裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能

杨振奇[1,2]，郭建英[1,2]，秦富仓[3]，刘铁军[1,2]，刘艳萍[1,2]，邢恩德[1,2]

（1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓荒漠草原生态水文野外科学观测研究站 北京 100038；
2.水利部 牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020；3.内蒙古农业大学沙漠治理学院，呼和浩特 010019）

摘　要：[目的] 研究裸露砒砂岩区鲍家沟小流域不同植被类型土壤团聚体特征与可蚀性，为植被建设和减轻入黄泥沙提供科学指导。[方法] 运用 Le Bissonnais 法和崩解法研究裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性特征与可蚀性。[结果] ①慢速湿润处理条件下，土壤结构中以 2 mm 以上的团聚为主，预湿扰动处理条件下，2 mm 以上的团聚体占 14.79%～40.17%，快速湿润处理条件下 2 mm 以上团聚体含量占 4.69%～15.11%。②土壤团聚体的破坏率呈现：裸地＞草地＞油松林＞山杏林＞柠条林＞沙棘林的趋势。③裸露砒砂岩区土壤的可蚀性 K 值在 0.045～0.092 之间，各植被类型土壤的崩解速率在 0.48～1.38 g/min 之间。[结论] 沙棘等人工植被能够显著增强土壤团聚体结构的稳定性，降低土壤的可蚀性，提升土壤的抗蚀性能，从而有效削减侵蚀产沙过程。

关键词：裸露砒砂岩区；Le Bissonnais 法；土壤团聚体；土壤抗蚀性能

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2021)03-0008-07　　**中图分类号**：S718，S157

文献参数：杨振奇，郭建英，秦富仓，等.裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报，2021，41(3)：8-14.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.002；Yang Zhenqi，Guo Jianying，Qin Fucang，et al. Soil aggregate stability and erodibility in different vegetation types of exposed feldspathic sandstone region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(3)：8-14.

Soil Aggregate Stability and Erodibility in Different Vegetation Types of Exposed Feldspathic Sandstone Region

Yang Zhenqi[1,2]，Guo Jianying[1,2]，Qin Fucang[3]，Liu Tiejun[1,2]，Liu Yanping[1,2]，Xing Ende[1,2]

（1.*Yinshanbeilu National Field Research Station of Desert Steppe Eco-hydrological System，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing* 100038，*China*；2.*Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China，Hohhot，Inner Mongolia* 010020，*China*；3.*Desert Science and Engineering College，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia* 010018，*China*）

Abstract：[Objective] The soil aggregate stability and soil erodibility in different vegetation types of exposed feldspathic sandstone regions in the Baojiagou watershed were studied in order to provide scientific guidance for vegetation construction and reducing coarse sand into the Yellow River. [Methods] Soil aggregate stability and soil erodibility in different vegetation types were evaluated by using the Le Bissonnais method. [Results] ① Under the conditions of the slow-wetting treatment，soil structure was dominated by 2 mm and larger aggregates. Under the conditions of the pre-wetting disturbance treatment，the proportion of 2 mm and larger aggregates was 14.79%～40.17%. Under the conditions of the fast-wetting treatment，the content of 2 mm and larger aggregates was 4.69%～15.11%. ② The destruction rate of soil aggregates was influenced by vegetation，and followed the order of bare land＞grass land＞*Pinus tabuliformis* forest＞*Prunus armeniaca* forest＞*Caragana korshinskii* forest＞*Hippophae rhamnoides* forest. ③ The soil erodibility K value in the exposed soft rock area ranged from 0.045 to 0.092，and the disintegration rate of soil in different vegetation

收稿日期：2020-11-03　　**修回日期**：2021-01-25

资助项目：国家自然科学基金项目“砒砂岩区裸露基岩—土壤复合坡面侵蚀过程研究”(41967008)；内蒙古科技计划项目“黄河流域脆弱地质区防蚀控沙生态综合治理技术”(20200GG0126)

第一作者：杨振奇(1993—)，男(汉族)，内蒙古赤峰市人，博士，主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。Email：843296578@qq.com。

通信作者：郭建英(1979—)，男(汉族)，内蒙古呼和浩特市人，教授级高级工程师，主要从事水土保持、矿区生态修复、荒漠化防治方面的研究。Email：guojianying1980@163.com。

types ranged from 0.48 to 1.38 g/min. [Conclusion] *H. rhamnoides* and other artificial vegetation can significantly enhance the stability of soil aggregate structure, reduce soil erodibility, improve soil corrosion resistance, and thus effectively reduce erosion and sediment yield processes.

