

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.015.

肖盛杨, 张蓝月, 陈敬忠, 等. 梵净山不同海拔土壤团聚体稳定性及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 160-168.

Xiao Shengyang, Zhang Lanyue, Chen Jingzhong, et al. Stability of Soil Aggregates and Its Influencing Factors at Different Elevations in Fanjing Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 160-168.

梵净山不同海拔土壤团聚体稳定性及影响因素

肖盛杨¹, 张蓝月¹, 陈敬忠², 陆祥³, 李海波⁴, 廖小锋¹, 谢元贵⁵

(1.贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 2.贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 3.贵州省食品药品检验所, 贵阳 550004; 4.贵州梵净山国家级自然保护区管理局, 贵州 江口 554400; 5.贵州科学院, 贵阳 550001)

摘要: [目的] 阐明土壤团聚体稳定性的海拔分布模式及其影响机制对评估山地自然生态系统生态功能稳定性至关重要。[方法] 在梵净山 900~2100 m 海拔梯度下采集不同土层深度的土壤样品, 借助干湿筛法和冗余分析(RDA)方法探讨了土壤环境因子与土壤团聚体稳定性的关系。[结果] 在 0—60 cm 土层, 土壤团聚体主要以 >0.25 mm 水稳性大团聚体为主, 平均含量为 86.78%; 在 0—20 cm 土层各海拔梯度差异显著, 且中海拔 1 500~1 800 m 处显著高于 1 800~2 100 m ($p<0.05$)。土壤团聚体 MWD, GMD 和 D 与海拔存在显著相关性, 随海拔的升高土壤团聚体 MWD 和 GMD 均呈先升高后降低的单峰分布模式, 在中海拔 1 500~1 800 m 处达到峰值; 且在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层, 1 500~1 800 m 的 MWD 和 GMD 分别为 5.03, 3.64 和 4.79, 3.52, 显著高于 900~1 200 m 和 1 800~2 100 m ($p<0.05$)。冗余分析显示, 土壤团聚体稳定性沿海拔梯度变化主要受土壤 SOC 和 pH 值的影响, 解释度分别为 76.3% 和 1.3%, 是影响土壤团聚体稳定性的主要环境因子。[结论] 梵净山山地森林生态系统土壤团聚体稳定性沿海拔梯度具有明显差异, 土壤化学性质是影响团聚体稳定性的重要因素。

关键词: 山地生态系统; 团聚体稳定性; 海拔梯度; 梵净山

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0160-09

Stability of Soil Aggregates and Its Influencing Factors at Different Elevations in Fanjing Mountain

Xiao Shengyang¹, Zhang Lanyue¹, Chen Jingzhong²,
Lu Xiang³, Li Haibo⁴, Liao Xiaofeng¹, Xie Yuanguai⁵

(1. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China;

2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Institute

for Food and Drug Control, Guiyang 550004, China; 4. Fanjingshan National Nature Reserve

Administration Bureau, Jiangkou, Guizhou 554400, China; 5. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to elucidate the altitude distribution pattern and its impact mechanism of soil aggregate stability, which is imperative for evaluating the stability of ecological functional in mountain ecosystems. [Methods] Soil samples were collected in different soil depths under the elevation gradient of 900~2 100 m in Fanjing Mountain. The relationship between soil environmental factors and the stability of soil aggregates were discussed by means of wet-dry screening and redundancy analysis (RDA). [Results] The content of macroaggregates (>0.25 mm) constituted the largest proportion (86.78%) of aggregate sizes across all elevations in mountain forest ecosystem in 0—60 cm soil layer. In 0—20 cm soil layer, the altitude gradient was significantly different, and the middle altitude 1 500~1 800 m was significantly higher than 1 800~2 100 m ($p<0.05$). There was a significant correlation between the MWD,

收稿日期: 2023-06-29

修回日期: 2023-07-23

资助项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础—ZK[2022]—一般 276, 黔科合基础—ZK[2021]—一般 100, 黔科合支撑[2023]—一般 048); 贵州科学院青年科学基金项目(黔科院 J 字[2023]13 号)

第一作者: 肖盛杨(1995—), 男, 贵州思南人, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤物理与生态环境研究。E-mail: 1269093654@qq.com

通信作者: 谢元贵(1982—), 男, 四川达州人, 博士, 研究员, 主要从事土地资源与生态学研究。E-mail: 158701413@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

GMD, and D of soil aggregates and altitude. As altitude increased, the MWD and GMD of soil aggregates showed a single peak distribution pattern of first increasing and then decreasing, reaching a peak at 1 500~1 800 m at mid altitude. In the 0—20 cm soil layer, the MWD and GMD of 1 500~1 800 m were 5.03, 3.64 and 4.79, 3.52, respectively, significantly higher than 900~1 200 m and 1 800~2 100 m ($p<0.05$). Redundancy analysis (RDA) showed that the stability of soil aggregates along the altitude gradient was mainly affected by soil organic carbon and pH, and the explanations for the stability of soil aggregates were 76.3% and 1.3%, respectively. [Conclusion] In the forest ecosystem of Fanjing Mountain, the stability of soil aggregates varies significantly along the elevation gradient, and soil chemical properties are important factors affecting the stability of aggregates.

Keywords: mountain ecosystem; aggregate stability; elevation gradient; Fanjing Mountain

山地森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,因其复杂而独特的地理环境具有重要的生态功能^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性是理解土壤理化性质与复杂结构相互作用的一个可行而有效的因素;是抵抗外界破坏和维持结构稳定性的能力;是评价土壤质量和土壤抗蚀性能的重要指标^[2-3]。因此,开展山地森林生态系统土壤结构稳定性研究,对维持土壤生态功能(维持植物生长、保持养分循环和抗蚀性能等)具有十分重要的科学意义。

