

侵蚀强度对淮北土石山区土壤团聚体组成及稳定性的影响

李肖¹, 陈晨¹, 林杰¹, 朱茜¹, 董波¹, 丁鸣鸣²

(1. 南京林业大学, 江苏省南方现代林业协同创新中心,
江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037; 2. 南京水务局, 南京 210036)

摘要:为更好地揭示土壤侵蚀与土壤团聚体之间的关系,选取大吴山小流域为研究区,以 4 种土地利用下的土壤团聚体为研究对象,分析了不同侵蚀强度下各土地利用方式土壤团聚体的粒径组成及稳定性特征。结果表明:(1) 研究区土壤团聚体主要以大团聚体(>0.25 mm)为主,其比例均 $>70\%$,与同类报道相比偏低,说明该区土壤流失严重,水土保持工作需进一步开展。(2) 随侵蚀强度增加, >2 mm 团聚体含量有降低的趋势, <0.106 mm 则刚好相反, $0.5\sim 0.25$ mm 和 $1\sim 0.5$ mm 团聚体含量明显变化,说明侵蚀过程倾向于破坏大团聚体,增加微团聚体百分含量,其中 0.5 mm 对侵蚀强度转变响应敏感。(3) 土壤团聚体稳定性指标 $R_{0.25}$, MWD 与侵蚀强度呈负相关, D 值呈正相关,且严重侵蚀条件下,MWD 和 $R_{0.25}$ 均为最小值, D 值达到最大,说明严重侵蚀会降低土壤团聚体稳定性。(4) 同种侵蚀强度下,相较于其他 3 种土地利用方式,林地的 $R_{0.25}$ 和 MWD 值较高, D 值较小,说明林地结构较好,有利于团聚体的积累,稳定性高。

关键词:土壤侵蚀; 土壤团聚体; 侵蚀强度; 稳定性

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0056-06

Effect of Erosion Intensity on Composition and Stability of Soil Aggregates in Rocky Mountain Area of Huaibei

LI Xiao¹, CHEN Chen¹, LIN Jie¹, ZHU Xi¹, DONG Bo¹, DING Mingming²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China; 2. Nanjing Water Conservancy Bureau, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to better reveal the relationship between soil erosion and soil aggregate, this paper selects the small watershed of Dawushan as the study area, and takes the soil aggregate under four types of land use as the study object. The particle size composition and stability characteristics of soil aggregates in different land use patterns under different erosion intensities were analyzed. The results showed that: (1) the main soil aggregates in the study area were macroaggregates (>0.25 mm), the proportion of which was more than 70% , which was lower than that of the similar reports, which indicated that the soil loss was serious in the study area. Soil and water conservation work needs to be further carried out. (2) with the increase of erosion intensity, >2 mm aggregate content decreased, <0.106 mm was just the opposite, $0.5\sim 0.25$ mm and $1\sim 0.5$ mm aggregate contents changed obviously. The results showed that the erosion process tended to destroy macroaggregates and increase the percentage content of microaggregates, and 0.5 mm was sensitive to erosion intensity transition. (3) the soil aggregate stability index $R_{0.25}$ and MWD are negatively correlated with the erosion intensity, and the D value is positively correlated. Under severe erosion conditions, both MWD and $R_{0.25}$ are minimum, and the D value is maximum, indicating that severe erosion will reduce the stability

of soil aggregates. (4) under the same erosion intensity, compared with the other three types of land use, the values of $R_{0.25}$ and MWD were higher and D values were smaller, which indicated that the structure of woodland was better, which was beneficial to the accumulation of aggregates and had high stability.

