

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.07.006

西藏米拉山土壤团聚体垂直地带性特征

喻武^{1,2}, 任德智³, 杨文姬⁴, 宋珺⁵, 乔锋⁶, 李晶⁶

1. 西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏农牧学院 高寒水土保持研究中心, 西藏 林芝 860000;
3. 成都市农林科学院 林业研究所, 成都 611130; 4. 山合林(北京)水土保持技术有限公司, 北京 100038;
5. 中国铁路总公司发展和改革部, 北京 100844; 6. 水利部沙棘开发管理中心, 北京 100038

摘要: 为探明米拉山土壤结构及团聚体稳定性特征, 利用野外调查和室内试验相结合的方法, 按照 200 m 梯度, 选取研究区海拔 4 200~5 000 m 间土壤, 对 >0.25 mm 团聚体的含量、团聚体破坏率(PAD)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GWD)和分形维数(D)等指标进行分析。结果表明: ① 不同海拔土壤基本理化性质差异有统计学意义。总体上, 海拔 5 000, 4 800 m 土壤容质量及孔隙度结构均优于 4 200~4 600 m, 有机质质量分数随海拔降低先减小后增大, 4 600 m 有机质质量分数显著($p<0.05$)小于其余海拔。② 研究区土壤机械稳定性及水稳性团聚体均以 >0.25 mm 粒径为主。总体上机械稳定性团聚体及水稳性团聚体均表现为海拔 5 000, 4 800 m 优于 4 200~4 600 m, 其 MWD, GMD 值相对较高, PAD 值相对较低, 但差异无统计学意义。在干筛与湿筛两种条件下的 D 值随海拔增加而变小。③ 相关分析表明, 土壤有机质、容质量及大团聚体含量直接影响团聚体稳定性。海拔是区域土壤理化性质产生差异、导致土壤团聚体稳定性异同的重要因素。④ 海拔通过改变水热条件, 间接影响研究区植被覆盖、有机质周转、土壤侵蚀过程, 从而导致土壤结构和团聚体稳定性的差异。

关键词: 米拉山; 垂直地带性; 土壤团聚体; 团聚体稳定性

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2022)07-0059-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Vertical Zonality of Soil Aggregates at the Top of Mila Mountain in Tibet

YU Wu^{1,2}, REN Dezhi³, YANG Wenji⁴,
SONG Jun⁵, QIAO Feng⁶, LI Jing⁶

1. College of Resource and Environment, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi Xizang 860000, China;
2. Research Center of Soil and Water Conservation in Alpine-cold Region, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi Xizang 860000, China;
3. Chengdu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Chengdu 611130, China;
4. Shanhelin Company (Beijing) of Soil and Water Conservation Technology, Beijing 100038, China;
5. Development & Reform Department, China Railway Corporation, Beijing 100844, China;
6. Sea-buckthorn Development Center, Beijing 100038, China

Abstract: The objective of this research was to explore the characteristics of soil structure and aggregate

收稿日期: 2021-03-31

基金项目: 水利部沙棘开发管理中心项目(2017-zg-zx-57); 西藏自治区科技厅重点项目(XZ 2018ZR G-34(Z)).

作者简介: 喻武, 副教授, 主要从事高寒区土壤侵蚀机理及其生态恢复研究。

通信作者: 杨文姬, 博士, 高级工程师。

stability on the top of Mila Mountain. The content of aggregate >0.25 mm, aggregate destruction rate (*PAD*), mean weight diameter (*MWD*), geometric mean diameter (*GMD*) and fractal dimension (*D*) at altitude of 4200~5000m were analyzed by field investigation and laboratory experiment. The results showed that: ① There were significant differences in the basic physical and chemical properties of soils at different altitudes. In general, soil bulk density and porosity structure at 5000 and 4800m were better than those of at 4200—4600 m. The organic matter content decreased first and then increased with the decrease in altitude. The organic matter content at 4600m was significantly ($p<0.05$) less than at other altitudes. ② In the survey area, both the soil mechanical stability and water stable aggregate mostly are >0.25 mm. In general, both mechanically stable aggregates and water-stable aggregates at altitudes of 5000 and 4800m were better than those of at 4200—4600 m, with relatively high *MWD* and *GMD* values, and relatively low *PAD* values, but the difference was not significant. The *D* value under the two conditions of dry sieving and wet sieving decreased with the increase of altitude. ③ The correlation analysis showed that soil organic matter, bulk density and macroaggregate content directly affected the stability of soil aggregates. Altitude was an important factor for the differences of soil physical and chemical properties and the stability of soil aggregates. ④ Altitude indirectly affected vegetation coverage, organic matter turnover and soil erosion process through changing water and heat conditions, which lead to differences in soil structure and aggregate stability. Altitude gradient is the most fundamental factor affecting the stability of soil aggregates. The organic matter is an indispensable factor in the formation of aggregates and the improvement of aggregate stability.

Key words: Mila mountain in Tibet; vertical zonality; soil aggregate; aggregate stability

土壤团聚体是评价土壤侵蚀潜在发生危险性的一个重要指标,其稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为,特别是与降雨入渗、产流过程具有较为紧密的联系^[1].已有研究表明,由于地形、气候、植被以及外界干扰程度的不同,土壤理化性质具有一定的空间异质性,进而使土壤结构稳定性、抗蚀能力产生差异^[2-3].为了减弱团聚体直径对土壤理化性质的影响,并对土壤团聚体的特征进行定量分析, Van Bavel^[4]及 Gardner^[5]提出了平均重量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)的概念,从而提高团聚体含量在土壤物理结构和抗蚀性评价指标体系中的影响权重^[6].而 Hessen 等^[7]利用质量分布与平均粒径间的关系计算出了土壤团聚体分形维数.朱丽琴等^[8]研究结果表明,土壤团聚结构受森林恢复的过程影响所需的时间较为漫长.在森林恢复初期,可通过加强人工抚育促进团聚体的形成和稳定,改善土壤结构.胡阳等^[9]对典型岩溶山区植被恢复的土壤团聚体研究表明, >0.25 mm 粒级的团聚体含量,土壤团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 明显与地表植被覆盖类型有明显的关系.姜敏等^[10]对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研究表明,人工林和自然林土壤稳定性和抗蚀性更好.因此,关于不同植被群落及地形等因素影响下的土壤理化性质及团聚体结构受到众多学者的关注^[11-12].