土壤团聚体稳定性受到海拔梯度、植被类型、土壤性质、生物活动等与当地自然环境相关因素的影响^[4]。特别是在山地森林生态系统中,海拔是造成森林生态系统特征分异最显著的因素(如气候、植被分布和土壤矿物),海拔梯度的变化很大程度上改变了土壤的微环境,通过直接或间接影响土壤团聚体的稳定性^[5]。例如,Zhu等^[6]报道了四川雪宝顶山高海拔地区具有较高土壤团聚体稳定性和团聚速率;Wu等^[7]在贺兰山的研究表明,中海拔区域土壤团聚体稳定性较高;而马寰菲等^[8]在秦岭太白山的研究发现,低海拔区域土壤团聚体稳定性较好。然而,以往的研究表明,土壤团聚体的稳定性随海拔梯度的变化呈多样化分布模式;由于研究区气候环境的复杂性,土壤团聚体稳定性的海拔分布并未明确倾向于某种分布模式,可能还受到其他环境因子的影响,仍需进一步明确其海拔分布模式及影响因素。目前针对国家级自然保护区山地森林生态系统,尤其是梵净山地区沿海拔梯度开展土壤团聚体稳定性及影响因素的研究尚未明确。

梵净山是中亚热带湿润区山地森林生态系统生物生态演化过程的典型代表地^[9],具有原生性强、完整且独特的山地垂直自然带谱^[10],在调节气候、固碳释氧、物种资源保护以及人类社会生产与发展等方面扮演着重要角色。迄今为止,关于梵净山海拔梯度上的研究主要集中在植被群落分布^[11]、土壤化学性质^[12]、土壤微生物群落及多样性^[13]、土壤动物群落

结构等^[14]方面;而对于土壤物理性质的研究所见报道极为有限,仅有学者从土壤质地^[15]和土壤发生学特性与系统分类^[16]两方面开展研究。因此,针对梵净山不同海拔梯度土壤结构稳定性研究的不足,本研究选择梵净山不同海拔梯度的土壤为研究对象,探究土壤团聚体稳定性沿海拔的分布模式及影响因素,旨在为梵净山国家级自然保护区的生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

梵净山位于贵州省东北部铜仁市辖区内(27°49′—28°1′N,108°45′—108°48′E),系武陵山脉主峰,最高峰凤凰山海拔2 572 m。梵净山属中亚热带季风山地湿润气候,年平均气温13.1~14.7℃,年平均降水量1 100~2 600 mm,年均相对湿度80%以上。根据梵净山的地质背景和森林植被组成的调查结果,选取植被垂直带谱分布明显、类型齐全的梵净山西侧牛尾河流域为研究区。梵净山拥有典型植物区系过渡性及地球上同纬度保存完好的亚热带山地森林生态系统^[10]。由于地势抬升而造成的生物气候差异,梵净山西坡土壤具有明显的垂直分布规律:黄红壤(600 m以下)→黄壤(600~1 500 m)→黄棕壤(1 500~2 000 m)→山地暗色矮林土(2 000~2 300 m)→山地灌丛草甸土(2 300~2 572 m)^[12]。

1.2 试验设计与土样采集

于2021年9月,在梵净山西侧牛尾河流域,选择地层带为青白口系下江时期芙蓉坝组至清水江组的区域作为研究区,以300 m高差设置海拔梯度带,由下至上共设置4个海拔梯度带:900~1 200 m(E1),1 200~1 500 m(E2),1 500~1 800 m(E3)和1 800~2 100 m(E4)(表1),在每个海拔梯度带上选取地形、地貌、坡向和坡度等基本一致的标准样地,每个海拔梯度带随机选取3个重复样地(30 m×30 m),每个样地至少间

隔 50 m,共设 12 个样地。去除林下表层枯枝落叶,用锄头和铲在每个样地的中心位置垂直挖取一个土壤剖面,剖面深度根据土体深度确定,以开挖到岩石(基岩)为止,同层采集 3 个重复土样混合为一个样品,表层土壤按照 0—10 cm 和 10—20 cm 采集,深层土壤按 20 cm 为一层进行分层采样,总共采集土样

63 份。采集好的原装土样放入不易变形的聚乙烯盒中,以保持原状土壤结构,带回实验室,沿着土壤自然结构面剥成直径约 10 mm 大小的小土块,除去植物残体、小石块以及动物遗体,待自然风干后分为两份,一份直接用于测定土壤团聚体;另一份研磨过筛 2 mm 和 0.25 mm 后测定土壤理化性质。

表 1 梵净山不同海拔梯度样地特征

Table 1 Characteristics of sample plots with different altitudinal gradients in Fanjing Mountain

编号	海拔 梯度/m	水平	坡度/ (°)	坡向/ (°)	植被 类型	土壤类型	平均土层 厚度/cm	地层 名称
E1	900~1200	低海拔	30	西南 210	杉木林	黄壤	106	青白口系
E2	1200~1500	中海拔	33	西南 203	鹿角杜鹃林	黄壤	96	下江时期
E3	1500~1800	中海拔	35	西南 240	鹿角杜鹃林	黄棕壤	75	芙蓉坝组至
E4	1800~2100	高海拔	30	西南 226	硬壳柯林	黄棕壤	60	清水江组

1.3 土壤理化指标测定

土壤机械组成采用比重计法测定;土壤 pH 值通过玻璃电极 pH 计测定,水土比为 2.5 : 1;土壤电导率(Ec)采用 DDS-307 A 型电导率仪测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;土壤阳离子交换量(CEC)用醋酸铵浸提后,经乙醇和氯化钠清洗后用间接扩散法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮仪测定;土壤全磷(TP)采用碱熔—钼锑抗比色法测定;碳氮比(C : N)=土壤有机碳(SOC) : 土壤全氮(TN);碳磷比(C : P)=土壤有机碳(SOC) : 土壤全磷(TP),以上指标的测定方法参考《森林土壤分析方法》^[17]。每份土壤样品设置 3 个重复,且设置空白作对照。

1.4 土壤团聚体含量及稳定性分析

土壤团聚体分离的干筛法和湿筛法参照韩贞贵等^[18]的研究方法进行。采用四分法取出 1 000.0 g 土样,通过干筛法分别过 5 mm,2 mm,1 mm,0.5 mm 和 0.25 mm 筛子,然后将每个筛上的团聚体按粒径类别称重,计算各粒径干筛团聚体所占团聚体总重量百分比。并按干筛的各粒径团聚体所占比例配成 100.0 g 土样放入湿筛套筛(5 mm,2 mm,1 mm,0.5 mm 和 0.25 mm)垂直摇床装置(TTF-100 型团聚体分析仪)中,浸泡 5 min,以 330 次的频率振荡 5 min,筛分完成后收集每一层筛上的水稳性团聚体,并在 105℃的烘箱中烘干,称重并表示为各粒级水稳性团聚体的质量。