Keywords: soil erosion; soil aggregates; erosion intensity; stability

土壤团聚体是土壤结构的基本组成部分,一定程度上影响着土壤的各种理化性质,进而影响土壤肥力和土壤抗蚀性^[1]。土壤侵蚀与土壤团聚体密切相关^[2-3]。一方面,土壤团聚体通过有机物质或铁铝氧化物相互胶结,微团聚体黏合成大团聚体,形成稳定的空间结构抵抗降雨的剥蚀和径流的冲刷^[4-5]。许多学者认为通过提高水稳性团聚体的百分含量以及水稳性可以提高土壤抗侵蚀能力^[6-7]。另一方面,土壤侵蚀的强度和类型在一定程度上影响着大团聚体的数量组成与稳定,土壤团聚体的破坏以及解体会加剧土壤侵蚀过程^[8]。众多研究^[9-11]结果都表明土壤结构性的问题例如土壤硬化板结、低孔隙率、低入渗率甚至沟蚀、片蚀等水土侵蚀现象等都与土壤团聚体的稳定性下降具有一定的相关性。此外,团聚体粒径组成可作为衡量土壤可蚀性指标^[12],团聚体稳定性影响着土壤的入渗、结皮、产沙等土壤侵蚀的各个过程^[13-14]。因此,通过对不同侵蚀强度下土壤团聚体的粒径组成及稳定性研究,对了解土壤侵蚀与团聚体之间的相互关系有重要意义,同时为水土流失防治提供理论依据。

近年来,国内外关于土壤侵蚀强度对团聚体稳定性的研究有很多,主要集中在不同侵蚀方式^[15-16]、不同地形因子^[17-18]以及不同降雨强度^[19-20]对团聚体组成及稳定的影响。李桂芳等^[21]研究指出降雨强度、坡度和坡长三因子交互作用对坡面侵蚀量影响最大;姜义亮等^[22]通过研究不同侵蚀方式对团聚体流失的影响证明两种降雨强度下片蚀试验流失的团聚体小于沟蚀试验;曾全超等^[23]应用 Le Bissonnais 法模拟 3 种雨强(暴雨、小雨、扰动)对团聚体的破坏表明 FW 处理(暴雨)对团聚体结构的破坏程度最大,处理后土壤团聚体主要以 <0.2 mm 为主。但此类研究大多基于室内模拟降雨试验,不利于反映野外真值,而且研究区域多集中于黄土高原区或东北黑土区,关于淮北土石山区的研究还鲜见报道^[24-26]。作为我国水土流失重点治理区,近年来,随着人为干扰强度加大,复杂的地形以及瘠薄的土层更加剧了水土流失,土壤侵蚀严重制约着该区的经济发展^[27]。因此,本文选取淮北土石山区典型低山漫岗地——赣榆区大吴山小流域为研究区,结合定量侵蚀数据研究不同侵蚀强度各土地利用方式下土壤团聚体粒径组成及稳

定性特征,以期为淮北土石山区水土流失防治及合理调整土地利用结构提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设在江苏省连云港市赣榆区大吴山小流域内,赣榆区位于江苏省东北部,地理坐标为 $34^{\circ}41'—35^{\circ}07'N, 118^{\circ}45'—119^{\circ}18'E$ 。研究区属于低山丘陵区,地形起伏度大,坡度介于 $5^{\circ}—20^{\circ}$ 。气候类型属于暖温带海洋性季风气候,年降雨量 976.4 mm,主要集中在夏季,多以暴雨出现。试验区的土壤主要包括棕壤、黑土、潮土、盐土 4 个大种,并存在 9 个亚类。土壤侵蚀以水蚀为主,轻度侵蚀面积占全区的 10.17%,小流域年平均土壤侵蚀模数为 859.2 t/($km^2 \cdot a$)。

1.2 资料收集

通过查阅文献及历史资料,得到该区土壤侵蚀分级图,并以此为基础,利用 ArcGIS 空间插值方法获取样点分布图,由于本试验样点较少,为增加研究的科学性和合理性,以侵蚀模数大小为分级依据,将国标中 6 个侵蚀等级合并为轻度($A < 2500$)、中度($2500 \leq A \leq 5000$)、严重($A > 5000$) 3 个侵蚀等级, A 代表土壤侵蚀模数,单位 t/($km^2 \cdot a$)。