米拉山海拔梯度差异极大,自然环境呈明显的垂直带性规律,生态环境极其脆弱,季节性冻土发育,土壤稳定性受冻融作用、植被覆盖和侵蚀等方面的影响极为明显.在每年的雨季,融水与降水叠加,形成强烈的地表径流,极易产生水土流失,也对局地位置的植被产生了较大的破坏^[13].近年来,伴随着全球气候变暖,社会经济的快速发展,研究区水土流失因素增多,强度也有增大的趋势.这对区域生态环境保护、开发利用等带来了极大的挑战.研究区虽然开展了一些土壤、植物等方面的研究工作,但多集中在资源的开发利用潜力方面^[13-15],在揭示研究区环境垂直地带性规律特征及其原因方面的研究还比较欠缺.因此本研究以米拉山海拔 4200~5000 m 为研究区域,探讨不同海拔影响下土壤理化性质差异、团聚体分布特征及稳定性特征,从而为藏东南类似米拉山的高寒区生态环境建设与保护提供科学理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于米拉山东坡海拔 4200~5000 m,地理坐标为 $92^{\circ}19.607' - 92^{\circ}31.479'E$, $29^{\circ}50.131' -$

29°54.678'N, 海拔高差 800 m(表 1), 属高原温带季风气候区. 受印度洋暖湿气流影响, 区域干湿季节分明. 每年 5—10 月为雨季, 天气温暖、湿润、多雨; 11—次年 4 月为旱季, 天气干燥、晴朗, 昼夜温差大. 根据工布江达水文站记录, 研究区多年平均气温 7.98 °C, 最低气温 -15.15 °C, 最高气温 29.07 °C. 年气温较差 44.22 °C, 年降水量在 550 mm 左右^[16]. 植被结构较为简单, 主要为草地及灌丛草地, 主要植物有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、羊茅(*Festuca ovina*)、高山柳(*Salix cupularis*)、圆穗蓼(*Polygonum macrophyllum*)、金露梅(*Potentilla fruticose*)等草本及小灌木. 土壤类型多为高寒草甸土和山地黄棕壤.

1.2 样品采集与处理

2017 年 9 月, 从米拉山口向林芝方向, 在海拔 4 200~5 000 m, 以 200 m 为一个海拔梯度, 选取典型样地. 在每个样地内选取代表性位置(图 1), 设立 3 个 10 m×10 m 小样方, 对样地植被、灌草盖度、土壤类型、坡度、坡向等生境进行调查. 以“S”法采集土壤, 采集 0~20 cm 土层原状土壤 2 kg 左右, 用大铝盒装好带回实验室, 按照其纹路轻轻掰成大约直径为 1~2 cm 的土块晾晒风干, 并仔细剔除其中枯枝、树根及砾石. 风干后, 用于土壤团聚体分析, 研磨过 0.149 mm 筛后用于有机质的测定. 同时采集环刀(100 cm³)土样用于容质量、孔隙指标分析. 每样方采样重复 3 次, 原状土样和环刀土样各 45 个.

表 1 样地基本状况

编号	海拔/ m	经纬度	坡度/ °	坡向	植被类型	土壤类型	主要植物	植被 盖度/%
1	5 000	92°20.565'E 29°50.131'N	16	SE	草地	高山 草甸土	高山嵩草—苔草—圆穗蓼	95
2	4 800	92°19.674'E 29°50.578'N	25	SE	草地	亚高山 草甸土	高山嵩草—金露梅—圆穗蓼	90
3	4 600	92°19.607'E 29°52.606'N	18	NE	灌丛	山地 黄棕壤	林芝杜鹃—高山嵩草—圆穗蓼	80
4	4 400	92°24.188'E 29°54.678'N	20	NW	灌丛	山地 黄棕壤	林芝杜鹃—金露梅—圆穗蓼	95
5	4 200	92°31.479'E 29°52.314'N	20	NE	灌丛	山地 黄棕壤	林芝杜鹃—圆穗蓼	96

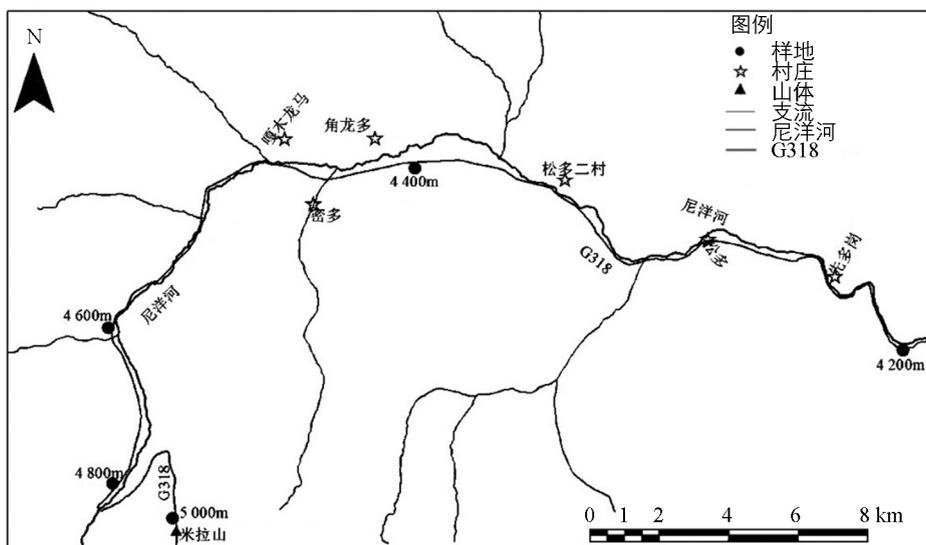


图 1 样地分布

1.3 物理指标测定方法

土壤有机碳采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法测定^[17]。土壤机械稳定性团聚体及水稳性团聚体采用沙维诺夫法测定,土壤容质量、孔隙度采用环刀法测定^[17]。

