

川西高寒山地不同海拔高度土壤团聚体特征

苟天雄, 刘 韩, 帅 伟, 姜欣华, 李 静

(四川省甘孜州林业科学研究所, 四川 康定 626001)

摘 要:为探究川西北高寒山地不同海拔高度土壤团聚体分布特征及其稳定性,通过野外调查采样和室内试验分析的方式,对四川西部折多山高寒山地 6 个海拔梯度土壤团聚体特征进行了研究。结果表明:0—20 cm 土层不同海拔 >0.25 mm 粒径的土壤中非水稳性团聚体含量占 80% 以上,水稳性团聚体含量占 70% 以上;0—60 cm 土层 >0.25 mm 粒径的土壤非水稳性团聚体总体上呈现随海拔上升而增加的趋势,而水稳性团聚体则呈现出随海拔升高先逐渐减小后增大的趋势。不同海拔土壤团聚体中有机质主要分布在 >0.25 mm 粒级中,且呈现随海拔升高先增加而后降低的趋势,随土层深度加深而逐渐降低的趋势。平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)均呈现出随海拔降低而逐渐减小的趋势,分形维数(D)则呈现增大的趋势, >20 cm 土层规律不明显。表明川西高寒山地表层土壤团粒结构稳定性较好,防止土壤退化应是该区生态保护的重点。

关键词:土壤团聚体; 稳定性; 土壤有机质; 海拔; 高寒山地

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0047-07

Characteristics of Soil Aggregate at Different Altitude Gradients in High-Frigid Mountain of West Sichuan Region

GOU Tianxiong, LIU Han, SHUAI Wei, JIANG Xinhua, LI Jing

(Ganzi Institute of Forestry Research, Kangding, Sichuan 626001, China)

Abstract: In order to research the effect of altitude on the characteristics of soil aggregate and its stability in High-Frigid Mountainous region, based on field investigation and experimental measurement, we determined soil aggregate along altitude gradient. The results showed that the content of >0.25 mm air-dried aggregate was greater than 80%, the content of water stability aggregate was greater than 70%; the content of >0.25 mm air-dried aggregate in 0—60 cm soil layer increased with increase of altitude, and the content of soil water stability aggregate decreased at first and then increased with increase of latitude; the organic matter content of >0.25 mm aggregate was highest, it increased at first and then decreased with increase of latitude, and decreased with increase of soil depth; mean weight diameter and geometric mean diameter decreased with decrease of altitude, while fractal dimensionality in 0—20 cm soil layer showed the increasing trend, but the pattern wasn't obvious in >20 cm soil layer. These results indicated that the surface soil structure stability was better in the alpine mountain of western Sichuan, and prevention of soil degradation should be the focus of ecological protection in this area.

Keywords: soil aggregate; stability; soil organic carbon; altitude; High-Frigid Mountainous

土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,不仅综合了土壤中各种不同形状、大小、孔隙度和水稳性的团聚体,而且是土壤中养分的载体和微生物的生存环境^[1]。同时土壤团聚体的粒径分布不仅反映土壤结构状况,而且影响着土壤的通气、抗蚀、渗水性等,与植被类型、气候条件等外部因子有重大联系,是评

价土壤肥力和抗蚀性的重要指标^[2-4]。此外 >0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)及分形维数(D)常用来描述团聚体的数量和分布状况,并作为土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力的评价指标^[5]。因此,通过研究土壤团聚体的分布特征,对于改善土壤肥力、增强土

收稿日期:2019-03-01

修回日期:2019-04-01

资助项目:四川省科技厅项目“川西折多山高寒生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2015FZ0022)