1.3 试验设计

2017 年 7 月,在研究区内以 500 m \times 500 m 的网格布设采样点,按不同土地利用类型(林地、草地、耕地、园地)进行土壤样品采集,研究小流域内土壤团聚体的组成及稳定性。土壤样品采集时以网格的交点为中心,按 S 形取样,在半径 20 m 范围随机采集 3~5 个土壤样品(0—20 cm 土层),将其等量均匀混合作为一个土壤样品。用自封袋采集土壤样品,共采集土壤样品 40 个(其中轻度侵蚀 16 个、中度侵蚀 12 个、严重侵蚀 12 个),为避免挤压,用铝盒重新转移,并在每个样点用 100 cm^3 环刀采集原状土,用 GPSmap76 记录下网格交点位置,样地情况见表 1。将样品带回实验室内,自然风干,磨碎,过 2 mm 及 0.25 mm 筛后备用。

1.4 指标计算

本试验采取湿筛法^[28]测定团聚体粒级分布,其中粒级分级为: $>2, 2\sim1, 1\sim0.5, 0.5\sim0.25, 0.25\sim0.106, <0.106$ mm 共 6 个粒级团聚体。

土壤团聚体平均重量直径 MWD 计算公式^[29]为:

$$MWD = \sum_i^n X_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中: X_i 为土壤各粒径的平均直径(mm); W_i 为土壤各粒径的质量百分比(%)。

分形维数的计算公式采用杨培岭等^[30]的土壤颗

粒分形模型:

$$D = 3 - \frac{\lg[\omega(\delta < d_i) / \omega_0]}{\lg(d_i / d_{\max})} \quad (2)$$

式中: d_{\max} 为最大粒级土粒的平均直径; $\omega(\delta < d_i)$ 是土粒直径小于 d_i 累积的重量; ω_0 是全部粒级土粒重量之和。

表 1 样地概况

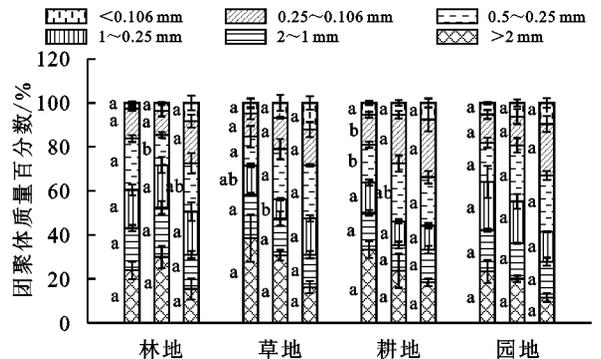
土地利用方式	侵蚀强度	主要树种、植物	海拔/m	坡度/(°)	起源	退耕年限/a
林地	轻度	杨树、马尾松和短柄枹树等	68~300	5~15	人工	25
	中度					
	严重					
草地	轻度	狗尾草等	120~160	6~11	天然	25
	中度					
	严重					
耕地	轻度	水稻、花生等	70~100	10~15	人工	14
	中度					
	严重					
园地	轻度	苹果、板栗等	90~125	10~15	人工	10
	中度					
	严重					

2 结果与分析

2.1 团聚体分布特征

有研究^[31-32]表明粒径分布是影响土壤孔隙特征、形态结构及团聚体稳定性的重要因素,湿筛法获得的团聚体各粒级百分含量见图 1。从图中可以看出研究区土壤团聚体主要以大团聚体(>0.25 mm)为主,其中 >2 mm 团聚体百分含量与侵蚀强度呈负相关关系, <0.106 mm 则刚好相反,说明侵蚀过程倾向于破坏大团聚体,增加微团聚体(<0.25 mm)百分含量。陈佩岩等^[33]研究也指出土壤中粒径较小的团聚体由于有机质含量较少,相比于大团聚体受外界影响较小,较大团聚体更易受外界条件影响而破碎。3 种侵蚀强度下, >0.25 mm 粒级大团聚体比例均 $>70\%$,这与同类研究相比偏低,主要是由于土壤侵蚀对表层土扰动最为明显,而淮北土石山区多以低山漫岗地为主,土层较薄,径流的冲刷会带走大部分的土壤细粒,造成团聚体的流失。该结果表明,研究区土壤流失严重,水土流失治理需进一步加强。1~0.106 mm 粒级团聚体受侵蚀强度影响显著($p < 0.05$),草地、耕地和园地均表现为轻度 $<$ 中度 $<$ 严重。林地条件下,轻度转为中度侵蚀条件下,0.5~0.25 mm 团聚体百分含量降幅达 50%。草地 1~0.5 mm 团聚体百分含量随侵蚀强度的增加呈现先降低后增加