1.4 指标计算

团聚体破坏率(%)=(>0.25 mm 团聚体分析值(干筛—湿筛)/>0.25 mm 团聚体干筛分析值)×100%。

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i)$$

$$GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right] \quad (1)$$

式中: MWD 为平均重量直径; GMD 为几何平均直径; X_i 为任一粒径范围团聚体平均直径; W_i 为任一粒径范围团聚体质量占土壤样品质量的百分数。

分形维数(Fractal Dimension, D)采用杨培岭等^[18]推导的公式计算:

$$\frac{\omega(\delta < \bar{d}_i)}{\omega_o} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (2)$$

式中: $\omega(\delta < d_i)$ 为粒径小于 d_i 的土粒颗粒总和; δ 为特征尺度; ω_o 为各级土粒质量总和; \bar{d} 为最大粒级的平均粒径; D 为分形维数。对公式(2)求解,首先通过分析确定团聚体的粒径小于某一级别的土粒含量,然后分别以 $\log\left[\frac{\omega(\delta < \bar{d}_i)}{\omega_o}\right]$, $\log\left[\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right]$ 为纵、横坐标,在坐标系上绘出散点图,并进行线性回归分析,则其拟合的直线的斜率值即为 $(3-D)$,从而推算出土壤颗粒分形维数 D 。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010, SPSS 17.0 及 ArcGIS 10.2 分别进行数据统计分析及图表制作。不同数据组间差异显著性比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 多重比较($p < 0.05$)。相关性分析采用 Pearson 双变量相关分析($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