第一作者:苟天雄(1988—),男,四川剑阁人,工程师,硕士,主要从事植物学及生态恢复的研究工作。E-mail:435633002@qq.com

通信作者:刘韩(1983—),女,四川金堂人,工程师,硕士,主要从事生态恢复及林木微生物的研究工作。E-mail:helenliuhan@163.com

壤生产力、降低土壤可侵蚀性等具有重要意义。

近年来,国内外学者相继开展了关于土壤团聚体及其分布特征的研究,主要集中在不同森林植被类型、不同植被恢复年限以及不同林分发育阶段等对土壤团聚体分布及其稳定性的影响。赵友朋等^[6]对凤阳山主要林分类型土壤团聚体及其稳定性的研究表明 4 种林分土壤水稳定性大团聚体(WSA)(≥ 0.25 mm)含量均在 90%以上。土壤水稳定性大团聚体含量及平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均以杉木林的最大,竹林的最小。王小红等^[7]研究了格氏栲天然林转化为人工林后的土壤团聚体有机碳的分布,发现天然林转换成人工林会导致土壤大团聚体数量减少,团聚体稳定性下降。庄正等^[8]对不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究表明各发育阶段杉木人工林土壤团聚体以 >0.25 mm 大团聚体为主,比例皆达 80%以上,且中龄林和成熟林比例在各土层中均高于幼龄林。江仁涛等研究了川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响^[9]。但对于高海拔山地生态系统土壤团聚体分布特征及其稳定性的研究少见报道。川西高寒山地海拔较高,生态环境十分脆弱,对环境及气候变化尤为敏感。近年来随着人口增长和放牧强度的增加,对植被、土壤和生态系统过程干扰尤为强烈。尤其是高海拔地区冻融作用使土壤容重减小、孔隙度增大、团聚体水稳性减小^[3],从而使土壤结构改变,稳定性降低,进而对土壤肥力及生态环境的屏障作用产生重大影响。因此,对川西北高寒山地不同海

拔土壤团聚体分布特征及其稳定性进行研究,探讨海拔梯度及植被类型对土壤团聚体的粒径分布、组成和稳定水平,为科学评价高寒山地生态系统土壤结构及应对气候变化提供参考依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜州折多山西部($30^{\circ}00' - 30^{\circ}08'N, 101^{\circ}44' - 101^{\circ}51'E$),折多山为大雪山一脉,属于青藏高原东缘,最高海拔 4 962 m,垭口海拔 4 298 m。研究区气候类型为亚寒带季风气候与高原大陆性气候交汇,气候温和偏寒,年日照 2 000~2 500 h 以上,年平均降水量 1 600 mm,年均温 8℃以下,冬季漫长,无明显夏季。主要土壤种类为高山暗棕壤和高山灌丛草甸土,植被垂直分布带由云冷杉针叶林过渡到海拔为 3 800 m 的高山林线再到 4 000~4 200 m 的高山灌丛草甸。

1.2 土壤样品采集与处理

2016 年 8 月在康定县折多山东坡进行土壤样品的采集,根据当地林线海拔约在 3 800 m 的实际情况,样地设置以 3 800 m 林线上下每隔 200 m 各设两个海拔梯度,即为 3 400 m,3 600 m,3 800 m,4 000 m,4 200 m 共 5 个海拔梯度。每个海拔梯度根据小地型植被的差异各设置 3 个 20×20 m 的标准样地(表 1),并用五点采样法剖面深度为 0—20 cm,20—40 cm, >40 cm 采集样品,同时用塑料盒采集原状土做团聚体分析及不同粒径风干团聚体做有机质含量分析。

表 1 样地基本情况

海拔/m	土壤类型	主要植被
3400	山地暗棕壤	川滇高山栎(<i>Quercus aquifolioides</i>)、高山柳(<i>Salix oritrepha</i>)、云杉(<i>Picea asperata</i>)、花楸(<i>Sorbus pohuashanensis</i>)
3600	山地暗棕壤	川滇高山栎(<i>Quercus aquifolioides</i>)、全缘栒子(<i>Cotoneaster integerrimus</i>)、云杉(<i>Picea asperata</i>)、花楸(<i>Sorbus pohuashanensis</i>)
3800	山地暗棕壤(漂灰化土)	杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i>)、落叶松(<i>Larix gmelinii</i>)、云杉(<i>Picea asperata</i>)、冷杉(<i>Abies fabri</i>)
4000	高山灌丛草甸土	杜鹃(<i>Rhododendron simsii</i>)、高山绣线菊(<i>Spiraea alpina</i>)、细枝绣线菊(<i>Spiraea myrtilloides</i>)
4200	高山灌丛草甸土	隐蕊杜鹃(<i>Rhododendron intricatum</i>)、草原杜鹃(<i>Rhododendron telmateium</i>)、淡黄杜鹃(<i>Rhododendron flavoflorum</i>)、银露梅(<i>Potentilla glabra</i>)

1.3 指标测定及计算方法

根据中华人民共和国林业行业标准(LY/T-1999)测定相关指标^[10]。土壤容重采用环刀法测定;土壤团聚体分为水稳性团聚体和非水稳性团聚体,非水稳性团聚体用干筛法,水稳性团聚体的分级采用湿筛法测定。土壤有机质含量重铬酸钾外加热法测定。

团聚体平均质量直径(MWD):

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{X}_i \times W_i}{\sum_{r=1}^n W_r} \quad (1)$$

