大团聚体,但受到植物根系的缠绕与有机无机胶合物的凝聚胶结可能产生相反的作用。各颗粒组成中皆含大量 SiO_2,则不同环境中的 SiO_2 对团聚体的形成作用也存在差异。LJH 剖面为酸性至中性土壤,碳酸钙含量极低,而 YJS 剖面为石灰性土壤,含有大量的碳酸盐(129.24～194.19 g/kg),可推测一定含量的碳酸钙可作为无机胶结剂结合其他胶结物质促进团聚体形成,但超过一定含量的碳酸钙富集遇水时则易分解或软化成溶胶或转为碳酸氢盐,不易聚合成水稳定性团聚体。有研究[30-32]表明,碳酸钙对于团聚体的形成和维持稳定的作用既取决于其自然比例,又取决于土壤类型,还可能依赖于碳酸钙颗粒和黏粒含量。

4 讨 论

4.1 汉江和嘉陵江源区土壤团聚体稳定性比较

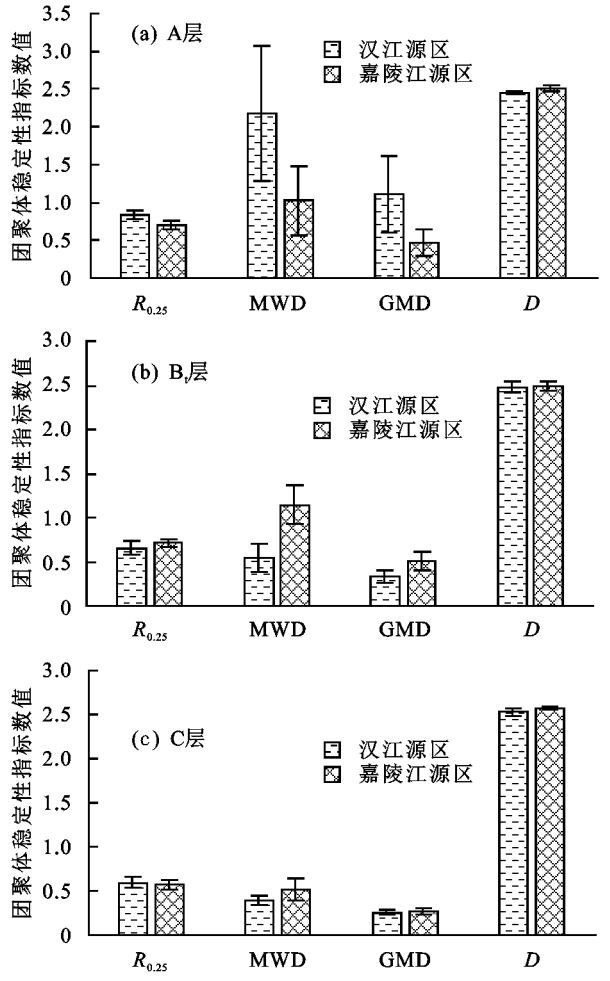
汉江源区的 LJH 剖面,其土壤团聚体 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值随土层深度加深而逐渐减小,且 A 层与 Bt、C 层差异显著,A 层的值明显高于 Bt 与 C 层,其 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值分别为 83.73%,2.17 和1.11;而 D 值的变化相反,最大值出现在 C 层,为 2.53。这说明 LJH 剖面团聚体的稳定性随土层深度加深而降低,即 A 层土壤结构稳定性最强,C 层最弱。在嘉陵江源区的 YJS 剖面中,$R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值在 A 层与 Bt层中较为接近,A 层的 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值分别为 69.72%,1.03 和 0.46,Bt 层分别为 71.28%,1.14 和 0.51,最小值出现在 C 层;D 值最大值出现在 C 层,为 2.57。这说明 YJS 剖面 A 层与 Bt 层的团聚体稳定性均较强,C 层稳定性也最弱。此外,LJH 剖面的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 和 D 值的变化范围分别为 59.18%～87.73%,0.40～2.17,0.26～1.11 和 2.46～2.53,YJS 剖面分别为 56.55%～71.27%,0.52～1.14,0.27～0.51 和 2.49～2.57,显然前者的变化范围大于后者,说明 LJH 剖面各发生层的团聚体稳定性差异更大。