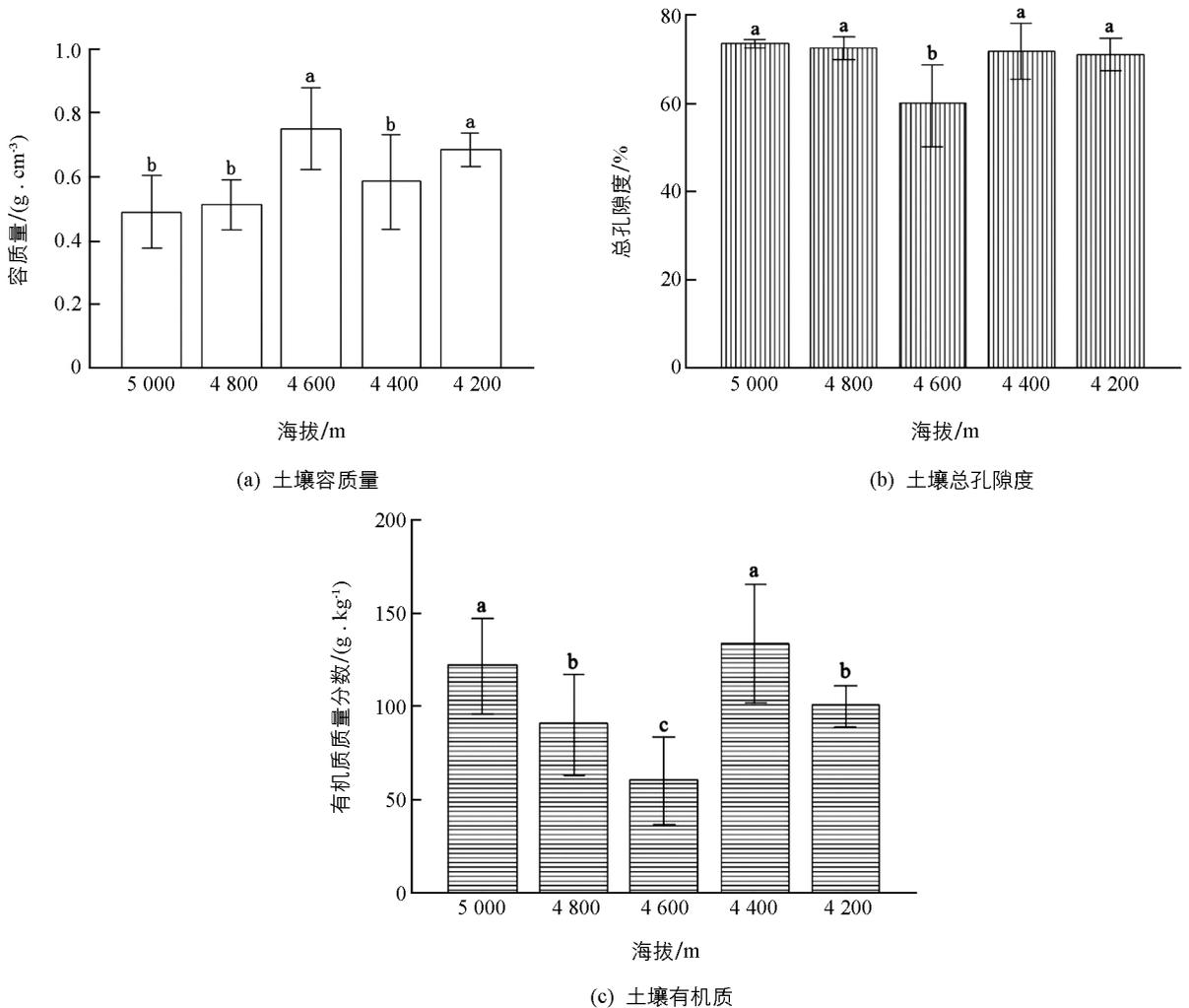
2.1.1 土壤容质量与孔隙度

土壤容质量是土壤的基本物理性质,反映了土壤质地、结构和有机质质量分数等综合物理状况^[19]。孔隙度的大小、数量及分配是土壤物理性质的基础,并对土壤水分和通气透水性有直接影响,是评价土壤结构特征的重要指标^[20]。由图 2a 可知,土壤容质量变化范围在 $0.49 \sim 0.75 \text{ g/cm}^3$ 。海拔 4 600 m 灌木林土壤容质量最大,海拔 5 000 m 草甸地最小。土壤容质量从大到小对应的海拔依次为: 4 600, 4 200, 4 400, 4 800, 5 000 m。经 ANOVA 分析,海拔 4 600 m 与 4 200 m 间差异无统计学意义,但均显著大于其余海拔。而 5 000, 4 800, 4 400 m 海拔间差异无统计学意义。由图 2b 可知,土壤总孔隙度变化范围在 $60.16\% \sim 73.70\%$ 。以海拔 4 600 m 最小,海拔 5 000 m 最大。土壤总孔隙度从大到小对应的海拔依次为: 5 000, 4 800, 4 400, 4 200, 4 600 m。与容质量呈相反变化规律。ANOVA 分析表明,海拔 4 600 m 显著小于其余 4 个海拔。

2.1.2 土壤有机质

由图 2c 可知,有机质质量分数随海拔并无统一的变化规律,总体以海拔 4 400 m 灌木林地最高(133.96 g/kg),其次为海拔 5 000 m 草地(121.94 g/kg),海拔 4 600 m 灌木林地最小(60.03 g/kg)。有机质质量分数从大到小对应的海拔依次为: 4 400, 5 000, 4 200, 4 800, 4 600 m。ANOVA 分析表明,不同海拔

间的灌草地土壤有机质差异具有统计学意义. 其中,以海拔 4 600 m 显著小于其余 4 个海拔,海拔 4 400 m 灌木林地及海拔 5 000 m 草地两者间差异无统计学意义,但均显著大于海拔 4 800 m 草灌林地及海拔 4 200 m 灌木林地,而海拔 4 800 m 与海拔 4 200 m 差异无统计学意义.



不同小写字母表示不同海拔间差异有统计学意义($p < 0.05$),下同.

图2 不同海拔土壤基本理化性质分布特征

2.2 团聚体特征

2.2.1 团聚体数量分布特征

土壤团聚体是组成土壤的基本单元,能反映土壤众多的理化性质,其粒径分布特征更是反映了土壤对外力(风力、水力)侵蚀作用的敏感程度^[21-22].干筛法试验得到的是机械稳定性团聚体,亦称为非水稳性团聚体.土壤团粒结构体通常是指 >0.25 mm的土壤团聚体,是维持土壤结构稳定的基础,通常它在土壤中的比例越高,土壤结构的稳定性就越大^[23-24].由表2可知,研究区土壤团聚体以 >0.25 mm为主,达到90%以上.可见,尼洋河上游海拔4 200~5 000 m的草地、灌丛0~20 cm土层中,团聚体均具有较强的机械稳定性.稳定性从高到低对应的海拔依次为:5 000,4 400,4 200,4 800,4 600 m. ANOVA分析表明,海拔5 000 m及4 400 m均显著大于海拔4 800,4 600,4 200 m.对于不同粒径级,海拔4 400~5 000 m均以 >10 mm粒径团聚体为主,达到50%以上,其余各粒径级数量较小,均未达到10%.而海拔4 200 m处 >10 mm粒径团聚体仅占到29.15%,其余均分散分布于10~0.25 mm间.

利用湿筛法试验得到的是水稳性团聚体. 已有研究表明, 比起非水稳性团聚体, 水稳性团聚体对保持土壤结构的稳定性有更为重要的贡献^[24-25]. 由表 3 可知, 除 4 600 m 海拔 <0.25 mm 水稳性团聚体比例较小, 为 75.15%外, 其余海拔均达到 80%以上, 水稳性团聚体比例从大到小对应海拔依次为: 4 200, 5 000, 4 800, 4 400, 4 600 m. 总体上, 经湿筛后, 研究区土壤均能保持较好的团聚度. ANOVA 分析表明, >0.25 mm 水稳性团聚体比例仅海拔 4 600 m 显著小于其余 4 个海拔, 其余海拔间无明显差异. 对于不同粒径级分布, >5 mm 水稳性团聚体比例从大到小对应海拔依次为: 4 400(50.75%), 4 800(49.37%), 5 000(48.05%), 4 600(40.77%), 4 200 m(28.26%), 4 200 m 显著小于其他海拔. 海拔 5 000, 4 800, 4 400 m 的 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25 mm 3 个粒径级所占比例均较小, 未达到 10%. 海拔 4 600 m 和 4 200 m 的 1~0.5 mm 两个粒径级分别占到 12.58%和 17.22%, 显著大于其他海拔. 总体上研究区土壤水稳性团聚体含量随粒径的减小呈减小趋势.

表 2 土壤机械稳定性团聚体分布特征(干筛法)

%

海拔/m	>10 mm	10~7 mm	7~5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm
5 000	51.24±7.51a	6.33±1.00a	7.61±1.46a	8.91±1.80b	6.13±0.75b	3.24±0.52b	6.79±0.85b	4.13±0.53bc	94.38±0.68a
4 800	52.93±2.12a	5.52±0.31a	5.77±0.81a	7.82±1.05b	5.28±0.69b	3.37±0.31b	6.15±0.07b	5.17±0.12bc	92.01±0.66b
4 600	50.22±0.83a	6.45±0.17a	5.21±0.33a	7.69±0.38b	6.50±0.19b	4.37±0.54b	6.69±0.54b	3.86±0.21c	91.01±0.15b
4 400	58.05±3.95a	3.53±0.89b	4.69±0.68b	7.16±0.98b	5.11±0.49b	3.42±0.24b	6.77±0.57b	5.34±0.44b	94.07±0.59a
4 200	29.15±4.33b	5.51±0.39a	7.28±0.77a	12.81±1.24a	10.68±1.00a	6.84±0.40a	11.93±0.74a	8.22±0.63a	92.44±0.59ab