的趋势,且差异显著($p < 0.05$)。耕地条件下,0.5~0.25 mm 粒级百分含量在中度侵蚀下表现最高,约为 26.32%。3 种侵蚀强度下,各土地利用方式 0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm 团聚体含量明显变化,0.5 mm 粒级团聚体对侵蚀强度转变响应敏感;严重侵蚀条件下,土壤各级团聚体含量之间已经趋于平衡,微团聚体(<0.25 mm)百分含量普遍上升,其中耕地(33.78%)最高,园地(33.03%)和草地(28.43%)次之,林地(27.48%)最低。



注:不同小写字母表示同种土地利用方式不同侵蚀强度间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 土壤团聚体各粒级百分含量

2.2 团聚体稳定性特征

2.2.1 大团聚体含量 >0.25 mm 团聚体被认为是土壤中最好的结构体^[34], $R_{0.25}$ 值越大表示土壤主要是由大团聚体组成,土壤结构较好,稳定性越强。

如图 2A 所示,轻度侵蚀条件下,各土地利用方式八成以上为大团聚体,表明水蚀过程初期作物覆盖能够有效减少地表径流,减少土壤大团聚体的损失。相比于轻度侵蚀,中度侵蚀下草地,园地和耕地的大团聚体百分含量值略有下降,但不显著($p < 0.05$)。严重侵蚀条件下,各土地利用方式之间的大团聚体都有不同程度的降低,但各土地利用方式 $R_{0.25}$ 值表现为:林地 > 草地 > 园地 > 耕地,说明林地受侵蚀强度影响较小,有利于大团聚体的积累。

2.2.2 平均质量直径 土壤团聚体直径分析通常采用平均质量直径(MWD),其值越高,土壤粒径团聚度越高,土壤越稳定。从图 2B 可以看出,团聚体平均质量直径整体上随侵蚀强度增加而降低。林地条件下,MWD 表现为中度 > 轻度 > 严重,其他 3 种土地利用方式均表现为严重 < 中度 < 轻度,这主要是由于轻度侵蚀的林地样本大部分都位于沉积点,导致微团聚体的含量普遍较高,导致 MWD 值偏低;草地与林地的平均质量直径相比于耕地和园地偏高,但差异不显著($p > 0.05$),且随侵蚀强度 MWD 值均匀降低;耕地和园地的粒径分布相近,轻度侵蚀与严重侵蚀条件下的 MWD 值差异显著($p < 0.05$),其中严重侵蚀园地的平均质量直径最小,约为 0.72 mm。

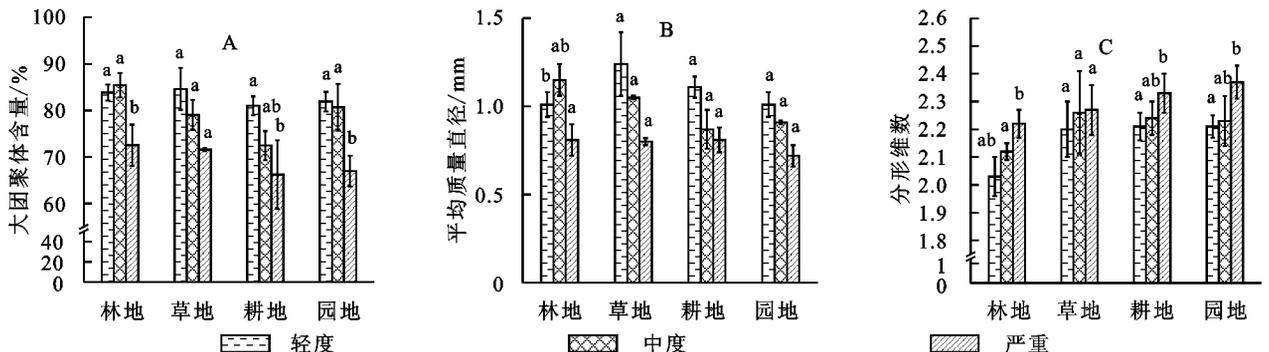
2.2.3 分形维数 土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,其值越小,土壤颗粒分布越均匀且结构越好。本文在获得 $\lg[\omega(< d_i)/\omega_0]$ 和 $\lg(d_i/d_{\max})$ 的基础上,通过回归分析计算得到不同侵蚀强度下团聚体的分形维数 D 值(图 2C)。从侵蚀强度来看,林地 D 值表现为轻度(2.03) < 中度(2.12) < 严重(2.22),且差异显著。除林地外,其他 3 种土地利用方式分形维数与侵蚀强度呈正相关关系,但差异不显著($p > 0.05$)。因土壤分形维数拓扑值^[35]为 2,同种侵蚀强度下,相较于其他土地利用方式,林地的分形维数都是最低的,表明林地颗粒分布较为均匀,