Keywords: exposed feldspathic sandstone region; Le Bissonnais method; soil aggregate stability; soil erodibility

团聚体是土壤的基本结构单元,团聚结构的稳定性是指团聚体面对降雨击打和机械震动等外力分散作用的抵抗力[1]。自然界中降雨对团聚体的破坏形式可以归纳为 3 方面:①雨滴通过击打使团聚体破碎,从而增加土壤紧实度。②团聚体经过雨水浸泡产生的膨胀分散。③瞬时暴雨使团聚体孔隙封闭造成的气爆现象[2-4]。特别是在干旱和半干旱地区,土壤贫瘠,降雨时空分布不均,少数几场暴雨便能引起剧烈的土壤侵蚀作用,该区生态修复的成效,不仅体现在区域植被覆盖度的提高和水土流失的控制上,更体现在区域土壤生态功能的恢复和土壤抗蚀性的提升上。研究植被—土壤的协同演变关系,并将其应用在植被生态系统的退化和人工植被恢复重建中是土壤学科时下研究的热点[5-6]。

砒砂岩区是黄河流域上中游地带的粗泥沙集中来源区[7],砒砂岩区按照基岩出露程度和覆土类型被分为盖土区、盖沙区和裸露区。裸露砒砂岩区基岩大幅出露,养分贫瘠,土壤侵蚀剧烈,水土流失治理难度极大[8]。近 30 a 间,砒砂岩区实施了退耕还林和小流域综合治理等一系列生态修复工程,营造了大面积人工植被,生态环境整体好转,但是局部地区的水土流失趋势依旧严峻。砒砂岩区不同人工植被类型下土壤团聚体结构成何种特征?人工植被对于土壤抗蚀性能具有何种影响?下阶段植被建设工作的方向如何?这一系列问题均是砒砂岩区水土流失治理工作中亟需解决的关键问题。目前,关于土壤团聚体结构与抗蚀性能关系的研究成果多集中在黄土区、黑土区和红壤土区,在砒砂岩地区的研究成果相对较为薄弱[9-11]。为此,本研究选取裸露砒砂岩区常见油松林、山杏林、沙棘林、柠条林以及退耕苜蓿草地等人工植被为研究对象,研究不同植被类型土壤团聚体特征及土壤抗蚀性能,以期为砒砂岩区的土壤侵蚀的预报提供数据支撑以及该区生态修复工作提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　样地概况

研究区鲍家沟流域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗,地理坐标为 110°31′—110°35′ E,39°46′—39°48′N,海拔在 1 110～1 300 m 之间;流域地形北高南低;气候属典型大陆性季风气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,年均气温 7.2 ℃,年降雨量 388.3 mm;土壤类型以黄绵土、风沙土为主;研究区自 20 世纪末实施生态移民政策,流域内目前无人居住,土地利用类型以林地和草地为主。植被以人工植被为主,常见青杨(*Populus cathayana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Prunus armeniaca*)等;草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2　研究方法

于 2018 年 7—8 月,在研究区内选取分布面积最广,立地条件一致,且林龄均为 15 a 的典型纯林布设样地,选取油松林、山杏林、柠条林、山杏林和人工苜蓿草地(退耕年限为 10 a),以天然裸地作为对照,每种植被类型设置样地 3 个。采取随机取样方法,选取 3 个取样点,共设置 45 个取样点,开挖土壤剖面,记录土层厚度,分别按 0—20,20—40,40—60 cm 的 3 个土层深度采集原状土样(部分样地覆土层较薄,覆土层下为土壤与砒砂岩风化物的混合物),每个样点随机采集 5 份样品。

土壤团聚体采用 Le Bissonnais 法[2]进行测定。测定步骤如下:①快速湿润法,取 5 g 土样浸于蒸馏水中10 min;②慢速湿润法,取 5 g 土样置于张力为 0.3 kPa 滤纸上,静置使团聚体完全湿润;③扰动湿润法,取 5 g 土样体浸没在酒精中排出空气后,置于三角瓶振荡。将上述处理的土壤转移到浸没在 95%浓度酒精中的套筛内,上下振荡 20 次后,40 ℃烘箱中蒸干酒精,再烘干 48 h,分级称重,重复测试 3 次。

本文采用 Shirazi 公式法,可蚀性 K 因子采用 Shiraz 模型[12]计算,其公式如下:

$$K=7.954\times\left\{0.001\ 7+0.049\ 4\times\exp\left[-0.5\times\left(\frac{\lg GMD+1.675}{0.698\ 6}\right)^2\right]\right\} \tag{1}$$