表 3 水稳性团聚体分布特征(湿筛法)

%

样地/m	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm
5 000	48.05±4.01a	12.82±2.41b	6.15±1.24ab	9.06±3.18b	5.57±0.65ab	81.65±0.77a
4 800	49.37±1.32a	13.57±1.06b	5.72±0.19b	9.65±0.59b	3.20±0.17b	81.51±0.78a
4 600	40.77±2.76a	10.41±1.09b	7.20±0.47b	12.58±2.40ab	4.19±0.95ab	75.15±2.60b
4 400	50.75±2.11a	11.77±1.37b	5.25±0.47b	9.38±0.64b	4.15±0.65ab	81.30±1.58a
4 200	28.26±5.06b	20.31±2.40a	10.83±0.27a	17.22±1.48a	5.90±0.81ca	82.52±1.13a

2.2.2 土壤团聚体稳定性分析

团聚体破坏率(PAD)是破碎的湿筛团聚体比率, 反映了团聚体在以水力为主的外营力影响下保持稳定的能力, 其数值越小, 土壤结构越稳定^[26-27]. 由图 3a 可知, 不同海拔土壤 PAD 存在一定差异, 从最小 10.73%到最大 17.41%, 增加了 62.26%, 但总体上 PAD 都维持在较低水平内. 其中, 海拔 4 600 m PAD 最高, 显著大于海拔 4 200 m, 其余海拔间差异无统计学意义. PAD 从大到小对应海拔依次为: 4 600(17.41%), 4 400(13.54%), 5 000(13.48%), 4 800(11.42%), 4 200 m(10.73%). 比较环境概况可知, 植被是土壤团聚体保持稳定的重要原因.

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)这两项指标能综合反映土壤团聚体大小分布. 已有研究表明^[28], MWD 及 GMD 值越大, 表示土壤团聚度越高, 团聚体稳定性就越好. 由图 3b, 3c 可知, 对于机械稳定性团聚体 MWD, 5 个海拔变化范围在 3.38~4.19 mm, 以海拔 5 000 m 最大, 比最小的海拔 4 200 m 高出 23.96%, MWD 从大到小对应海拔依次为: 5 000(4.19 mm), 4 800(4.03 mm)=4 400(4.03 mm), 4 600(3.98 mm), 4 200 m(3.38 mm). ANOVA 分析表明, 海拔 5 000, 4 800, 4 400, 4 600 m 互相之间差异并无统计学意义, 但均显著大于海拔 4 200 m. GMD 值从大到小对应海拔依次为: 5 000(3.05 mm), 4 400(2.89 mm), 4 800(2.74 mm), 4 600(2.66 mm), 4 200 m(2.13 mm). ANOVA 分析表明, 海拔 5 000,

4 800, 4 400, 4 600 m 互相之间差异无统计学意义, 但均显著大于海拔 4 200 m。据上分析, 不同海拔下的植被群落, 机械稳定性团聚体 MWD 及 GMD 以高海拔(5 000, 4 800 m)的草地最好, 海拔 4 600 m 和海拔 4 400 m 灌丛次之, 海拔 4 200 m 灌丛最小。

在湿筛条件下, MWD 及 GMD 均小于干筛条件的数值, 这是因为湿筛法所测得团聚体数量要远小于干筛法所测得团聚体数量^[29]。 MWD , GMD 变化范围分别为 1.63~1.90, 0.95~1.22 mm。两种指标均以海拔 4 800 m 最大, 分别为 1.90, 1.22 mm。海拔 4 400 m 次之, 为 1.87, 1.20 mm。海拔 4 600 m 最小, 仅为 1.63, 0.95 mm。两个指标大小规律表现一致, 从大到小对应海拔依次为: 4 800(1.90, 1.22 mm), 4 400(1.87, 1.20 mm), 5 000(1.85, 1.18 mm), 4 200(1.87, 1.20 mm), 4 600(1.63, 0.95 mm)。ANOVA 分析表明, MWD , GMD 在海拔 5 000, 4 800, 4 400 m 差异无统计学意义, 但均显著大于海拔 4 600 m 和海拔 4 200 m。 MWD 以海拔 4 200 m 灌丛显著小于海拔 4 800 m 草地。由此可知, 较高海拔(5 000, 4 800 m)的草地团聚体水稳性结构要优于中低海拔(4 400, 4 200 m)灌丛地。