团聚体几何平均直径(GMD):

$$GWD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \lg \overline{X}_i}{\sum_{r=1}^n W_r} \right] \quad (2)$$

土壤分形维数(D):

$$\left[\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}}\right]^{3-D}=\frac{W(\partial<\overline{X}_i)}{W_r}\tag{3}$$

式中: \overline{X}_i 为任一粒级范围内团聚体的平均直径(mm); W_r 为供试土壤总质量; W_i 为对应于 \overline{X}_i 的团聚体质量; $W(\partial<\overline{X}_i)$ 为小于 \overline{X}_i 的积累土粒质量; X_{\max} 为最大粒级平均直径(mm),用线性回归的方法将 $\lg\left[\frac{W(\partial<\overline{X}_i)}{W_i}\right]$ 设置为纵坐标、 $\lg\left[\frac{\overline{X}_i}{X_{\max}}\right]$ 为横坐标作图,所求得该线性方程的斜率就是 $3-D$,再通过计算就求得土壤分形维数(D)。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件对试验数据进行整理归纳,采用 SPSS 20.0 软件对各处理的数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤非水稳性团聚体特征

团聚体作为组成土壤的重要部分,通过稳定土壤的结构而降低其水土流失,从而起到水土保持的作用。土壤中不同粒级大小聚体所占百分比,可表明团聚体的机械稳定性。由表 2 可以看出:各海拔土壤非水稳性团聚体 0—60 cm 土层各粒径含量大小为(>2 mm)>(2~1 mm)>(1~0.5 mm)>(<0.25 mm)>(0.5~0.25

mm),其中>2 mm 非水稳性团聚体含量最多,0.5~0.25 mm 含量最小。不同海拔梯度土壤中,0—60 cm 土壤>2 mm 非水稳性团聚体含量均值大小顺序为:4 200 m (52.3%)>3 600 m(50.23%)>3 400 m(42.38%)>4 000 m(42.21%)>3 800 m(41.06%),且随海拔梯度变化规律不明显,呈现出随海拔升高逐渐减小而又后增大的趋势。其中海拔 4 200 m 的土壤>2 mm 非水稳性团聚体所占比例最高,而海拔 3 800 m 最低。但>2 mm 非水稳性团聚体在 0—20 cm 土层范围中,所占比例大小依次为:4 200 m(60.42%)>3 800 m(55.74%)>3 600 m (53.07%)>4 000 m(49.37%)>3 400 m(38.87%,),除 4 000 m外呈现出随海拔增高而逐渐上升的趋势,表明 0—20 cm 土层中所含大粒径团聚体较多,且随着土层的加深而降低,但其余粒径规律则不明显。一般将>0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体,是维持土壤结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构的稳定性越大^[7.8]。根据表 2 计算得到不同海拔土壤>0.25 mm 粒径的非水稳性团聚体含量组成大小为:4 200 m (87.06%)>3 600 m(86.61%)>3 800 m(86.08%)>3 400 m(81.70%)>4 000 m(80.58%),其中最大是海拔 4 200 m 的土壤,最小的为海拔 4 000 m 的土壤,差异不明显,总体上呈现随海拔上升而增加的趋势,4 000 m 处较低可能与该海拔放牧强度较高,植被破坏相对于其他海拔严重有关。