式中:K 为土壤可蚀性因子;GMD 为团聚体几何平均直径数据。

土壤崩解速率采用静水称重法进行测定,自制称重仪器由烧杯、挂网、悬挂架、电子天平等部分组成,

将原状土放入挂网中，匀速放入盛水的烧杯中，烧杯下方为电子天平。记录初始读数，并开始计时，初始每个 10 s 记录读数，而后隔 1 min 记录一次电子天平的读数，直至连续 5 次读数相等，崩解结束，观测时长不超过 30 min。单位时间内烧杯中掉落的土壤重量即为崩解速率[13]。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤团聚体特征

相同土层深度下，不同处理条件下的土壤团聚结构呈现不同的特征，以 0—20 cm 深度土壤为例，由图 1 可以看出在慢速湿润处理下，土壤结构中以2 mm以上的团聚为主，其含量约占整体的 34.02%～60.85%，其余依次为 1～2 mm 的团聚约占整体的 11.86%～17.37%，0.5～1 mm 的团聚约占整体的3.54%～12.42%，0.5 mm 以下的团聚体约占整体的 19.74%～38.20%；预湿扰动处理条件下，增加了前扰动处理，削弱了孔隙的封闭作用，2 mm 以上的团聚体占 14.79%～40.17%，虽然含量有所下降仍占据土壤结构的主要组成部分；快速湿润处理条件下，土壤经过短暂的浸湿后立即湿筛，团聚结构外表封闭后内部产生气爆现象使大团聚体破碎分解为小团聚体，土壤团聚体的分布情况也随之改变，2 mm 以上团聚体持续减小含量降至 4.69%～15.11%之间，0.5 mm 以下团聚体含量大幅提升，含量在 47.52%～70.07%之间。相同处理条件下，随着土层深度的增加，2 mm 以上的团聚含量随之下降，相应的 0.1 mm 以下的团聚含量随之增加。