(1) 平均重量直径(MWD)的计算公式^[18]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \omega_i \times \bar{x}_i \quad (1)$$

式中: ω_i 表示某粒级团聚体的质量比(%); \bar{x}_i 表示某一粒级的平均直径(mm), n 表示团聚体粒级数。

(2) 几何平均直径(GMD)的计算公式^[18]:

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right) \quad (2)$$

式中: ω_i 表示某粒级团聚体的质量比(%); $\ln x_i$ 表示土壤粒级平均直径的自然对数。

(3) 分形维数(D)的计算公式^[19]:

$$D = 3 - \frac{\lg \left(\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_i} \right)}{\lg \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right)} \quad (3)$$

式中: $M(r < \bar{x}_i)$ 表示粒径小于 \bar{x}_i 的团聚体的质量(g); M_i 表示测定团聚体的总质量(g); \bar{x}_i 表示某一粒级的平均直径(mm); x_{\max} 表示团聚体的最大直径(mm)。

1.5 数据分析

所有统计分析均采用 SPSS 20.0 进行,用 Origin Pro 2022 软件作图。采用单因素方差分析(ANOVA)比较 4 种海拔梯度以及不同土层深度下土壤团聚体稳定性以及土壤理化性质的差异。当差异显著时,使用 Tukey 检验($p < 0.05$)对数进一步分析,以评估 4 种海拔梯度间的差异。所有数据均采用 Jarque-Bera 检验进行正态性检验,采用 Levene's 检验进行组间方差齐性检验。必要时对数据进行平方根或对数转换。采用 Pearson 双变量相关性分析对土壤团聚体稳定性指标与理化性质指标做分析。使用 Canoco5 进行冗余分析(redundancy analysis,RDA)检验环境因子对土壤团聚体稳定性沿海拔梯度变异的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

研究区各采样点剖面土壤颗粒组成在美国土壤质地分类三角坐标图中的分布情况如图 1 所示,土壤质地总体上以壤土为主要,占比达 68.25%。由图 2 可知,4 种海拔梯度带土壤总体呈酸性,0—20 cm 土层,土壤 pH 值随海拔升高而减小;整个土壤剖面上土壤 pH 值为高海拔 E4 显著小于其他海拔梯度($p < 0.05$)。土

壤 SOC 和 TN 在海拔梯度上的变化特征基本一致,随着海拔的升高整体呈单峰模式,在 0—20 cm 土层,中海拔 E3 显著大于低海拔和高海拔($p < 0.05$);而土壤 Ec 表现为 E2 小于其他海拔梯度。在 0—40 cm 土层,土壤 CEC 随海拔梯度的增加呈增加趋势;而土壤 TP 随海拔梯度的增加呈先减小后增加的趋势,在 E2 处最低。4 种海拔梯度下,随土层深度的增加,pH 值呈增大趋势;而土壤 Ec,CEC,SOC,TN 和 TP 呈减小趋势。

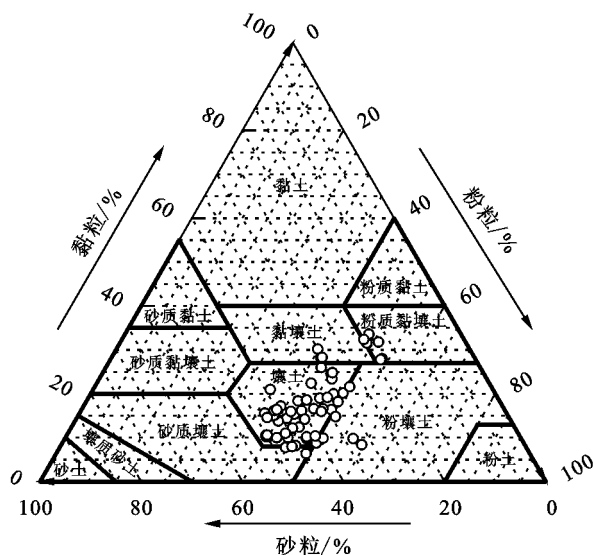


图1 土壤质地三元图

Fig. 1 Ternary map of soil texture

2.2 土壤团聚体及稳定性沿海拔梯度的变化特征

土壤团聚体粒径分布沿海拔梯度的变化具有差异性(图3)。在 0—60 cm 土层,土壤团聚体主要以 >0.25 mm 水稳性大团聚体为主,平均含量为 86.78%,且随海拔的升高呈单峰分布。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,各海拔梯度土壤团聚体均以 >5 mm 和 5—2 mm 粒径团聚体为主,而 >5 mm 粒径团聚体含量在中海拔 E3 处(平均含量分别为 53.68% 和 49.13%)显著高于 E4($p < 0.05$)。20—40 cm 和 40—60 cm 土层, >0.25 mm 水稳性大团聚体含量均在 E3 处最高,但各海拔间的差异不显著($p > 0.05$)。总体而言,随土层深度的增加, >5 mm 和 >0.25 mm 团聚体含量均呈逐渐减少趋势。

经回归分析可知(图4),随海拔的升高土壤团聚体 MWD 和 GMD 均呈先升高后降低的单峰分布模式,在中海拔 E3(1 500—1 800 m)处达到峰值,而土壤团聚体 D 呈“V”字型趋势;在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,MWD,GMD 和 D 均与海拔存在显著相关性,20—40 cm 土层 GMD 与海拔存在显著相关性,其余土层土壤团聚体稳定性指标与海拔梯度不存在显著性相关性。

由图5可知,土壤团聚体 MWD 和 GMD 沿海拔梯度均表现为中海拔($E3 > E2$) $>$ 低海拔($E1$) $>$ 高海拔($E4$)。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,E3 处的 MWD 和 GMD 分别为 5.03,3.64 和 4.79,3.52,显著大于 E1 和 E4($p < 0.05$)。在 20—40 cm,40—60 cm 和 60—80 cm 土层,MWD 为 E3 显著大于 E1 和 E4($p < 0.05$),而 GMD 为 E3 显著大于其余海拔梯度($p < 0.05$)。在所有土层中土壤团聚体 D 均与 MWD 和 GMD 呈相反的变化趋势。随土层深度的增加,土壤团聚体 MWD 和 GMD 逐渐减小,D 逐渐增大,不同土层间存在显著差异($p < 0.05$)。