表 2 不同海拔高度土壤非水稳性聚体组成

海拔/m	土层/cm	非水稳性团聚体组成/%				
		>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
4200	0—20	60.42±3.27a	14.85±1.16a	10.26±0.82a	6.76±0.13a	7.71±0.09a
	20—40	48.46±1.15a	16.18±0.62ab	11.59±1.05a	8.68±0.16a	15.10±1.16a
	40—60	48.01±2.04b	16.52±0.85ab	11.71±0.39a	7.75±0.34a	16.01±0.94a
	均值	52.30±2.15B	15.85±0.88AB	11.19±0.76A	7.73±0.54A	12.94±0.73A
4000	0—20	49.37±2.13a	14.01±1.96a	13.84±2.26a	10.51±1.68ab	12.27±1.19a
	20—40	40.86±2.13a	14.67±1.02ab	13.64±0.26a	11.86±1.26a	18.96±1.04a
	40—60	36.40±2.24ab	13.14±1.74ab	12.03±1.33a	11.39±0.84ab	27.04±1.75a
	均值	42.21±2.17A	13.94±1.56A	13.17±1.29AB	11.25±1.26AB	19.42±1.33B
3800	0—20	55.74±2.75a	15.33±1.67a	12.75±1.36a	9.00±1.81ab	7.18±1.12a
	20—40	46.25±2.28a	15.15±1.19a	12.41±1.36a	10.78±1.24a	15.41±1.02a
	40—60	21.18±1.97a	21.30±1.69b	19.96±1.53b	18.39±1.03b	19.16±1.94a
	均值	41.06±2.34A	17.26±1.52B	15.04±1.42B	12.72±1.36B	13.92±1.36AB
3600	0—20	53.07±2.17a	13.69±0.26a	12.19±0.82a	9.96±0.43ab	11.09±0.77a
	20—40	48.11±2.18a	15.99±0.83a	13.23±0.97a	10.40±1.19a	12.27±1.06a
	40—60	49.51±2.88b	13.72±0.37ab	10.57±0.43a	9.40±0.85a	16.79±1.46a
	均值	50.23±2.41B	14.47±0.49A	12.00±0.74A	9.92±0.82A	13.39±1.09AB
3400	0—20	44.57±2.06b	11.51±0.26a	10.22±1.47a	11.57±0.96a	22.13±1.16a
	20—40	43.70±3.05a	12.80±0.41a	12.94±1.03a	12.42±1.49a	18.15±1.69a
	40—60	38.87±1.76a	16.38±1.15a	16.68±2.81a	13.47±1.45b	14.60±1.34a
	均值	42.38±2.29A	13.56±0.61A	13.28±1.77AB	12.49±1.29B	18.30±1.39B

注:数据后不同小写字母表示同一粒径同一土层不同海拔差异性显著($p<0.05$),不同大写字母表示不同海拔均值差异性显著($p<0.05$)。

2.2 不同海拔土壤水稳性团聚体特征

土壤团聚体稳定性尤其是水稳性团聚体是反映土壤结构的重要指标,与土壤的抗侵蚀能力以及环境质量有着密切的关系^[11]。由表 3 可以看出,不同海拔的土壤>2 mm 的水稳性团聚体在各粒径中比例最高,均值大小顺序为:3 600 m(35.34%)>3 800 m(34.19%)>4 200 m(33.88%)>4 000 m(31.06%)>3 400 m(30.35%),呈现出随海拔升高先降低后增加的趋势,但差异不显著。从 0—20 cm 土层看,>2 mm 的水稳性团聚除 4 000 m 外呈现出随海拔增高而逐渐增加的趋势,表明 0—20 cm 土层中所含水稳性大粒径团聚体比例较高,且随着土层的加深而降

低,其余粒径规律则不明显。>0.25 mm 粒径的水稳性团聚体含量组成大小为:3 800 m(80.18%)>3 600 m(78.67%)>4 200 m(75.01%)>3 400 m(74.14%)>4 000 m(72.03%)。>0.25 mm 粒径的土壤水稳性团聚体含并随海拔升高呈现先升高后降低趋势,在 3 800 m 林线处最高,说明海拔 3 800 m 林线附近土壤的抗水力侵蚀性相对较好,低于和高于林线的土壤水稳定性相对较差。不同海拔土壤<0.25 mm 的水稳性团聚体含量则呈现相反的规律,均值大小顺序为:4 000 m(27.97%)>3 400 m(25.85%)>4 200 m(25.00%)>3 600 m(21.34%)>3 800 m(19.82%)。另外,同一粒径同一土层不同海拔差异性不显著。