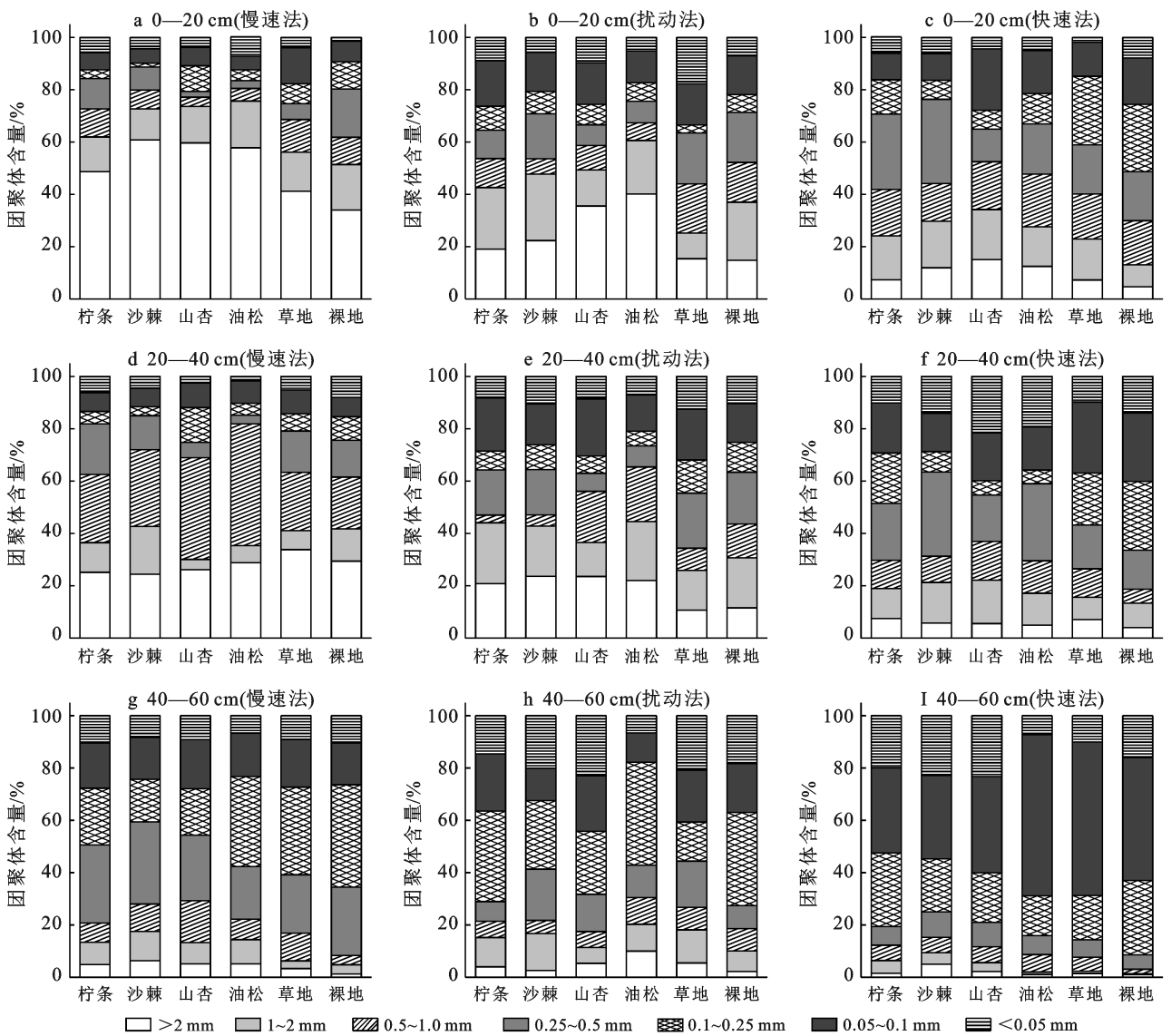


图 1 不同植被类型下各土层土壤团聚结构分布

从各植被类型的土壤团聚体粒级分布情况来看，土壤团聚的分布特征较为接近。但各植被类型土壤结构抵抗破坏的程度却略有不同，由慢速法到快速法，裸地土壤中 2 mm 以上团聚体下降了 86.21%，有植被覆

盖土壤 2 mm 以上团聚体的损失相对较少,山杏林和沙棘林分别下降了 74.67%和 80.43%;从土层深度对团聚体分布情况的影响来看,随着土层深度的增加,土壤中 1 mm 以上的团聚体含量明显下降,1 mm 的团聚体含量呈不同程度的增加趋势,20—40 cm 土层深度 0.5～1 mm 的团聚体含量提升了 9.38%～41.80%,而 40—60 cm 土层深度范围内,0.1 mm 以下的团聚含量大幅提升其含量在 70.77%～90.70%之间,占据了土壤结构的主体。

从各植被团聚体的平均直径和破坏率来看(图 2),裸地土壤在 0—20 cm 土层深度,慢速法、预湿扰动和快速法处理的土壤团聚直径分别为 1.14 mm,0.82 mm和 0.50 mm,表明快速法会使土壤团聚结构大幅分散破碎为细小团聚体,快速浸泡下产生的气爆作用对土壤团聚结构的损坏最为剧烈。随着土层深度的增加,土壤团聚体逐渐变得细小,这可能与土壤养分的减少有关,如草地土壤在慢速法处理条件下,由表层土壤到 60 cm 深度土壤,其质量平均直径由 1.14 mm,减小到 0.35 mm。0—20 cm 土层深度,慢速处理下各植被类型土壤团聚结构的质量平均直径在1.14～1.53 mm 之间,裸地和草地土壤的团聚体直径要显著低于灌木林地和乔木林地。

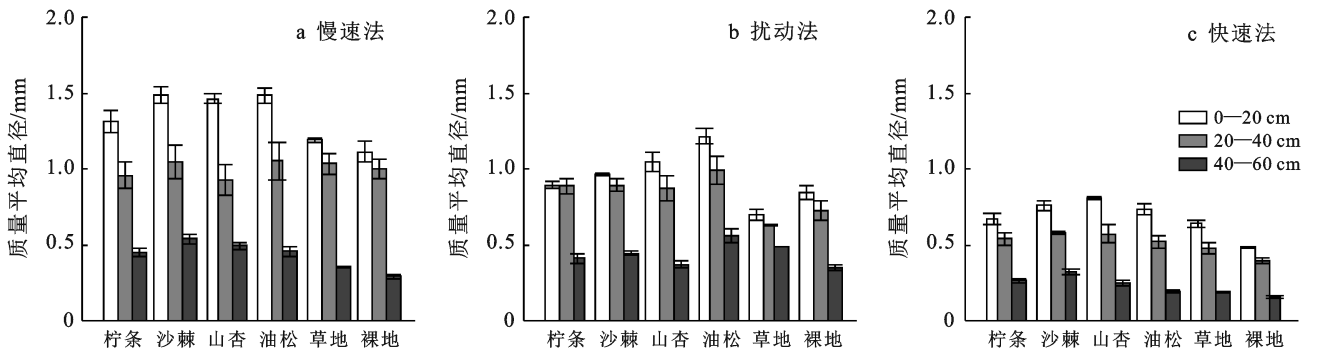


图 2　不同植被类型下土壤质量平均直径 GWD 分布特征

结合图 3 分析,各植被土壤水稳性团聚体的破坏率,可以直观的比较各植被土壤团聚体的稳定性能,桥形图的长短反映了土壤团聚体的破坏率,随着土层深度的增加,各植被类型土壤的团聚体破坏率均呈上升趋势。相同土层深度下,裸地土壤团聚体的破坏率显著高于其他植被类型,其余各植被类型土壤团聚体的破坏率大小呈现:草地＞油松林＞山杏林＞柠条林＞沙棘林的趋势,也说明植被对于土壤团聚结构的稳定性具有提升作用,且以沙棘林等灌木林相对较为明显。