稳定性高。

综上所述,随着侵蚀强度的增加,土壤团聚体 $R_{0.25}$, MWD 呈现下降的趋势, D 值则表现为上升的趋势。严重侵蚀条件下,MWD 和 $R_{0.25}$ 均为最小值, D 值达到最大,说明剧烈的侵蚀破坏土壤内部团聚结构,对团聚体搬运选择性降低,从而降低土壤团聚体稳定性。而同种侵蚀强度下,林地的 $R_{0.25}$ 和 MWD 值较高, D 值较小,说明 4 种土地利用方式下,林地的结构较优,有利于团聚体的形成与积累。

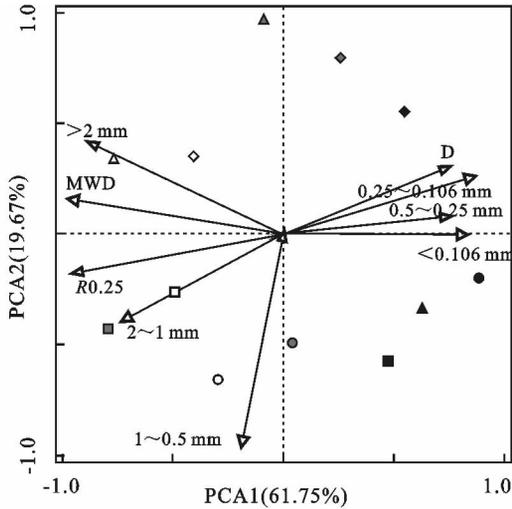
2.3 侵蚀强度对土壤团聚体稳定的影响

为更好地揭示侵蚀强度对土壤团聚体稳定性的组成及稳定性的影响,本文采用主成分分析(PCA)方法,轴一和轴二的解释量分别为 61.75% 和 19.67%。由图 3 所示,轻度侵蚀和严重侵蚀之间的差异主要体现在轴一上,中度侵蚀无显著规律。轻度侵蚀条件下,林地和园地分布在第三象限,耕地和草地分布在第二象限,两组土地利用类型之间的差异主要体现在轴二上,差异性指标主要包括 $R_{0.25}$, MWD 和 1~0.5, 2~1, >2 mm 的团聚体;严重侵蚀条件下,4 种土地利用方式的微团聚体百分含量都有不同程度的增加,但草地和耕地上升幅度要明显高于林地和园地,从土地利用来看,林地和园地受侵蚀强度的影响不如耕地和草地,其土壤结构较好。差异性指标主要体现在分形维数与 <0.106, 0.25~0.106, 0.5~0.25 mm 团聚体,其中分形维数与微团聚体呈明显正相关关系,微团聚体百分含量越高,分形维数 D 值越大,土壤颗粒分布不均匀,土壤团聚体稳定性差。此外,从团聚体粒径来看,>0.5 mm 粒级主要分布在第二、三象限,<0.5 mm 分布在第一、四象限,0.5 mm 成为侵蚀强度影响团聚体转化的关键临界点。总的来说,侵蚀强度对团聚体影响主要体现在严重侵蚀条件,林地相较于其他 3 种土地利用能降低土壤侵蚀对团聚体的影响。



注:不同小写字母表示同种土地利用方式不同侵蚀强度间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 土壤团聚体稳定性