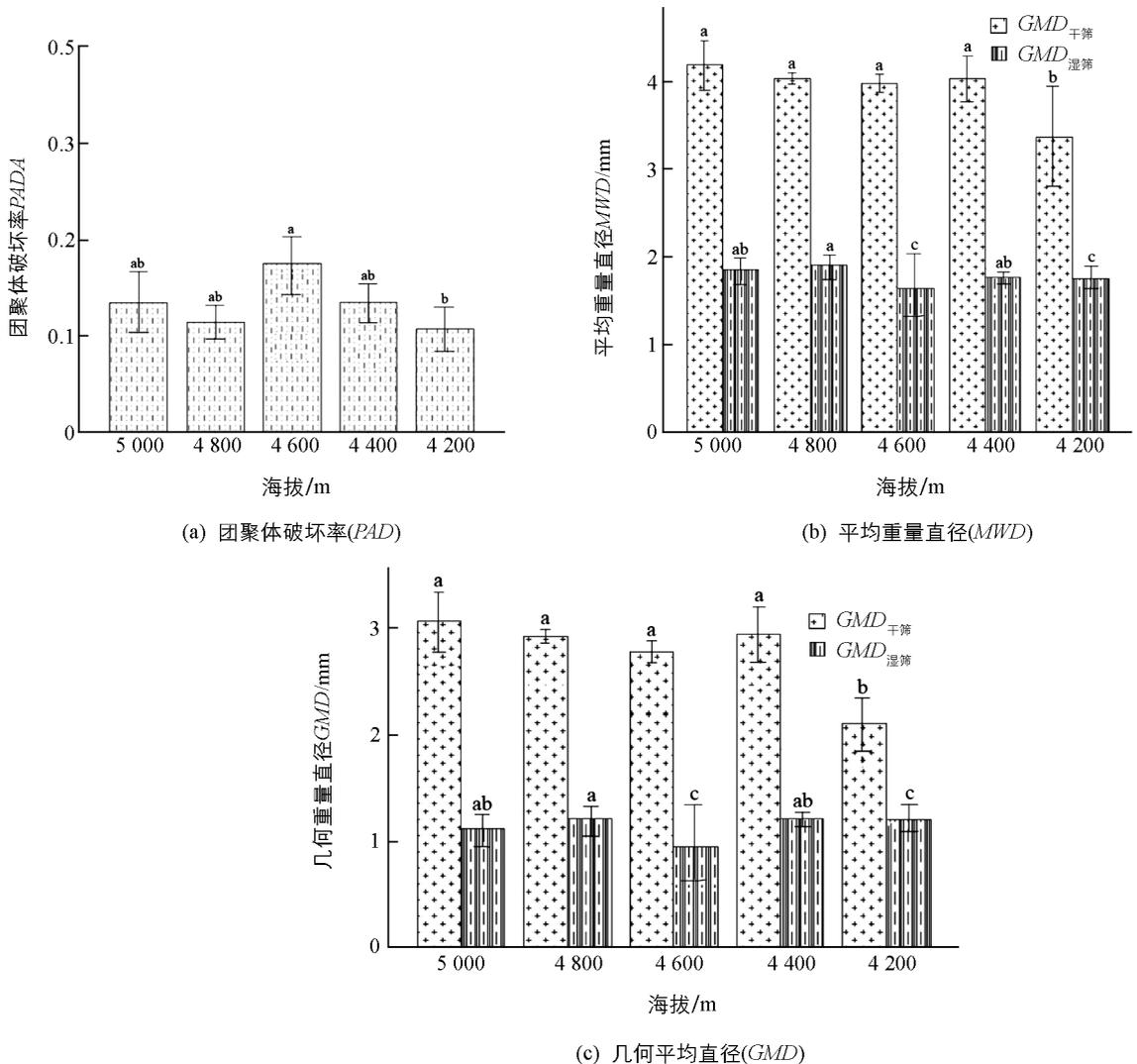


图 3 土壤团聚体稳定性特征

2.3 团聚体分形维数

团聚体粒径分布的分形维数(D)越小, 则土壤的结构和稳定性越好^[6]。由表 4 可知, 机械稳定性团聚体 $D_{\text{干筛}}$ 为 2.43~2.53, 水稳性团聚体 $D_{\text{湿筛}}$ 为 2.54~2.65。回归分析所得 R^2 均在 0.87 以上。其中, $D_{\text{干筛}}$ 以海拔 4 600 m 最大, 海拔 5 000 m 最小。 $D_{\text{湿筛}}$ 以海拔 4 600 m 最大, 海拔 4 200 m 最小。两种不同

条件下的 D 值从大到小对应海拔依次为: 干筛 4 600, 4 800, 4 400, 4 200, 5 000 m; 湿筛 4 600, 4 400, 4 800=5 000, 4 200 m. 两种条件下的 D 在海拔 5 000~4 600 m 逐渐增大, 即从草地过渡到灌木林地, D 增大. ANOVA 分析表明, 对于 $D_{\text{干筛}}$, 海拔 4 400 m 与其余 4 个海拔差异均无统计学意义. 海拔 5 000, 4 200 m 均显著小于海拔 4 800, 4 600 m. 对于 $D_{\text{湿筛}}$, 除海拔 4 600 m 与海拔 4 200 m 差异有统计学意义, 其余差异无统计学意义.

表 4 团聚体分形维数 D

%

样地/m	$D_{\text{干筛}}$	R^2	$D_{\text{湿筛}}$	R^2
5 000	2.43±0.01b	0.943 8	2.59±0.03ab	0.877 2
4 800	2.52±0.03a	0.918 8	2.59±0.01ab	0.879 8
4 600	2.53±0.01a	0.935 9	2.65±0.03a	0.899 6
4 400	2.48±0.02ab	0.919 5	2.60±0.02ab	0.872 3
4 200	2.46±0.02b	0.978 8	2.54±0.02b	0.975 1

2.4 团聚体稳定性影响因素

为探明研究区土壤团聚体稳定性影响因素, 对各指标进行 Pearson 相关性分析, 由表 5 可知, 干筛条件 >0.25 mm 团聚体与 $MWD_{\text{干筛}}$, $MWD_{\text{湿筛}}$, $GWD_{\text{干筛}}$, $GMD_{\text{湿筛}}$ 和总孔隙度呈显著性正相关 ($p < 0.05$), 与 $D_{\text{干筛}}$ 极显著负相关 ($p < 0.01$), 与有机质呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与容质量呈显著负相关 ($p < 0.05$). 湿筛条件 >0.25 mm 团聚体与 PAD , $D_{\text{湿筛}}$ 呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与 $MWD_{\text{湿筛}}$, $GMD_{\text{湿筛}}$ 和总孔隙度呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与有机质呈显著正相关 ($p < 0.05$). PAD 与 $MWD_{\text{湿筛}}$, $GMD_{\text{湿筛}}$ 和总孔隙度呈显著负相关 ($p < 0.05$), 与 $D_{\text{湿筛}}$ 呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 与容质量呈正相关 ($p > 0.05$), 与有机质呈负相关 ($p > 0.05$). 湿筛条件下的 MWD , GMD 与有机质呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与总孔隙度呈极显著正相关, 与土壤容质量显著呈负相关 ($p < 0.05$). 而干筛条件下 MWD 与容质量相关性有统计学意义 ($p < 0.05$). 分形维数 D 与有机质、总孔隙度呈负相关, 与土壤容质量呈正相关. 但仅 $D_{\text{干筛}}$ 与有机质相关性有统计学意义 ($p < 0.05$). 由此可知, 团聚体各项稳定性指标在不同程度上受到土壤基本理化性质的影响. 一方面, 有机质质量分数增加能够增强土壤肥力, 促进团聚体中孔隙度的增加, 为土壤微生物及物质的生存转换提供空间, 进一步促进植被生长, 从而使土壤变得疏松多孔, 土壤容质量减小. 土壤容质量越小, 孔隙度越大, 持水性能越强, 土壤结构越好. 另一方面, 有机质作为土壤团聚体形成的胶结物质, 能够胶结较小的团聚体, 促进大团聚体的形成, 增加大团聚体数量, 改善土壤结构^[28].