2.3 土壤团聚体稳定性的影响因子

土壤理化性质是影响土壤团聚体稳定性的重要环境因子,对不同海拔梯度土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质进行冗余分析(RDA)和蒙特卡洛检验(图6)。结果表明,土壤团聚体 MWD 和 GMD 与 SOC,TN,TP,CEC,C:N,C:P 和 Ec 呈极显著正相关性,与 pH 和 Clay 呈极显著负相关性。土壤团聚体 D 与 pH 和 Clay 呈极显著正相关性,与 TP 呈显著负相关性,与其他指标呈极显著负相关性。第一轴和第二轴的累积解释变异量为 80.39%,表明土壤理化性质对团聚体稳定性影响较大。土壤 SOC 和 pH 值为显著解释变量,分别对土壤团聚体稳定性的解释度为 76.3% 和 1.3%,是影响土壤团聚体稳定性的主要环境因子。

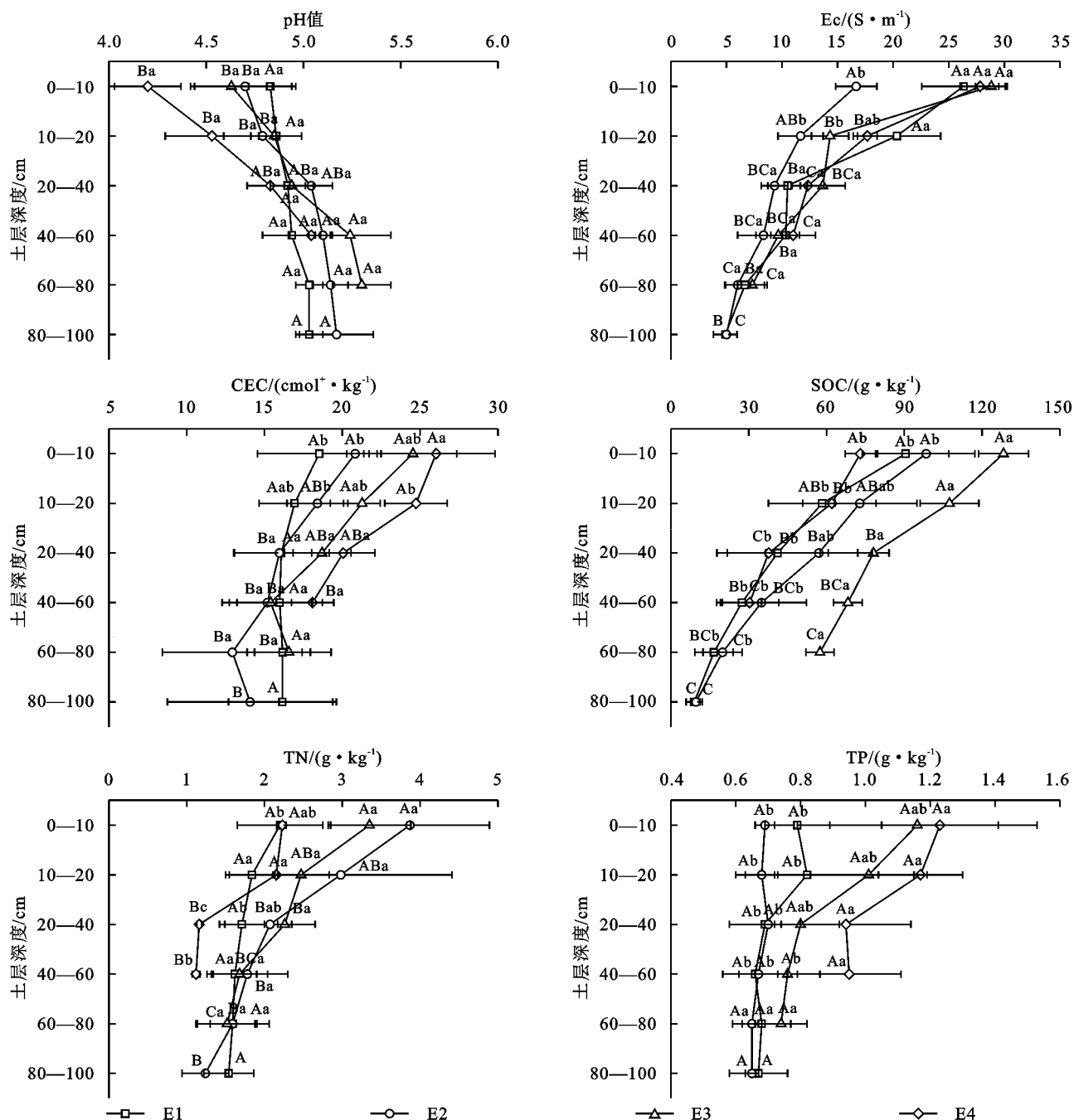
3 讨论

3.1 土壤理化性质沿海拔梯度和土层深度的差异性

在山地森林中,海拔分布特征是土壤地理学的一种模式,主要通过控制水热条件间接影响土壤理化性质^[20]。本研究结果显示,土壤 SOC 和 TN 随着海拔的升高整体呈单峰模式,表现为中海拔大于低海拔和高海拔,该结果与吴梦瑶等^[21]在贺兰山的研究结果不一致。产生这一差异的原因可能有以下两方面:一方面是由于中海拔梯度(E3)这种较低的温度和较高的降水组合加速了岩石的风化,土壤养分积累较多;另一方面,E3(1 500~1 800 m)的森林类型属于常绿落叶阔叶混交林带,地表的凋落物量较多,适合在较低温度的多腐生真菌和细菌分解枯枝落叶物产生更多的土壤养分。钟有萍等^[22]的研究表明,梵净山的降雨随高度的增加,在 1 700 m 左右达到最大值,气温随海拔升高显著降低,进一步证明梵净山中海拔区域(E3)具有较适宜的水热条件,有助于岩石风化和微生物分解枯枝落叶形成更多的土壤养分。本研究发现,在 0—40 cm 土层,土壤 P 随海拔梯度的增加

呈先减小后增加的趋势,这与前人在长白山的研究结果不一致^[23],主要是由于长白山是在高山苔原生态系统中进行,高山苔原生态系统具有特定的植被和环境条件,与本研究的生态系统不同,这可以解释我们