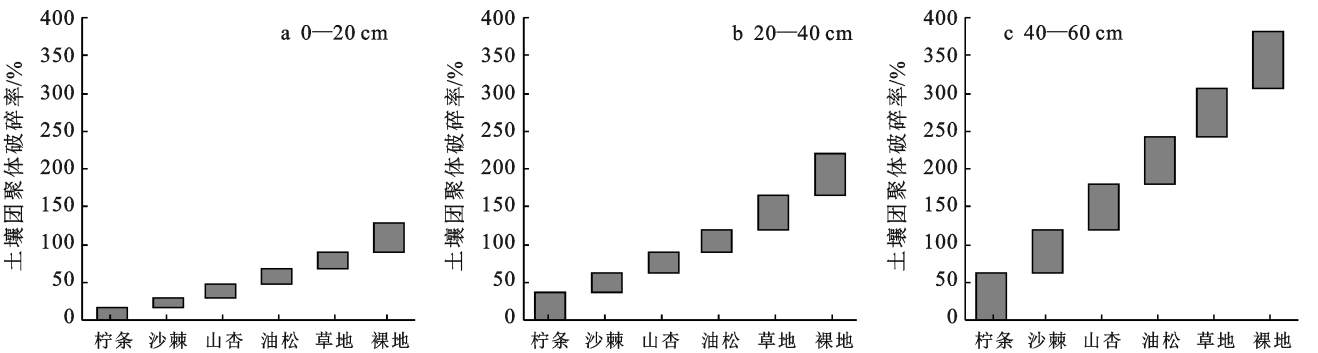


图 3　不同植被类型下土壤水稳性团聚体的破坏率 PAD 分布特征

2.2　植被类型对土壤可蚀性的影响

图 4 为各植被类型土壤在不同处理条件下的土壤可蚀性的变化情况,土壤在慢速湿润处理下,土壤可蚀性 K 值范围为 0.045～0.076 之间,可以看出 0—20 cm 土壤结构具备一定抗蚀能力,土壤可蚀性相对较低,各植被类型土壤可蚀性由小到大依次为,沙棘林(0.045)、油松林(0.046)、山杏林(0.046)、柠条林(0.048)、草地(0.051),随着土层深度的增加,土壤中的团聚结构由粗粒结构向细粒结构转变,土壤易侵蚀的敏感程度也随之增加,各植被类型土壤可蚀性 K 值均有不同程度的升高。土壤在预湿扰动处理下,可蚀性 K 值变化范围在 0.05～0.079 之间,相对慢速处

理土壤的抗蚀能有所下降，各植被类型土壤可蚀性由小到大依次为，油松林(0.050)、沙棘林(0.055)＝山杏林(0.055)、柠条林(0.058)、裸地(0.057)、草地(0.063)；土壤在快速湿润法处理下，可蚀性 K 值变化范围在 0.057～0.092 之间，表明土壤在面对瞬时暴雨条件时，无论何种植被类型土壤结构都容易被破坏，土壤的可蚀性会急剧增加。随着土层深度的增加，两种处理方式下的土壤可蚀性均呈增加趋势。