表 5 指标相关性分析

指标	>0.25 mm		PAD	$MWD_{\text{干筛}}$	$MWD_{\text{湿筛}}$	$GWD_{\text{干筛}}$	$GMD_{\text{湿筛}}$	$D_{\text{干筛}}$	$D_{\text{湿筛}}$	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	容质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙 度/%	海拔/ m
	干筛	湿筛											
>0.25 mm 干筛	1												
>0.25 mm 湿筛	0.4	1											
PAD	-0.011	-0.921**	1										
$MWD_{\text{干筛}}$	0.427*	-0.186	0.384	1									
$MWD_{\text{湿筛}}$	0.561*	0.726**	-0.554*	0.373	1								
$GWD_{\text{干筛}}$	0.629*	-0.094	0.369	0.962**	0.443	1							
$GMD_{\text{湿筛}}$	0.547*	0.825**	-0.668**	0.293	0.980**	0.362	1						
$D_{\text{干筛}}$	-0.818**	-0.398	0.084	-0.035	-0.299	-0.238	-0.305	1					
$D_{\text{湿筛}}$	-0.109	-0.867**	0.897**	0.575*	-0.373	0.519*	-0.496	0.35	1				
有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.762**	0.569*	-0.300	0.115	0.549*	0.294	0.551*	-0.605*	-0.349	1			
容质量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	-0.672*	-0.479	0.312	-0.649*	-0.842*	-0.71	-0.756*	0.502	0.12	-0.551	1		
总孔隙度/%	0.695*	0.883**	-0.763*	0.124	0.819**	0.260	0.862**	-0.593	-0.654	0.777**	-0.723*	1	
海拔/m	0.164	-0.064	0.140	0.749**	0.291	0.664**	0.227	-0.031	0.328	-0.003	-0.621	0.163	1

为进一步探明团聚体稳定性各项指标间的关系, 采用多元逐步回归分析的方法进行论证. 由表 6 可知, $MWD_{干筛}$ 受到海拔影响最大, 即研究区随着海拔增高, $MWD_{干筛}$ 增大. $GMD_{干筛}$ 主要受到土壤容质量影响最大, 其回归系数为负值, 说明土壤容质量一定程度能够反映土壤团聚体机械稳定性. 分形维数主要受到 >0.25 mm 机械稳定性团聚体影响. $MWD_{湿筛}$, $GMD_{湿筛}$ 及 $D_{湿筛}$ 均主要受到 >0.25 mm 水稳性团聚体与容质量影响. 而 PAD 则主要受到 >0.25 mm 团聚体比例影响, 由回归方程可知, 风干团聚体中, 水稳性大团聚体比例越高, 则 PAD 越小, 土壤结构越稳定.

表 6 不同筛分条件下团聚体稳定性指标的回归方程

指标	机械稳定性团聚体	指标	水稳性团聚体	指标	团聚体破坏率
Y_1	$Y_1=0.629+0.001X_4$	Y_{1-1}	$Y_{1-1}=1.035+1.531X_3-0.764X_1$	Y_4	$Y_4=0.161-1.080X_3+0.907X_2$
Y_2	$Y_2=4.171-2.340X_1$	Y_{2-1}	$Y_{2-1}=-0.370+2.317X_3-0.594X_1$		
Y_3	$Y_3=4.546-2.225X_2$	Y_3	$Y_3=3.919-1.228X_3-0.213X_1$		

注: Y_1, Y_2 分别为 $MWD_{干筛}, GMD_{干筛}$; Y_{1-1}, Y_{2-1} 分别为 $MWD_{湿筛}, GMD_{湿筛}$; Y_3 为分形维数; Y_4 为团聚体破坏率; X_1, X_2, X_3, X_4 分别为土壤容质量、 >0.25 mm 机械稳定性团聚体、 >0.25 mm 水稳性团聚体、海拔.

3 讨论

青藏高原东南部山地海拔垂直变化大, 土壤物理结构地带性差异明显^[30]. 通过对不同海拔间土壤基本理化性质分析发现, 海拔对研究区容质量、总孔隙度、有机质和团聚体具有显著影响($p < 0.05$). 海拔 4 800~5 000 m 的山顶高山草甸土, 地表植被多为茂密的草本植物, 根系密集, 土壤疏松, 且由于温度低, 有机质分解转换慢, 含量高, 不利于大团聚体形成, 受外力作用, 土壤容易破碎, PAD 值较高. 受全球气候变暖的影响, 山顶冰川逐年融化, 形成融水径流. 融水径流运移至海拔 4 600 m 处附近时, 逐步具备侵蚀能力, 带走坡面细小土壤颗粒. 再加上强烈的冻土垂直分选作用使山体趋于石质化, 坡面景观变得更加破碎. 因此, 4 600 m 处地表土层薄, 植被覆盖差, 山体石砾化, 有机质质量分数低, 土体结构变差, PAD 值大. 因此, 区域土壤稳定性变差, 山体石质化, 土壤侵蚀加剧将是该区域相当长一段时间面临的生态环境问题. 这与陈山等^[29]研究的有机质能够增强土壤颗粒胶结能力, 显著降低 PAD 值结论有较大差异. 本研究结果表明, PAD 与受环境因素影响形成的 >0.25 mm 团聚体比例关系更为密切. 干、湿筛两种条件下 D 值在海拔 5 000~4 600 m 逐渐增大, 即高海拔土壤理化性质较优, 土壤结构良好, D 值较小. 但海拔 4 600~4 200 m 灌丛分形维数减小, 这主要是因为随着海拔的降低, 平均气温逐渐升高, 气候环境逐渐转好, 物种丰富度逐渐增大, 植被根系逐渐发达, 有机质质量分数增加, 土壤结构逐渐改善. 相关分析表明, 两种不同的海拔梯度条件下 D 值与海拔相关程度均较弱, 而与 >0.25 mm 团聚体、有机质、孔隙度呈负相关, 与 PAD 、容质量呈正相关. 这与大多数研究结果一致^[23, 31-33]. 即有机质能够增大土壤孔隙, 促进大团聚体形成, 增强土壤稳定性, 降低 PAD , 从而降低 D 值. 同时也说明, 不同海拔梯度水热条件不同, 进而使植被及土壤产生差异. 对于高原山地地貌而言, 自然环境的地带性特征深刻影响着土壤的理化结构, 导致不同海拔带土壤团聚体稳定性的异同^[29]. 可见, 海拔梯度变化是影响土壤团聚体稳定性的主要因素.