研究的差异。4种海拔梯度下,土壤pH值随土层深度的增加而增大,其余指标呈相反趋势,该结果与李相楹等^[12]的研究结果一致,表明土壤剖面深度的变化能够显著影响土壤理化性质。



注: pH 表示土壤 pH 值; Ec 表示电导率; CEC 表示阳离子交换量; SOC 表示土壤有机碳; TN 表示土壤全氮; TP 表示土壤全磷; 不同小写字母代表同一土层不同海拔间差异显著 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一海拔梯度不同土层间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图2 不同海拔梯度土壤理化性质

Fig. 2 Physical and chemical properties of soil with different elevation gradients

3.2 不同海拔梯度土壤团聚体稳定性分析

土壤团聚体分布及稳定性是决定土壤结构的重要因素,大团聚体数量越多,土壤结构越好。本研究发现梵净山山地森林生态系统各海拔梯度带 > 0.25 mm 水稳性大团聚体平均含量所占比例为 86.78%,其中以 > 5

mm 和 5~2 mm 粒径团聚体为主。这一结果取决于不同海拔梯度森林生态系统中植被物种丰富度、根系、凋落物与有机物分解速率等^[24]。先前的研究表明,森林土壤比其他生态系统的土壤具有更多有机物质输入,有机物质被微生物分解形成有机和无机胶结剂,将小颗粒土

壤和微团聚体结合形成稳定的大团聚体^[25]。然而,本研究 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性大团聚体含量相对高于贺兰山森林土壤(65.73%)^[8]、色季拉山森林土壤(68.64%)^[26]、喀斯特石灰岩森林土壤(51.60%~69.88%)^[27]。MWD 和 GMD 已被广泛用于评价土壤团聚体的稳定性,其数值越大,土壤团聚体稳定性越高^[4]。本研究结果表明,在 0—20 cm 土层,土壤团聚体 MWD 和 GMD 沿海拔梯度的变化呈单峰分布模式,在中海拔 E3(1 500~1 800 m)处达到峰值,且与海拔存在显著相关性,该结果与 Zhu 等^[6]在四川雪宝顶山森林土壤和马寰菲等^[8]在秦岭山脉林区得出的结果不一致,且梵净山土壤

MWD 和 GMD 值均大于以上两个地区森林土壤,出现这种差异可能归因于海拔梯度上植被和微生物的变化。梵净山是中亚热带地区同纬度中分布面积较大且连续、保存较好、原生性较强、生物资源十分丰富的一个的山地森林生态系统^[10]。以往的研究证明,随着海拔的升高,梵净山森林植被的生物量、碳储量、凋落量、净生产量和土壤细菌群落主要分布在中山(1 200~1 800 m)^[11,13],提高了凋落物和根系分泌等有机胶结物质的输入,有利于中海拔土壤团聚体稳定性的形成。总体而言,梵净山森林土壤的结构稳定性优于其他地区森林土壤。

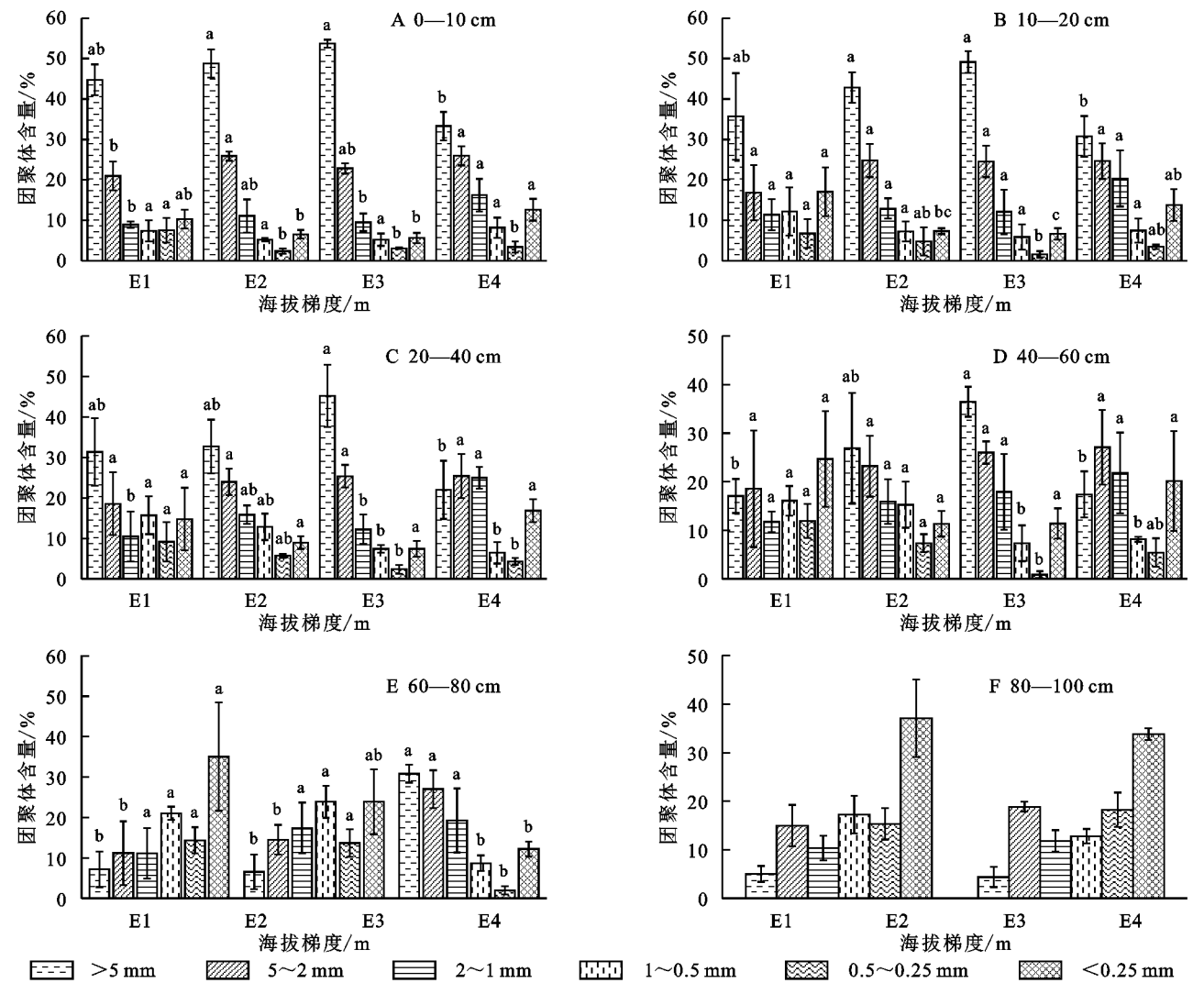


图 3 不同土层深度下土壤团聚体沿海拔梯度的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil aggregates along the elevation gradient at different soil depths