注:白色、灰色和黑色代表轻度、中度和严重侵蚀,正方形、三角形、菱形、圆形代表林地、草地、耕地和园地。

图 3 土壤团聚体指标主成分分析

3 讨论

前人研究^[36]表明,水蚀过程往往会造成土壤团聚体的分散和土壤表层土的损失。本文中侵蚀强度对中间团聚体(1~0.106 mm)影响显著($p < 0.05$),这与同类研究结果一致^[16],但 > 2 mm 和 < 0.106 mm 粒级受侵蚀影响不显著($p > 0.05$),造成这种现象的原因可能是整个产流过程,流失的团聚体基本以细粒为主,流失量大,温磊磊等^[37]通过野外原位模拟降雨试验指出在 30 mm/h 降雨强度下, < 0.25 mm 团聚体流失量占团聚体总流失量的 90.0%;而大团聚体的迁移取决于复杂的动力学因素,只有当侵蚀强度到达临界值时, > 2 mm 团聚体才发生迁移。土壤侵蚀与土壤团聚体关系密切,本文采用 PCA 分析发现 0.5 mm 粒级团聚体对侵蚀强度变化响应最为敏感。冯强等^[38]研究指出 0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm 团聚体含量与径流深及侵蚀模数呈负相关,但不显著($p > 0.05$),与本文结论稍有出入。这主要是由于本文研究区的多年平均降雨量远高于黄土高原地区,即使是轻度侵蚀条件下,径流优先搬运雨滴所分散的表层细粒,但由于淮北土石山区土层较薄,随着降雨过程的进行,土壤表层可搬运的松散物质来源减少,稍大粒径的团聚体(1~0.25 mm)开始破碎;而当侵蚀强度转变为中度侵蚀时,雨滴的动能和径流的剪切力增大,对大团聚体的拆分和搬运能力增强,此时松散物质的来源不仅来自雨滴分散的土壤表层微团聚体,还有部分来自破碎崩解尚不完全的大团聚体,0.5 mm 粒级成为大团聚体向微团聚体过渡的中间粒级,所以对侵蚀强度的转变响应明显,可作为反映侵蚀强度变化敏感性的指标。另一方面,本文轻度与中度侵蚀之间的划分标准

为 2 500 t/(km²·a),侵蚀阈值相比于同类研究^[39]属较高水平,降雨初期的降雨动能和径流能量足以使 0.25~1 mm 粒级的团聚体发生破碎和迁移。

从图 1 和图 2 中可以看出,严重侵蚀下,团聚体的各粒级百分含量相对接近,团聚体 MWD 和 $R_{0.25}$ 值较低, D 值较高,说明严重侵蚀破坏了土壤团聚体的结构,降低了稳定性。这主要和侵蚀发生的形式有关,轻度侵蚀和中度侵蚀条件下,土壤侵蚀形式多以面蚀为主(雨滴击溅、片蚀、细沟侵蚀),薄层水流冲刷土壤表层,土壤细小颗粒发生迁移;而严重侵蚀条件下,降雨多为短而急的暴雨,面蚀进一步发展为沟蚀,即随侵蚀强度的增加,细沟侵蚀逐渐发展,水流流速也随之增加,此时侵蚀沟内的水深远大于雨滴直径,雨滴溅蚀作用减弱,泥沙裹挟的大粒径的团聚体含量明显增加,与此同时沟头下切和沟岸坍塌产生大量破碎不完全的大粒级团聚体,沟头跌水此时整体运移土壤团聚体,而经严重侵蚀后原位的团聚体多为质地粗糙或崩解不完全的大颗粒组成,土壤养分或内部胶结物质随细粒流失严重,加之该区土壤多属褐土和棕色森林土类,粗骨性比较突出,团聚体稳定性显著降低。姜义亮等^[22]通过研究片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响也得出类似的结论,更指出 MWD 指标能较好地反映雨强变化下土壤团聚体的流失特征。在同种侵蚀强度下,林地的平均质量直径和大团聚体百分含量均较高,分形维数接近 2,说明林地土壤结构较好,有利于大团聚体的积累,稳定性高。众多研究^[40-42]表明,天然林或人工林的团聚体平均质量直径是大于人为干扰的农耕地,这与本文的结论一致。而在轻度侵蚀条件下,MWD 的值草地 $>$ 林地,这主要是因为天然草地植被覆盖度高,水分入渗能力强,降低了径流对团聚体的冲刷,团聚度较高。单因素分析表明园地团聚体组成对侵蚀强度的响应并不显著($p > 0.05$),造成这种现象的原因是园地栽植经济树种,人为投入较好地弥补了侵蚀强度对土壤团聚体的影响。