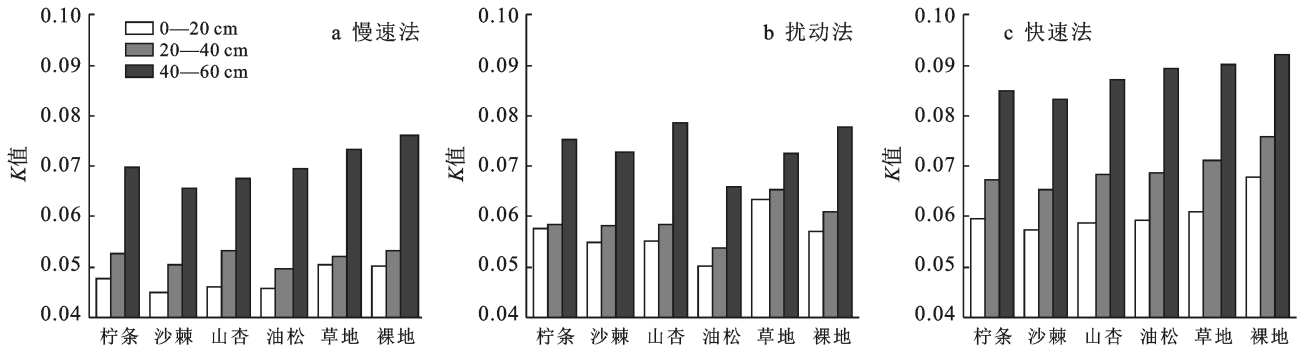
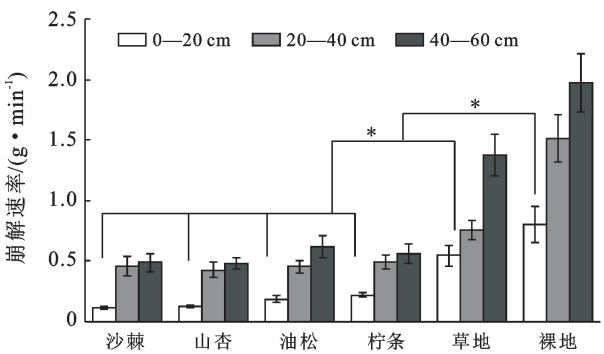


图 4 植被类型对不同深度处土壤可蚀性 K 值的影响

土壤的抗崩解能力是指土壤在静水中维持结构稳定和抵抗分解崩塌的能力，是国内常用的衡量土壤可蚀性的指标之一[14]。图 5 为各植被类型不同土层深度土壤在静水中的崩解速率，0—20 cm 土壤的崩解速率的范围在 0.13～0.80 g/min 之间，以裸地土壤抗崩解能力最弱，崩解速率显著高于有植被覆盖的土壤，其次为草地土壤，其崩解速率为 0.54 g/min，乔木和灌木林地土壤的崩解速率在 0.11～0.22 g/min 之间，抗崩解能力约是草地和裸地的 3.67 倍和 4.96 倍，各林地间土壤的崩解速率差异不显著；随着土层深度的增加，土壤结构中细小团聚结构占据了主体部分，土壤的抗蚀能力下降，20—40 cm 土层深度，裸地的土壤崩解速率仍保持最高为 1.51 g/min，各植被类型土壤崩解速率由大到小依次为，草地(0.76)、柠条林(0.49)、油松林(0.46)、沙棘林(0.45)、山杏林(0.43)。40—60 cm 土层深度，各植被类型土壤的崩解速率在 0.48～1.38 g/min 之间，随着土层深度的增加，各植被类型土壤的崩解速率均呈上升趋势，这是因为土壤中养分的衰减以及根系密度下降，导致土壤的抗崩解能力随之减弱，与团聚结构特征和可蚀性的变化规律一致。

2.3 植被类型对土壤抗蚀性能的影响

为了明确人工植被对土壤抗蚀性能的影响，以裸地小区的产流产沙量为基准，分析各植被类型减少的产流产沙量(图 6)。7 次降雨的平均降雨量为 23.22 mm，平均降雨历时为 599 min，平均降雨强度为 2.33 mm/h，以裸地的平均土壤侵蚀量最大为 4.55 t/hm^2，沙棘林的土壤侵蚀量最小为 0.22 t/hm^2，约为裸地侵蚀量的 4.4%。相同降雨条件下，各植被类型的减沙作用也有所区别，以第 4 次的短历时强降雨(降雨量为56.4 mm，降雨历时为 597 min)为例，各植被类型的减沙率现：沙棘林＞油松林＞山杏林＞柠条林＞草地的规律；随着降雨量的增大，各植被类型下的土壤侵蚀量均成增加趋势，相同植被类型对不同降雨的减沙率的差异在 12.62%左右，不同植被类型对 7 场降雨的平均减沙率依次为沙棘林(94.34%)、山杏林(93.69%)、油松林(93.56%)、柠条林(89.64%)、草地(70.12%)。



注：* 表示差异显著。

图 5 植被类型对不同深度处土壤抗崩解能力的影响

通过将土壤侵蚀量与团聚体特征及抗蚀性能指标进行相关分析后可知(表 1)，自然降雨条件下砒砂岩区土壤侵蚀量与土壤崩解速率和土壤团聚体破碎率呈极显著正相关关系，相关系数分别为 0.94，0.97，与土壤可蚀性和团聚体质量平均直径的相关性不显著。土壤崩解速率与土壤可蚀性 K 值和团聚体破碎率呈显著正相关关系，相关系数为 0.90，与团聚体质量平均直径呈显著负相关关系，相关系数为 0.89。土壤团聚体破碎率与土壤崩解速率呈显著正相关关系，相关系数为 0.90，与土壤可蚀性和团聚体质量平均直径的相关性不显著。