表 3 不同海拔高度土壤水稳性团聚体组成

海拔/m	土层/cm	水稳性团聚体组成/%				
		>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
4200	0—20	47.38±1.40a	17.42±1.75a	14.17±1.20a	7.47±1.08a	13.56±0.49a
	20—40	29.77±1.06a	13.42±1.46a	15.94±0.36a	12.94±1.46a	27.92±1.84a
	40—60	24.49±1.29a	14.36±1.33a	13.64±1.97a	14.01±1.29a	33.51±1.16a
	均值	33.88±1.25A	15.07±1.51A	14.59±3.00A	11.47±1.27A	25.01±1.16B
4000	0—20	40.04±1.39a	14.27±1.98a	16.31±1.02a	10.43±1.25a	18.95±2.96a
	20—40	29.68±2.02a	14.79±0.79a	15.31±1.34a	12.01±0.66a	28.24±1.79a
	40—60	23.47±1.27a	14.65±1.49a	14.19±1.21a	10.99±1.29a	36.71±1.16a
	均值	31.06±1.56A	14.57±1.42A	15.26±1.19A	11.14±1.05A	27.97±1.97B
3800	0—20	47.85±1.56a	16.09±1.35a	14.37±1.29a	8.60±0.87a	13.08±1.13a
	20—40	35.59±2.07a	15.09±1.24a	15.28±1.47a	10.84±1.06a	23.19±1.43a
	40—60	19.14±1.62a	20.75±1.33a	20.93±1.38a	16.01±1.22a	23.18±0.96a
	均值	34.19±1.75A	17.31±1.31B	16.86±1.38A	11.82±1.05A	19.82±1.17A
3600	0—20	38.34±1.82a	15.31±1.28a	14.43±0.85a	10.72±0.95a	21.21±2.61a
	20—40	35.06±1.39a	19.50±1.00a	16.30±0.48a	10.46±1.02a	18.68±0.89a
	40—60	32.61±1.49a	15.78±0.18a	16.18±1.10a	11.29±1.22a	24.13±1.62a
	均值	35.34±1.57A	16.87±0.82AB	15.64±0.78A	10.82±1.06A	21.34±1.35A
3400	0—20	34.43±1.54a	14.70±0.49a	14.50±0.33a	11.92±0.69a	24.45±1.95a
	20—40	28.85±1.28a	16.95±1.16a	18.32±1.86a	13.04±1.64a	22.84±1.39a
	40—60	27.77±1.62a	14.78±1.24a	14.46±1.88a	12.71±1.35a	30.27±1.84a
	均值	30.35±1.48A	15.48±0.97A	15.76±1.36A	12.55±1.23A	25.85±1.73B

注:数据后不同小写字母表示同一粒径同一土层不同海拔差异性显著($p<0.05$),不同大写字母表示不同海拔均值差异性显著($p<0.05$)。

2.3 不同海拔土壤非水稳性团聚体有机质含量

土壤腐殖质是土壤团聚体的主要胶结剂,同时也是土壤有机质保存的重要场所,对土壤的肥力和结构特征尤其在提高土壤团聚体稳定性方面具有重要的意义。由表 4 可以看出,从整体来看,有机质含量主要集中在>0.25 mm 粒径的大团聚体中,占比在 80%左右,含量大小顺序为:3 800 m(361.25 g/kg)>4 200 m(315.01 g/kg)>3 600 m(276.19 g/kg)>4 000 m(269.14 g/kg)>3 400 m(265.05 g/kg),以 3 800 m 处最高,随海拔升高呈现先增加而后降低的趋势,随着土层深度加深而呈现出逐渐降低的趋势。<0.25 mm 粒径的团聚体则规律不明显。在 0—20 cm

土层中,各粒径非水稳性团聚体中有机质含量均表现 3 800 m>4 200 m>3 600 m>4 000 m>3 400 m,即呈现出较为明显的随海拔升高先增加而后降低的趋势、20—40,40—60 cm 的变化规律不明显。>0.25 mm 粒径的团聚体中有机质相同海拔土壤同一层中,随着土壤团聚体粒径的变化其有机质含量变化没有明显规律性且差异不明显。

2.4 不同海拔土壤团聚体 MWD,GMD 及 D 的变化特征

团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)是用于评价团聚体稳定性十分重要的指标。粒径大的团聚体组成比例越高,土壤

MWD 就越大,土壤团聚体越稳定^[12]。由表 5、表 6 可以看出,0—20 cm 土层中,土壤非水稳性团聚体和水稳性团聚体在 5 种不同海拔土壤 MWD 最大的是海拔 4 000 m 的土壤,最小的是海拔 3 400 m 的土壤;GMD 最大的是海拔 4 200 m 的土壤,海拔 3 800 m 的土壤次之,最小的是海拔 3 400 m 的土壤;总体上看,0—20 cm 土层各海拔高度土壤非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD,GMD 都呈现随海拔高度的升高变化趋势,20—40,40—60 cm 土层规律不明显,但有随海拔高度增加 MWD,GMD 则都呈现出与 0—20 cm 相反的变化规律,即呈现减小的趋势。不同海拔土壤随土层深度的增加,非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD,GMD 均呈现下降的趋势。

土壤团粒结构的分形维数(*D*)是评价土壤团聚

体稳定性的一项指标,团粒结构分形维数越小,土壤的结构和稳定性越好,抗蚀能力越强。表 5、表 6 可以看出,0—20 cm 土层中非水稳性团聚体与水稳性团聚体分形维数 *D* 值最小值是 4 200 m,3 800 m 次之,3 400 m 值最大,但整体呈现随海拔升高增大的趋势,而 20—40,40—60 cm 土层规律不明显。各海拔高度土壤分形维数 *D* 亦表现出随土层的加深而增大的趋势,5 种不同海拔土壤团聚体稳定性在 0—20 cm 土层团聚度高于下层。在不同海拔梯度 0—20 cm 土层土壤中,海拔 4 200 m 和 3 800 m 土壤的团聚体稳定性较高,土壤结构较稳定,在雨水冲刷下不容易被分散破碎,抗蚀性较好;而海拔 3 400 m 土壤的 MWD,GMD 相对较低,*D* 值较高,稳定性和易侵蚀性也相对较弱。