由图 4 可知,A 层中汉江源区团聚体的 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值均显著高于嘉陵江源区,D 值低于后者,说明汉江源区 A 层土壤稳定性明显强于嘉陵江源区(与前面推论一致),且抗蚀性更强,土壤质量更佳,同时也暗示其可能具有更强的肥力,更利于农业生产;Bt 层中嘉陵江源区团聚体的 $R_{0.25}$、MWD 和 GMD 值均低于嘉陵江源区,二者 D 值较接近,表明汉江源区的 Bt 层土壤稳定性稍弱于嘉陵江源区;C 层中两江源区的值较接近,表明母质层土壤受到外力聚合的影响较小,土壤团聚作用较弱,土体不稳定,易被侵蚀破坏。

4.2 土壤团聚体空间分布差异的机制

土壤性质对不同粒级团聚体的作用及作用程度存在差异,如紧结合态的有机质及黏粒主要影响小粒级微团聚体的形成,而松结合态有机质和多糖类物质主要影响大粒级微团聚体的形成[33],对于土壤中 0.106～0.25 mm 与<0.106 mm 的微团聚体,稳定性较弱,在团聚为大团聚体,尤其是发展为>2 mm 和 1～2 mm 团聚体后,其内部的有机质、黏粒、多糖类物质并结合铁铝氧化

物、粉粒等才更能发挥出稳定土体结构的作用。



注:为便于比较,此处 $R_{0.25}$ 为去除百分质量的数值($M_{i>0.25}/M_T$)。

图 4　两江源区土壤团聚体稳定性对比

两江源区由于土壤环境的不同,使得土壤团聚体分布存在差异。LJH 剖面 A 层土壤团聚体稳定性强于 YJS 剖面,可能由于其有机质与铁铝氧化物含量(烧失量为 30.69 g/kg,Al_2O_3 为 152.79 g/kg,Fe_2O_3 为 57.26 g/kg)多于 YJS 剖面(烧失量为 28.36 g/kg,Al_2O_3 为 126.05 g/kg,Fe_2O_3 为 47.27 g/kg),有机与无机胶体复合凝聚作用更强。而在 YJS 剖面中,碳酸钙(140.31 g/kg)与 Na_2O 含量(12.17 g/kg)较高,对团聚体的稳定不利。

LJH 剖面的 Bt 层中,团聚体稳定性稍弱于 YJS 剖面,可能由于其有机质含量相对降低(30.43 g/kg),黏粒含量升高(17.52%),且土体致密坚硬,通透性弱,出现坚实化和僵硬化,阻碍了作物根系的延伸和降水的入渗,不利于形成稳定的团粒结构。YJS 剖面的 Bt 层则相对疏松,透水和透气性较强,能减缓入渗水润湿速率,降低闭塞空气对团聚体的爆破率;其黏粒(13.64%)、有机质(27.88 g/kg)与铁铝氧化物含量(Al_2O_3 为 127.28 g/kg,Fe_2O_3 为 47.19 g/kg)相对较低,以至于这 3 种因素在保持团聚体稳定性方面发挥的作用相对较小,从而增强了粉粒、SiO_2 和 K_2O 等对团聚体的聚合作用。两剖面 C 层皆为黄土母质,疏松多孔,相对 A—Bt 层其有机质、粉粒和铁铝氧化物含量都较低,团聚体含量均较低且接近,稳定性皆较差,特征基本一致。土地利用方式的差异也是引起两江源区土壤结构稳定性不同的重要因素,汉江源区的农作物温带与亚热带作物兼具,嘉陵江源区则主要种植温带作物,不同农作物的植物根系及其根际分泌物和形成的腐殖质在土壤团聚体形成过程中所发挥的作用强度存在差异,且其耕作模式、施肥程度与其他土地管理措施的不同也会在一定程度上影响土壤团聚体的团聚状况。两区域气候条件存在差异,汉江源区平均气温(14.5 ℃)较嘉陵江源区(11 ℃)高,为热性土壤,降水更多(前者为 873 mm,后者为 613 mm),属于湿润土壤水分状况,良好的水热条件使土壤动物和微生物(细菌和真菌)的活动量增加,微生物中菌丝的缠绕及其代谢产物(主要为多糖和其他有机胶结物)能促进表层(A 层)土壤团聚体形成并提高其稳定性[34-35];但其湿润土壤水分状况可能会导致紧实的 Bt 层中压缩空气易爆破,使得团聚体发生崩解,以致其团聚体稳定性弱于嘉陵江源区。