以上分析充分说明人工植被能有效提升土壤的抗蚀性能,减少土壤侵蚀量,各人工植被中以沙棘林土壤的抗蚀性能最强。植被的生长发育过程能够有效改善土壤团聚体结构,降低土壤团聚体在降雨条件下的破碎率,提高土壤的抗侵蚀性能,从而有效削减土壤侵蚀量。

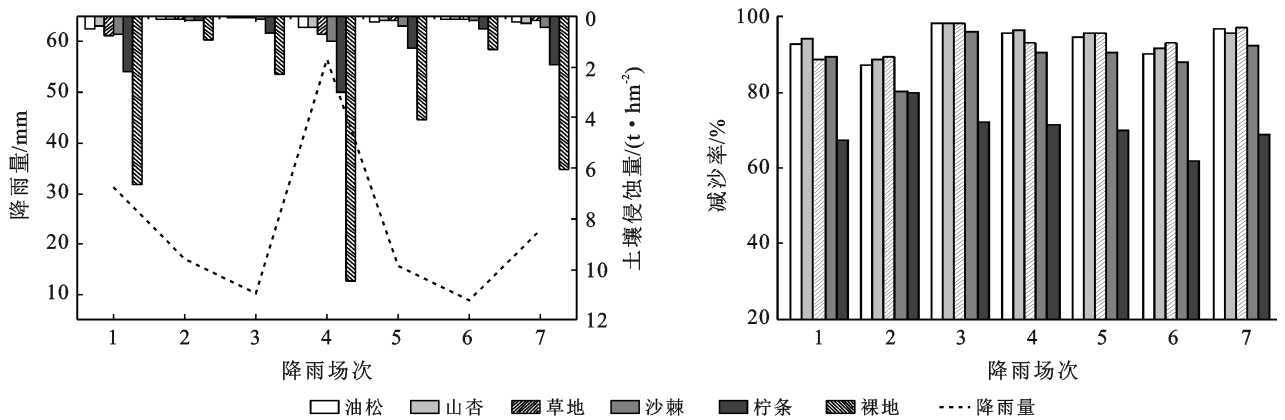


图 6　不同植被类型的减沙能力对比

表 1　土壤侵蚀量与团聚体特征及抗蚀性能的关系

项 目	侵蚀量	崩解速率	可蚀性 K 值	团聚体质量平均直径	团聚体破碎率
侵蚀量	1.00	0.94**	0.77	−0.78	0.97**
崩解速率	0.94**	1.00	0.90*	−0.89*	0.90*
可蚀性 K 值	0.77	0.90*	1.00	−0.98**	0.67
团聚体质量平均直径	−0.78	−0.89*	−0.98**	1.00	−0.65
团聚体破碎率	0.97**	0.90*	0.67	−0.65	1.00

注:* 表示指标间存在显著相关关系($p<0.05$),* * 表示指标间存在极显著相关关系($p<0.05$)。

3　讨 论

土壤的抗蚀性能对于侵蚀环境的变化极为敏感,其发展速度和方向伴随着侵蚀环境中某一类或多类因素的变化[15-16]。本研究显示,慢速湿润处理条件下,土壤结构中以 2 mm 以上的团聚体为主,含量在 34.02%～60.85%;预湿扰动处理条件下,2 mm 以上的团聚体占 14.79%～40.17%;快速湿润处理条件下 2 mm 以上团聚体含量在 4.69%～15.11%之间,以快速湿润处理对土壤团聚体的破坏最为严重。相关研究表明,侵蚀性降雨是黄土高原地区水力侵蚀的主要决定性因素,年内土壤流失过程主要由几场暴雨造成的侵蚀组成[17-18],短历时暴雨的降雨量、降雨强度与坡面的产流产沙均呈极显著的正相关关系[19-20]。裸露砒砂岩区地处黄土高原第一副区地貌单元,区域气候基本一致,年内降雨基本集中在夏秋两季,研究区土壤侵蚀过程同样也受年内的少数暴雨过程决定。本研究结果显示,随着降雨强度的增加,各植被类型下的土壤侵蚀量均成增加趋势,土壤侵蚀量与土壤崩解速率和团聚体破碎率呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.94,0.97。说明土壤团聚体结构的稳定性与土壤的抗蚀性能密切相关,而在自然状态下,暴雨条件下雨滴的击打作用和短期内形成径流的浸泡作用可能是影响土壤团聚体结构稳定性的重要因素。