表 4 不同海拔高度土壤非水稳性团聚体各粒径有机质含量 g/kg

海拔/m	土层/cm	非水稳性团聚体组成/%				
		>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
4200	0—20	107.81±3.18a	100.15±2.42a	97.14±1.58ab	103.94±4.14a	100.42±3.50a
	20—40	76.18±1.61a	73.79±1.35ab	81.12±3.36ab	78.31±1.79a	79.81±2.59a
	40—60	57.90±1.41a	58.41±3.29b	55.68±1.02ab	54.59±2.04ab	52.16±2.14a
	均值	80.63±2.06C	77.45±2.35B	77.98±1.99B	78.95±2.65B	77.46±2.75C
4000	0—20	101.23±2.38a	94.99±4.05a	90.07±2.91ab	90.82±2.54a	84.44±4.09a
	20—40	62.05±1.94a	48.62±1.67a	59.85±1.37a	66.27±1.02a	69.01±1.69a
	40—60	54.08±1.31a	34.88±1.74a	47.61±2.62ab	56.95±1.65ab	59.88±2.14a
	均值	72.45±1.87B	59.5±2.47A	65.84±2.29A	71.35±1.74A	71.11±2.64B
3800	0—20	112.17±3.85a	99.82±3.44a	121.27±4.10b	128.47±6.43a	103.24±3.21a
	20—40	96.05±1.89b	85.86±2.79b	92.18±3.88ab	111.65±6.76b	76.53±1.25a
	40—60	55.37±1.49a	55.62±3.62b	59.12±1.03ab	66.18±2.93b	53.96±1.59a
	均值	87.86±2.41D	80.43±3.28B	90.86±3.00C	102.1±5.37C	77.91±2.02C
3600	0—20	92.18±1.79a	82.29±2.56a	82.78±2.01a	88.03±3.76a	83.13±3.16a
	20—40	84.60±1.72a	64.61±3.97ab	67.47±3.75a	75.88±1.75a	66.04±3.98a
	40—60	51.46±1.67a	46.95±2.59ab	44.77±2.08ab	47.53±2.03ab	47.66±2.32a
	均值	76.08±1.72B	64.62±3.04A	65.01±2.61A	70.48±2.51A	65.61±3.16A
3400	0—20	87.97±2.34a	81.79±1.69a	83.68±1.96a	91.72±4.60a	106.15±2.97a
	20—40	85.38±2.29a	75.43±2.14ab	84.12±1.42ab	81.08±2.69a	71.68±2.81a
	40—60	35.37±1.03a	26.93±0.74a	29.78±1.70a	31.92±1.78a	34.72±1.37a
	均值	69.57±1.89A	61.38±1.52A	65.86±1.69A	68.24±3.02A	70.85±2.39B

注:数据后不同小写字母表示同一粒径同一土层不同海拔差异性显著($p<0.05$),不同大写字母表示不同海拔均值差异性显著($p<0.05$)。

表 5 不同海拔高度土壤非水稳性团聚体 MWD,GMD 及 *D* 的变化特征

海拔/m	MWD			GMD			<i>D</i>		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
4200	2.449±0.33a	2.077±0.02a	2.065±0.12b	1.279±0.11a	1.110±0.04a	1.104±0.06a	1.548±0.19a	1.958±0.02a	1.965±0.12a
4000	2.970±0.29a	1.821±0.05a	1.638±0.14ab	1.138±0.18a	1.009±0.02a	0.920±0.08a	1.879±0.23a	2.154±0.02a	2.289±0.12a
3800	2.319±0.20a	1.999±0.37a	1.304±0.49a	1.239±0.12a	1.099±0.24a	0.889±0.06a	1.659±0.16a	1.942±0.27a	2.377±0.20a
3600	2.205±0.11a	2.077±0.12a	2.074±0.17b	1.168±0.04a	1.126±0.05a	1.094±0.07a	1.843±0.05a	1.931±0.11a	1.980±0.15a
3400	1.799±0.33a	1.888±0.21a	2.881±0.40ab	1.044±0.19a	1.034±0.14a	1.008±0.09a	2.079±0.21a	2.099±0.26a	2.125±0.30a