随土层深度的增加, $>5\text{ mm}$ 和 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量均呈逐渐减少趋势;而土壤团聚体 MWD 和 GMD 的变化趋势一致,土壤团聚体 D 的变化趋势相反。随土层深度增加,植物根系和土壤微生物群落组成发生变化,且根系数量及分泌物和微生物活性会随之降低,微生物活性和根系分泌物的降低会弱化矿物和团聚体的结合,降低土壤团聚体稳定性^[28]。

3.3 土壤因子对土壤团聚体稳定性的影响

土壤理化性质影响土壤团聚体稳定性,海拔梯度的变化会造成土壤性质有所差异。本研究结果表明,土壤因子可以解释土壤团聚体稳定性差异的 80.4%,其中土壤 SOC 和 pH 值分别解释了土壤团聚体稳定性的 76.3%和 1.3%,是主要的影响因子。Tisdall 和 Oades 等^[29]提出的等级发育模型很好地阐述了有机

物质在团聚体形成中占主导作用,认为大团聚体是由微团聚体在各类胶结物质的作用下逐级形成的。有机质主要是通过矿物颗粒直接键合有机-矿物相互作用的“胶束”模型(bilayer model)^[30]。

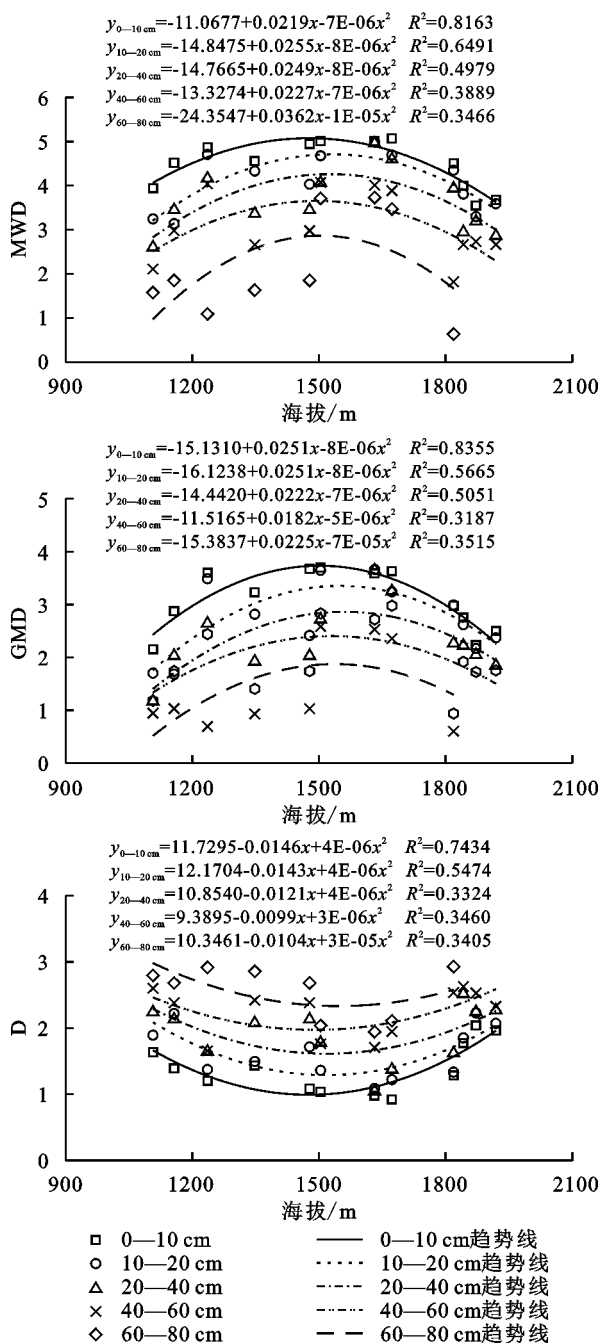


图 4 海拔与土壤团聚体稳定性指数的函数关系

Fig. 4 Functional relationship between elevation and soil aggregate stability index

本研究发现,梵净山土壤 SOC 与土壤水稳性大团聚体含量和稳定性在海拔梯度上表现为一致的变化趋势,这与 Wang 等^[31]的研究结果一致。本研究结果显示,土壤 pH 与土壤团聚体稳定性呈显著负相关关系,这可能主要是 pH 通过改变矿物表面“有机涂层”和胶体颗粒间的结合度影响土壤团聚体稳定性。具体来说,

pH 影响土壤团聚体稳定性的方式主要有以下 3 种方式:(1) pH 会影响胶体物质间的静电斥力,进而影响有机物和矿物颗粒间的胶结程度^[32];(2) pH 会影响 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 阳离子接近零电荷点间接影响土壤颗粒团聚^[33];(3) pH 会影响矿物对腐殖酸的吸附量^[34]。因此,下一步可以深入研究黏土矿物类型和含量以及胶体类型与有机物质间的关系对 pH 的响应,可能会进一步提高对土壤中稳定团聚体组分的预测。