4 结论

研究区不同海拔土壤基本理化性质差异有统计学意义, 土壤容质量为 $0.49\sim 0.75$ g/cm³, 总孔隙度为 $60.16\%\sim 73.70\%$. 土壤有机质质量分数为 $60.03\sim 133.96$ g/kg. 总体上, 海拔 5 000, 4 800 m 草地土壤理化性质优于海拔 4 200~4 600 m 的灌木林地.

研究区土壤团聚体均以 >0.25 mm 团聚体为主. 其中 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量达到 90% 以上, 水稳性团聚体在 75% 以上. 较高海拔草地, 灌木林地对土壤结构改良作用弱, 但随海拔降低, 灌木林地土壤结构有所好转. PAD 值范围为: 10.73%~17.41%, 总体偏低, 各海拔间差异无统计学意义. 海拔对 MWD , GMD 两指标影响显著, 总体上机械稳定性团聚体及水稳性团聚体均表现为海拔 5 000, 4 800 m 草地优于灌木林地. $D_{干筛}$ 为 2.43~2.53, 水稳性团聚体 $D_{湿筛}$ 为 2.54~2.65. 干、湿筛两种条件下的 D 值, 随海拔增加呈先大后小变化规律.

通过多元逐步回归分析方法, 建立了团聚体稳定性指标, MWD , GMD 和 PAD 在干、湿筛条件下与土壤容质量、团粒结构和海拔等因子的线性方程, 具体为: 干筛, $Y_1 = 0.629 + 0.001X_4$, $Y_2 = 4.171 - 2.340X_1$, $Y_3 = 4.546 - 2.225X_2$; 湿筛, $Y_{1-1} = 1.035 + 1.531X_3 - 0.764X_1$, $Y_{2-1} = -0.370 + 2.317X_3 - 0.594X_1$, $Y_3 = 3.919 - 1.228X_3 - 0.213X_1$; 团聚体结构破坏率: $Y_4 = 0.161 - 1.080X_3 + 0.907X_2$. 分析结果表明, 团聚体稳定性指标最直接的影响因素主要为土壤容质量和大团聚体含量. 海拔通过综合影响其他物理指标影响团聚体稳定性.

参考文献:

- [1] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 114-117.
- [2] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲, 等. 祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(2): 548-556.
- [3] 白一茹, 王幼奇, 展秀丽. 陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物理性质及分布特征的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1619-1627.
- [4] VAN BAVEL C H M. Mean Weight-Diameter of Soil Aggregates as a Statistical Index of Aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [5] GARDNER W R. Representation of Soil Aggregate-Size Distribution by a Logarithmic-Normal Distribution [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20(2): 151-153.
- [6] 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.
- [7] HESSEN D O, ÅGREN G I, ANDERSON T R, et al. Carbon Sequestration in Ecosystems: The Role of Stoichiometry [J]. Ecology, 2004, 85(5): 1179-1192.
- [8] 朱丽琴, 黄荣珍, 黄国敏, 等. 不同人工恢复林对退化红壤团聚体组成及其有机碳的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 58-66.
- [9] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 61-67.
- [10] 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.
- [11] 冯燕辉, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同林分密度华北落叶松林枯落物及土壤特征分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 179-187.
- [12] 翁昊璐, 慈恩, 连茂山, 等. 重庆市酸性紫色土成因及其对发生分类的意义 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 32-39.
- [13] 张昕川, 刘纪根, 张平仓. 尼洋河流域水土流失综合治理措施探讨 [J]. 人民长江, 2013, 44(19): 85-87, 95.
- [14] 杨永红, 阮新建, 邓欣. 巴河水电开发对尼洋河流域生态环境的影响分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 91-94.
- [15] 王培清. 西藏尼洋河水利资源开发利用浅析 [J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 59-62.
- [16] 王建群, 陈红红, 洛珠尼玛. 藏东南尼洋河流域降水径流量平衡问题 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 283-287.

- [17] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林土壤分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 32-33.
- [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 [J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [19] 曹鹤, 薛立, 谢腾芳, 等. 华南地区八种人工林的土壤物理性质 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 620-625.
- [20] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.
- [21] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展 [J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
- [22] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228-231, 236.
- [23] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征 [J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [24] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征 [J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1654-1662.
- [25] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256.
- [26] PERFECT E, KAY B D. Fractal Theory Applied to Soil Aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1552-1558.
- [27] 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.
- [28] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区4种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 162-166.
- [29] 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.
- [30] 万丹, 梁博, 聂晓刚, 等. 西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性 [J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1065-1074.
- [31] 刘威, 张国英, 张静, 等. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 117-122.
- [32] 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.
- [33] 宁登豪, 邓洪平, 李文巧, 等. 三峡库区城镇消落区土壤重金属污染特征分析 [J]. 三峡生态环境监测, 2021, 6(4): 11-23.

责任编辑 包颖