注:数据后不同小写字母表示同一粒径同一土层不同海拔差异性显著($p<0.5$)。

表 6 不同海拔高度土壤水稳性团聚体 MWD,GMD 及 D 变化特征

海拔/m	MWD			GMD			D		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
4200	2.071±0.27a	1.446±0.44a	1.269±0.12a	1.125±0.08a	0.870±0.04a	0.803±0.03a	1.916±0.10a	2.382±0.07a	2.484±0.09a
4000	1.801±0.30a	1.456±0.11a	1.234±0.16a	1.017±0.10a	0.874±0.05a	0.793±0.08a	2.118±0.20a	2.373±0.07a	2.478±0.12a
3800	2.073±0.24a	1.656±0.28a	1.227±0.06a	1.129±0.08a	0.959±0.10a	0.855±0.07a	1.904±0.17a	2.218±0.17a	2.425±0.12a
3600	1.746±0.16a	1.704±0.08a	1.572±0.88a	0.985±0.06a	0.992±0.03a	0.927±0.05a	2.186±0.11a	2.185±0.08a	2.292±0.09a
3400	1.465±0.10a	1.611±0.12a	1.388±0.10a	0.914±0.08a	0.929±0.04a	0.845±0.03a	2.316±0.13a	2.284±0.13a	2.419±0.03a

注:数据后不同小写字母表示同一粒径同一土层不同海拔差异性显著($p<0.5$)。

3 讨论

3.1 不同海拔土壤团聚体特征

土壤团聚体组成以及其稳定性是评估土壤结构稳定性的重要指标之一^[12]。一般将>0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体,是维持土壤结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构的稳定性越大^[6]。本研究发现在川西高寒山地不同海拔>0.25 mm 粒径的土壤中非水稳性团聚体含量和水稳性团聚体含量均较高,其中非水稳性团聚体含量各海拔均达到 80% 以上,最高达 87.06%,水稳定性体含量占 70% 以上,最高达到 80.18%,尤其是在 0—20 cm 土层中,>2 mm 粒径团聚体含量在各粒径中含量也最高,说明研究区川西高寒山地土壤团聚体稳定性高。这与大多数学者认为土壤中>0.25 mm 粒径的土壤中团聚体含量占比大,团聚体稳定性也就好的结论相符^[11-19]。从分布规律来看,0—60 cm 土层>0.25 mm 粒径的土壤非水稳定性团聚体均值总体上呈现随海拔上升而增加的趋势,而水稳定性团聚体则呈现出随海拔升高先逐渐减小后增大的趋势。说明海拔 3 800 m 林线附近土壤的抗水力侵蚀性相对较好,低于和高于林线的土壤水稳定性相对较差。表明土壤团聚体稳定性与植被类型密切相关,3 800 m 林线是一个转折,林线以上海拔较高的灌丛草甸植被虽然风干团聚体较高,但其水稳性团聚体则相对较低,说明其更容易被破坏。因此,保护高山林线植被对高寒山地生态环境稳定及防止水土流失具有重要意义。

3.2 不同海拔土壤团聚体有机质含量

团聚体和有机碳的关系密切,土壤有机碳是团聚体形成的物质基础,土壤有机碳的分解转化受团聚体影响,从而影响到土壤肥力的发挥^[7]。本研究发现不同海拔土壤团聚体有机质主要分布在>0.25 mm 粒级中,这与江仁涛^[17]、李柏桥^[18]、苑亚茹等^[20]学者的研究结果相同。从海拔梯度分布情况看,土壤团聚体有机质呈现随海拔升高呈现先增加而后降低的趋势,其中以 3 800 m 处最高,与>0.25 mm 水稳定性团聚体分布规律类似,<0.25 mm 粒径的团聚体则规律不

明显。不同海拔、不同粒径的土壤有机质含量均随着土层深度加深而呈现出逐渐降低的趋势。本研究中,不同海拔各土层中土壤各粒径团聚体有机质含量表现为随着土层加深而减少的趋势。这与黄晓强等^[19]北京山区典型人工林土壤团聚体研究和苑亚茹等^[20]对东北黑土区的研究也表明随着土壤层次的加深,土壤有机碳含量均呈现了逐渐降低趋势的结果相同。从整体来看,各海拔高度的土壤中大团聚体有机质含量相对较高,据王淑平等^[21]研究表明随着海拔高度增加水分适宜但温度较低,土壤微生物的活动受到抑制,有利于有机质的积累,所以海拔高度的变化影响土壤温度和土壤水分的变化,在这两种因素共同作用下,土壤中有机物含量随着海拔高度升高呈现先升高后降低趋势,这与本研究结果相似。