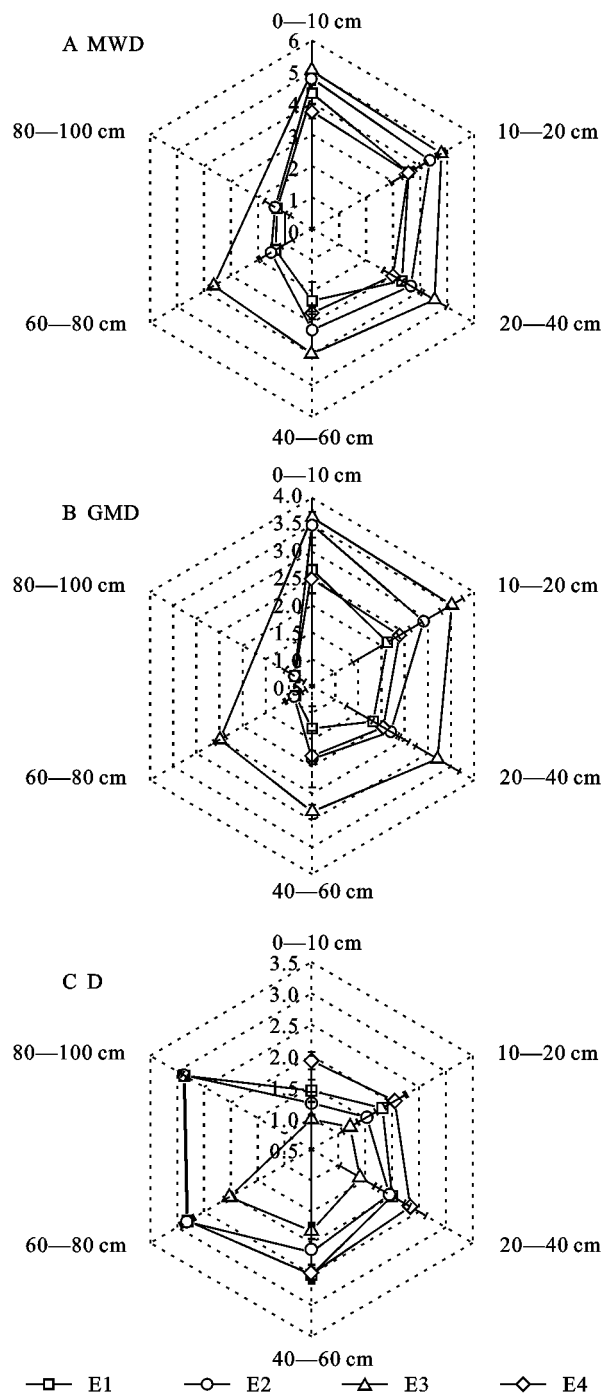


图 5 不同土层深度下土壤团聚体稳定性指数沿海拔梯度的分布

Fig. 5 Distribution of soil aggregate stability index along altitude gradient at different soil depths

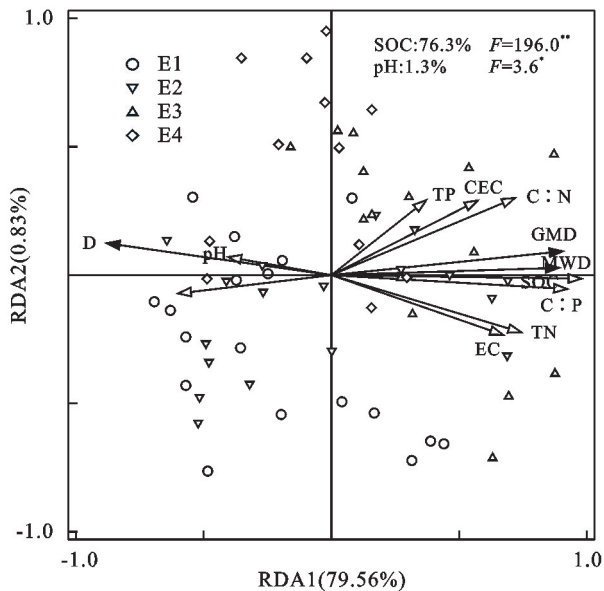


图6 土壤团聚体稳定性指标与理化性质的冗余分析排序

Fig. 6 Redundancy analysis ranking diagram of stability indicators of soil aggregate and physicochemical properties

4 结论

(1) 在0—60 cm土层,土壤团聚体主要以>0.25 mm水稳性大团聚体为主,平均含量为86.78%。其中,在0—20 cm土层各海拔梯度差异显著,且中海拔E3处显著高于E4($p < 0.05$),20—60 cm土层各海拔梯度差异不显著($p > 0.05$),说明海拔梯度主要影响表层土壤大团聚体的分布。

(2) 土壤团聚体稳定性与海拔存在显著相关性,随海拔的升高土壤团聚体MWD和GMD均呈先升高后降低的单峰分布模式,在中海拔E3处达到峰值;在0—20 cm土层,E3的MWD和GMD分别为5.03,3.64和4.79,3.52。总体而言,梵净山森林土壤的结构稳定性优于其他山地森林土壤。

(3) 土壤SOC和pH值对土壤团聚体稳定性的贡献较大,解释度分别为76.3%和1.3%,是影响土壤团聚体稳定性的主要驱动因子。综上所述,土壤团聚体稳定性沿海拔梯度呈单峰分布主要受到土壤化学性质的影响,以上研究结果对梵净山国家级自然保护区以及类似条件区域的生态环境保护发挥重要作用。

参考文献(References):