5　结 论

(1)汉江源区与嘉陵江源区黄土母质发育土壤的大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均随土层深度的加深而减小,即 LJH 剖面的 $R_{0.25}$、MWD、GMD 值由 A 层的 83.73%,2.17 和 1.11 分别降至为 C 层的 59.18%,0.40 和 0.26,YJS 剖面由 A 层的 69.72%,1.03 和 0.46 分别降至为 C 层的 56.55%,0.52 和 0.27,分形维数(D)则随土层深度加深而增大,即 LJH 剖面 D 值由 A 层的 2.46 增至为 C 层的 2.53,YJS 剖面由 A 层的 2.50 增至为 C 层的 2.57,表明土壤团聚体稳定性随土层深度增加而减弱,其中大团聚体中>2 mm 和 1～2 mm 的团聚体对保持土壤的稳定性具有更重要的贡献。

(2)土壤中的有机质、铁铝氧化物和颗粒组成中的粉粒是促进土壤大团聚体形成并维持其稳定性的重要影响因素,而 SiO_2、K_2O、黏粒、砂粒和碳酸钙在不同的土壤环境中对团聚体稳定性会起到截然相反的作用,即前三者在 LJH 剖面中对团聚体稳定性不利,在 YJS 剖面中反而有利于维持其稳定性,后两者促进 LJH 剖面团聚体形成,却破坏 YJS 剖面稳定性,Na_2O 水溶解后则对团聚体具有分散作用。

(3)汉江源区的土壤,A 层土壤团聚体稳定性强于嘉陵江源区,粉粒、有机质和铁铝氧化物为其主导因素,其 Bt 层土体致密,通透性弱,不利形成团聚体,稳定性弱于后者,C 层为母质层,两地团聚体稳定性

皆较差,其不同发生层之间团聚体稳定性的差异要大于嘉陵江源区。

参考文献:

[1] 窦森,李凯.土壤团聚体中有机质研究进展土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.

[2] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2016,36(9):2588-2596.

[3] 马帅,赵世伟,李婷,等.子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J].水土保持学报,2011,25(2):157-161.

[4] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.

[5] 查小春,唐克丽.黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化[J].地理学报,2003,13(3):464-469.

[6] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].水土保持学报,2020,34(3):267-273,298.

[7] 任荣秀,杜章留,孙义亨,等.华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2020,40(19):1-9.

[8] 李程程,曾全超,贾培龙,等.黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征[J].生态学报,2020,40(6):2039-2048.

[9] 黄泽,田福平,刘玉,等.黄土高原不同草地类型对水稳性团聚体粒径分布及稳定性的影响[J].草业学报,2017,26(11):216-221.

[10] 韩贞贵,毛天旭,屠丹,等.长江源区草地覆盖变化对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].草地学报,2020,28(3):801-807.

[11] 悦飞雪,李继伟,乔鑫鑫,等.生物炭对豫西丘陵区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):265-272.

[12] 王进,刘子琦,鲍恩俣,等.喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):249-256.

[13] 陈晓芬,刘明,江春玉,等.红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性[J].土壤学报,2019,56(5):1118-1127.

[14] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等.土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J].中国水土保持科学,2011,9(3):106-113.

[15] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978:514-518.

[16] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等.红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J].土壤学报,2007,44(4):577-583.

[17] Yea L, Tana W, Fang L, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability[J].Soil and Tillage Research,2018,179:71-81.

[18] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.

[19] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性评价方法比较[J].水土保持学报,2009,29(5):114-117.

[20] 蒲玉林,林超文,谢得体,等.植物篱—农作坡地土壤水稳性团聚体组成和稳定性特征[J].应用生态学报,2013,24(1):122-128.

[21] 章明奎,何振力,陈国潮,等.利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J].土壤学报,1997,11,34(4): 359-365.

[22] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.

[23] Arduino E, Barberis E, Boero V. Iron oxides and particle aggregation in B horizons of some Italian soils[J]. Geoderma,1989,45(3/4):319-329.

[24] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(4):434-438.

[25] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[26] 谭文峰,周素珍,刘凡,等.土壤中铁铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J].土壤,2007,39(5):726-730.

[27] 章明奎,何振立.成土母质对土壤团聚体形成的影响[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(3):198-202.

[28] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.

[29] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等.汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J].地理学报,2017,72(2):279-291.

[30] Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, Fernandez-Ugalde O. Role of organic matter and carbon-ates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J]. Pedosphere,2011,21(5):566-572.

[31] 张耀方,赵世伟,王子龙,等.黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J].中国水土保持科学,2015,13(5):145-150.

[32] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science,1996,47:425-435.

[33] 关连珠,张伯泉,颜丽.不同肥力黑土、棕壤微团聚体组成及其胶结物质的研究[J].土壤学报,1991(3):260-267.

[34] 吴军虎,邵凡凡,刘侠.蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):81-87.

[35] 史奕,陈欣,沈善敏.有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J].应用生态学报,2002,13(11):1495-1498.