3.3 不同海拔土壤团聚体 MWD,GMD 及 D 的变化特征

土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D),是用于评价团聚体稳定性十分重要的指标,常用来反映团粒结构的稳定性,可以表示团聚体颗粒大小和粒级分布情况^[17]。MWD 和 GMD 值越大,表明土壤大团聚体含量越高,土壤团聚程度越高,土壤结构更加稳定^[9,22]。本研究中,0—20 cm 土层各海拔高度土壤非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD,GMD 都呈现随海拔高度的升高变化趋势,20—40,40—60 cm 土层规律不明显。随土层深度的增加,非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD,GMD 均呈现下降的趋势。赵友朋^[6]、刘艳等^[22]研究表明,同一林分中,随土层的加深,土壤水稳性大团聚体含量和稳定性均呈下降趋势,与本研究结果类似,不同海拔高度非水稳性团聚体与水稳性团聚体分形维数(D)则与 MWD,GMD 呈现相反的规律性。本研究发现>0.25 mm 水稳性团聚体含量与非水稳定性团聚体呈显著正相关,与团聚结构破坏率呈负相关,说明不同海拔高度土壤大团聚体含量越多,土壤团粒大小分布越均匀,团聚结构被破坏的程度就越低,土壤结构稳定性越强。

4 结论

(1) 不同海拔 >0.25 mm 粒径的土壤中非水稳性团聚体含量占 80% 以上;水稳性体含量占 70% 以上,尤其是在 0—20 cm 土层中, >2 mm 粒径团聚体含量在各粒径中含量也最高,说明研究区川西高寒山地土壤团聚体稳定性高。从分布规律看,0—60 cm 土层 >0.25 mm 粒径的土壤非水稳性团聚体总体上呈现随海拔上升而增加的趋势,而水稳性团聚体则呈现出随海拔升高先逐渐减小后增大的趋势。

(2) 从整体来看,有机质含量主要集中在 >0.25 mm 粒径的大团聚体中,占比在 80% 左右。以 3 800 m 处最高,随海拔升高呈现先增加而后降低的趋势,随着土层深度加深而呈现出逐渐降低的趋势。 <0.25 mm 粒径的团聚体则规律不明显。不同海拔、不同粒径的土壤有机质含量均随着土层深度加深而呈现出逐渐降低的趋势。

(3) 0—20 cm 土层各海拔高度土壤非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD, GMD 都呈现随海拔高度的升高变化趋势,0—20 cm 土层土壤不同海拔土壤随土层深度的增加,非水稳性团聚体与水稳性团聚体 MWD, GMD 均呈现出随海拔降低而逐渐减小的趋势,分形维数 D 则呈现增大的趋势。 >20 cm 土层规律不明显。研究发现在高寒山地土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量与非水稳性团聚体呈显著正相关,与团聚结构破坏率呈负相关,表明表层土壤团粒结构稳定性较好,一旦破坏将对高寒山地生态系统带来严重后果,防止土壤退化应是该区生态保护的重点。

参考文献:

- [1] Yan Y, Cheng H L, Zhong J P. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China[J]. Catena, 2015, 133: 412-419.
- [2] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 15-21, 39.
- [3] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523-1528.
- [4] Lal R, Lal L, Lal S K L. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21 st century[J]. Soil Science, 2000, 165(3): 191-207.
- [5] 由政, 姚旭, 景航, 等. 不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J]. 草业学报, 2016, 23(6): 20-25.
- [6] 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 等. 凤阳山主要林分类型土壤团聚体及其稳定性研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(5): 84-90.
- [7] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 177-182.
- [8] 庄正, 张芸, 张颖, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 183-188.
- [9] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 36-42.
- [10] 国家林业局. 森林土壤分析方法中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210-1275-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [11] 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.
- [12] 谢贤健, 张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 175-179.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 齐思明, 韩瑛, 陈祥伟. 植被恢复对典型黑土表层土壤团聚体水解酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 42-46.
- [16] 桑文, 王卫超, 杨磊, 等. 盐渍化弃耕地不同恢复年限对土壤团聚体含量及稳定性的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(14): 27-31.
- [17] 江仁涛, 李程, 沈淞涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 197-203.
- [18] 李柏桥, 付玉, 李光录, 等. 退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 238-244.
- [19] 黄晓强, 信忠保, 赵云杰, 等. 北京山区典型人工林土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 236-243.
- [20] 苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 等. 典型黑土区不同生态系统土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 47-54.
- [21] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517.
- [22] 刘艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 607-613.