- [1] 万红云,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔土壤酶活性及其化学计量特征[J].应用生态学报,2021,32(9):3045-3052.
Wan H Y, Chen L, Pang D B, et al. Soil enzyme activities and their stoichiometry at different altitudes in Helan Mountains, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(9):3045-3052.
- [2] Abbas F, Zhu Z L, An S S. Evaluating aggregate stability of soils under different plant species in Ziwuling Mountain area using three renowned methods[J]. Catena, 2021,207:105616.
- [3] Zhu G Y, Shangguan Z P, Deng L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2021,200:105181.
- [4] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates:progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.
- [5] He X J, Hou E Q, Veen G F, et al. Soil microbial biomass increases along elevational gradients in the tropics and subtropics but not elsewhere[J]. Global Ecology and Biogeography, 2020,29(2):345-354.
- [6] Zhu M K, Yang S Q, Ai S H, et al. Artificial soil nutrient, aggregate stability and soil quality index of restored cut slopes along altitude gradient in southwest China[J]. Chemosphere, 2020,246:125687.
- [7] Wu M Y, Pang D, Chen L, et al. Chemical composition of soil organic carbon and aggregate stability along an elevation gradient in Helan Mountains, northwest China[J]. Ecological Indicators, 2021,131:108228.
- [8] 马寰菲,胡汗,李益,等.秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系[J].环境科学,2021,42(9):4510-4519.
Ma H F, Hu H, Li Y, et al. Stability of soil aggregates at different altitudes in Qinling Mountains and its coupling relationship with soil enzyme activities[J]. Environmental Science, 2021,42(9):4510-4519.
- [9] 吕伊娜,熊康宁,容丽,等.梵净山生物生态演化的世界自然遗产价值对比分析[J].世界地理研究,2016,25(5):131-141.
Lv Y N, Xiong K N, Rong L, et al. Comparative analysis of world heritage values on biological and ecological evolution in Fanjingshan Mountain[J]. World Regional Studies, 2016,25(5):131-141.
- [10] 周政贤.梵净山研究[M].贵阳:贵州人民出版社,1990.
Zhou Z X. Study on Fanjingshan[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1990:1-513.
- [11] 熊华,于飞,谷晓平,等.梵净山不同森林植被生物量、净生产量、碳储量及空间分布特征[J].生态环境学报,2021,30(2):264-273.
Xiong H, Yu F, Gu X P, et al. Biomass, net production, carbon storage and spatial distribution features of different forest vegetation in Fanjing Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(2):264-273.
- [12] 李相楹,张维勇,刘峰,等.不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J].水土保持研究,2016,23(3):19-24.
Li X Y, Zhang W Y, Liu F, et al. The distribution characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus at

- different altitudes in Fanjingshan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(3):19-24.
- [13] Xie Y G, Zhang L Y, Wang J C, et al. Spatial heterogeneity of soil bacterial community structure and enzyme activity along an altitude gradient in the Fanjingshan area, northeastern Guizhou Province, China[J]. Life, 2022,12(11):1862.
- [14] 王鹏举,陈浒,周政,等.梵净山常绿落叶阔叶混交林土壤螨类群落结构研究[J].土壤,2018,50(4):687-695.
Wang P J, Chen H, Zhou Z, et al. Soil mite community structure in mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest of Fanjingshan[J]. Soils, 2018,50(4):687-695.
- [15] Luo W M, Liu Y Y, Mu G T, et al. Evolution of soil texture in mid-subtropical forests in the past 32 years: taking Fanjing Mountain in southwest China as an example[J]. Tropical Ecology, 2023,64,671-680.
- [16] 章明奎,毛霞丽,邱志腾,等.梵净山垂直带土壤的发生学特性与系统分类研究[J].土壤通报,2018,49(4):757-766.
Zhang M K, Mao X L, Qiu Z T, et al. Genetic characteristics and taxonomic classification of vertical Soils in the Fanjingshan Mountain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018,49(4):757-766.
- [17] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
StateForestryAdministration. Forestsoilanalysisismethod [M]. Beijing:China Standards Press, 1999.
- [18] 韩贞贵,周运超,任娇娇,等.马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J].生态学报,2021,41(23):9388-9398.
Han Z G, Zhou Y C, Ren J J, et al. Distribution of organic carbon after wet sieving of soil aggregates of various particle sizes in Masson Pine plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9388-9398.
- [19] Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986,91(B2):1921-1926.
- [20] Zhang A L, Li X Y, Wu S X, et al. Spatial pattern of C : N : P stoichiometry characteristics of alpine grassland in the Altunshan Nature Reserve at North Qinghai-Tibet Plateau[J]. Catena, 2021,207,105691.
- [21] 吴梦瑶,陈林,庞丹波,等.贺兰山不同海拔土壤团聚体碳氮磷含量及其化学计量特征变化[J].应用生态学报,2021,32(4):1241-1249.
Wu M Y, Chen L, Pang D B, et al. Changes of the concentrations and stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in soil aggregates along different altitudes of Helan Mountains, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(4):1241-1249.
- [22] 钟有萍,舒国勇,晏理华.梵净山对局地气候的影响分析[J].贵州气象,2011,35(6):25-28.
Zhong Y P, Shu G Y, Yan L H. Analysis of the influence of Fanjing Mountain on local climate[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2011,35(6):25-28.
- [23] Yang X Z, Wei K, Chen Z H, et al. Soil phosphorus composition and phosphatase activities along altitudes of alpine tundra in Changbai Mountains, China[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26:90-98.
- [24] Merino-Martín L, Stokes A, Gweon H S, et al. Interacting effects of land use type, soil microbes and plant traits on aggregate stability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020,154:108072.
- [25] Novara A, Gristina L, Mantia L T, et al. Carbon dynamics of soil organic matter in bulk soil and aggregate fraction during secondary succession in a Mediterranean environment[J]. Geoderma, 2013,193,213-221.
- [26] 丁慧慧,陈文盛,李江荣.季节性冻融对色季拉森林土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2023,30(1):120-127.
Dian H H, Chen W S, Li J R. Effect of seasonal Freeze-Thaw on the stability of soil aggregates in the forest of Sergyemla Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):120-127.
- [27] Wang J Y, Wei H, Huang J, et al. Soil aggregate stability and its response to overland runoff-sediment transport in karst peak-cluster depressions[J]. Journal of Hydrology, 2023,620:129437.
- [28] Pan J X, Shi J W, Tian D S, et al. Depth-dependent drivers of soil aggregate carbon across Tibetan alpine grasslands[J]. Science of the Total Environment, 2023,867:161428.
- [29] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.
- [30] Wershaw R L, Llaguno E C, Leenheer J A. Mechanism of formation of humus coatings on mineral surfaces 3. Composition of adsorbed organic acids from compost leachate on alumina by solid-state ^{13}C NMR[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects, 1996,108(2/3):213-223.
- [31] Wang J Y, Deng Y S, Li D Y, et al. Soil aggregate stability and its response to overland flow in successive Eucalyptus plantations in subtropical China[J]. Science of the Total Environment, 2022,807:151000.
- [32] Nguetnkam J P, Dultz S. Soil degradation in Central North Cameroon: Water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons[J]. Soil and Tillage Research, 2011,113(1):38-47.
- [33] Kosmulski M. pH-dependent surface charging and points of zero charge: III. Update[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006,298(2):730-741.
- [34] Weng L P, van Riemsdijk W H, Hiemstra T. Humic nanoparticles at the oxide-water interface: Interactions with phosphate ion adsorption[J]. Environmental Science & Technology, 2008,42(23):8747-8752.