4 结论

(1) 研究区土壤团聚体主要以大团聚体(> 0.25 mm)为主,其比例均 $> 70\%$,与同类研究比偏低,说明研究区土壤流失严重,水土流失治理需进一步加强。

(2) 随侵蚀强度增加, > 2 mm 团聚体含量有降低的趋势, < 0.106 mm 则刚好相反,0.5~0.25 mm 和 1~0.5 mm 团聚体含量明显变化。说明侵蚀过程倾向于破坏大团聚体,增加微团聚体百分含量,其中 0.5 mm 对侵蚀强度转变响应敏感。

(3) 土壤团聚体稳定性指标 $R_{0.25}$,MWD 与侵蚀

强度呈负相关, D 值呈正相关,且严重侵蚀条件下, MWD 和 $R_{0.25}$ 均为最小值, D 值达到最大,说明严重侵蚀会降低土壤团聚体稳定性。

(4) 同种侵蚀强度下,相较于其他3种土地利用方式,林地的 $R_{0.25}$ 和 MWD 值较高, D 值较小,说明林地土壤结构较好,有利于大团聚体的积累,稳定性高。

参考文献:

- [1] 赵友朋,孟苗婧,张金池,等.不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系[J].水土保持通报,2018,38(4):75-81,86.
- [2] 王小云.土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(23):106-108.
- [3] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.
- [4] Kai U T, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2017,181(1):104-136.
- [5] Ebrahimi A, Or D. Microbial community dynamics in soil aggregates shape biogeochemical gas fluxes from soil profiles-upscaling an aggregate biophysical model[J]. Global Change Biology, 2016,22(9):3141-3156.
- [6] 王润泽,湛芸,李铁,等.紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [7] 陈山.不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [8] 卢嘉.东北黑土区坡耕地土壤团聚体迁移和养分流失的影响因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [9] 杨帆,张洪江,程金花,等.华北土石山区坡面溅蚀和片蚀泥沙颗粒特征研究[J].水土保持学报,2016,30(3):71-77,243.
- [10] 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.
- [11] 丁海晶,姜姜,张金池.土壤渗透性的区域变化规律及因子分析[J].水土保持学报,2019,33(01):51-56.
- [12] 徐灿.基于分形维的土壤团聚体稳定性评价及其与可蚀性的关系[D].武汉:长江科学院,2015.
- [13] 高鑫宇,曾献奎,吴吉春,等.兰州窦家山典型坡面土壤水分、有机质含量及抗蚀性相关关系研究[J].南京大学学报:自然科学,2018,54(1):185-195.
- [14] 胡波,王玉杰,王彬,等.自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究[J].农业机械学报,2017,48(6):225-231.
- [15] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [16] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].水土保持学报,2008,22(6):176-179.
- [17] 安娟,卢嘉,郑粉莉,等.不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J].水土保持学报,2011,25(6):100-104.
- [18] Fei Q, Ronghua Z, Xia L, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184:45-51.
- [19] 申艳,张晓平,梁爱珍,等.黑土坡耕地土壤流失形态分析:以一次降雨为例[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):224-229.
- [20] 刘娇.降雨侵蚀对土壤团聚体稳定性及碳氮矿化的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [21] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].陕西杨凌:教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [22] 姜义亮,郑粉莉,王彬,等.东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响[J].生态学报,2013,33(24):7774-7781.
- [23] 曾全超,董扬红,李鑫,等.基于Le Bissonnais法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1093-1101.
- [24] 张孝存,郑粉莉.基于Le Bissonnais法的东北黑土区土壤团聚体稳定性研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2009,37(5):82-86.
- [25] 李鑫,马瑞萍,安韶山,等.黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J].应用生态学报,2015,26(8):2282-2290.
- [26] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].生态学报,2016,36(8):2264-2273.
- [27] 唐鹏.淮北土石山区低山漫岗土壤可蚀性研究及应用[D].南京:南京林业大学,2017.
- [28] 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.
- [29] 周娅,陈宇轩,邹瑞,等.北京八达岭不同密度油松土壤团聚体特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(2):25-30.
- [30] 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(20):1896-1899.
- [31] 程曼,朱秋莲,刘雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报,2013,33(9):2835-2844.
- [32] 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.
- [33] 陈佩岩,马岚,薛孟君,等.华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):64-71.

3 结论

研究结果表明在不同土地利用类型下土壤全氮分布规律为:林地>果园>荒草地>农田>废弃果园;硝态氮分布规律为:果园>农田>林地>废弃果园>荒草地;铵态氮分布规律为:林地>荒草地>果园>农田>废弃果园。不同地貌单元下土壤全氮分布规律为:塬面>沟道>塬坡;硝态氮分布规律为:塬面>塬坡>沟道;铵态氮分布规律为:沟道>塬面>塬坡。同时研究发现地貌单元和土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布的影响是显著的,对铵态氮空间分布没有显著的影响,且相比于地貌单元,土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布的影响更为显著,因此,在研究黄土高原地貌单元和土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布影响时,应着重考虑土地利用方式对其分布的影响。上述研究结果可用于指导黄土高原沟壑区小流域土壤施肥管理和估算黄土高原更大尺度氮空间分布提供依据。

参考文献:

- [1] 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境,2003,12(3):371-375.
- [2] 李龙,姚云峰,秦富仓,等. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [3] 吴德勇,张新,李启权,等. 德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业现代化研究,2014,35(6):814-820.
- [4] Hirobe M, Tokuchi N, Iwatsubo G. Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation[J]. European Journal of Soil Biology, 1998,34(3):123-131.
- [5] 訾伟,王小利,段建军等. 喀斯特小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 山地农业生物学报,2013,32(3):218-223.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [7] 王磊,李艳红,袁婕. 全自动凯氏定氮仪测定干旱区土壤中全氮含量[J]. 中国无机分析化学,2014,4(3):31-34.
- [8] 周玉龙,贾富国,付倩,等. 贮藏条件对糙米水分变化的影响规律[J]. 农业工程学报,2011,27(7):383-386.
- [9] 胡江玲,张高. 新疆精河流域土壤质量空间分异规律分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6):113-121.
- [10] 张春霞,郝明德,王旭刚,等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. 水土保持研究,2003,10(1):78-80.
- [11] 杨玥,同延安,路永莉,等. 陕西省苹果园土壤肥力与施肥现状评估[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(5):166-179.
- [12] 刘合满,曹丽花,曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征[J]. 生态学报,2016,36(1):127-133.
- [13] 张学龙,赵维俊,车宗玺,祁连山青海云杉林土壤氮的含量特征[J]. 土壤,2013,45(4):616-622.
- [14] 廖圣祥,任运涛,袁晓波,等. 围封对黄土高原草地土壤铵态氮和硝态氮的影响[J]. 草业科学,2016,33(6):1044-1053.
- [15] 团聚力指标与土壤侵蚀关系[J]. 山西农业科学,2016,44(7):965-971.
- [16] 邹丛荣. 沂蒙山区沂源县土壤可蚀性因子(K)研究[D]. 南京:南京林业大学,2017.
- [17] 杨建国,安韶山,郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. 水土保持学报,2006(1):72-75,98.
- [18] 朱秋莲,程曼,安韶山,等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):247-251,257.
- [19] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.

(上接第61页)

- [34] Haynes R J, Swift R S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 41(1): 73-83.
- [35] 蔺芳,邢晶鑫,任思敏,等. 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):183-189,196.
- [36] 何超,王磊,郑粉莉,等. 垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):24-28.
- [37] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. 土壤学报,2015,52(3):489-498.
- [38] 冯强,张骁,段宝玲. 基于湿筛法与水滴冲击法的土壤