植被类型除对地表的产流过程有调节作用外,更为主要的作用是对土壤的抗蚀性能和土壤的整体质量的改良作用[21]。本研究显示,各植被类型土壤结构抵抗破坏的能力有所不同,由慢速法到快速法,裸地土壤中 2 mm 以上团聚体下降了 86.21%,裸地土壤团聚体的破坏率显著高于其他植被类型,其余各植被类型土壤团聚体的破坏率呈草地＞油松林＞山杏林＞柠条林＞沙棘林的趋势。这是因为裸地所在区域基岩大幅裸露,砒砂岩的原生矿物成分单一,伍艳等[22]对砒砂岩养分的分析表明,砒砂岩风化物的有机质等养分含量较低,且裸露基岩经过风、水和冻融等外力作用下,结构松散更易于溃散侵蚀。朱燕琴等[23]的研究表明,植被能够显著改善区域土壤质量,各植被类型中以沙棘林的抗蚀能力最强。自 20 世纪 80 年代末起,砒砂岩区大面积开展人工植被建设,土地利用类型以林地为主,林地大量蓄积的枯枝落叶为有机质的形成提供了丰富的来源,所以林地土壤有机质含量高于草地和裸地[24]。在林龄相同的前提下,沙棘

萌蘖能力极强，能在短时间内积累大量生物量，而油松等林地在造林初期，伴随着机械和人工大面积整地，这也造成土壤养分流失，油松林对土壤抗蚀性能改良作用并不明显，刘钊等[25]和王改玲等[26]研究与本文观点一致。

4 结 论

（1）不同处理方式对砒砂岩区土壤中 2 mm 以上团聚体含量影响较大，慢速湿润处理条件下占 34.02%～60.85%，预湿扰动处理条件下，其含量约下降 20%，快速湿润处理条件下其含量约下降 45%。

（2）砒砂岩区土壤侵蚀量与土壤崩解速率和土壤团聚体破碎率呈极显著正相关关系，土壤团聚体的稳定性决定了土壤的抗蚀性能，从提高土壤的抗蚀性能角度看，沙棘等人工植被能够显著增强土壤团聚体结构的稳定性，降低土壤的可蚀性，提升土壤的抗蚀性能，从而有效削减侵蚀产沙过程。

[参 考 文 献]

[1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soil [J]. European Journal of Soil Science, 2006,33(2):141-163.

[2] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility(Ⅰ): Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(4):425-437.

[3] Zheng Fenli, Merrill S D, Huang Chihua, et al. Runoff, soil erosion, and erodibility of conservation reserve program land under crop and hay production [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68(4):1332-1341.

[4] 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.

[5] 周恒，时永杰，胡宇，等.不同生长年限紫花苜蓿草地土壤团聚体有机碳分布特征[J].中国土壤与肥料，2017(1):1-6.

[6] 胡婵娟，郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报，2012,21(9):1640-1646.

[7] 石迎春，叶浩，侯宏冰，等.内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J].地球学报，2004,25(6):659-664.

[8] 王愿昌，吴永红，寇权，等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学，2007,5(1):14-18.

[9] 李娅芸，刘雷，安韶山，等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].自然资源学报，2016,31(2):287-298.

[10] 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.

[11] 程谅，秦嘉惠，张利超，等.应用 Le Bissonnais 法研究不同植被类型下红壤团聚体稳定性[J].土壤学报，2020,57(4):855-866.

[12] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48(1):142-147.

[13] 张建军，朱金兆.水土保持监测指标的观测方法[M].北京：中国林业出版社，2013:66-68.

[14] 蒋定生.黄土抗蚀性的研究[J].土壤学报，1978(4):20-23.

[15] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment [J]. Land Degradation & Development, 2013,24(6):582-590.

[16] Guerrero-Campo J, Montserrat-Martí G. Effects of soil erosion on the floristic composition of plant communities on marl in northeast Spain [J]. Journal of Vegetation Science, 2000,11(3):329-336.

[17] 王占礼，邵明安，常庆瑞.黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J].西北农业大学学报，1998,26(4):106-110.

[18] 周佩华，王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报，1992,6(3):1-5.

[19] 王占礼，靳雪艳，马春艳，等.黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J].水土保持学报，2008,22(2):24-28.

[20] 张岩，朱清科.黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J].干旱区资源与环境，2006,20(6):99-103.

[21] 杨振奇，秦富仓，于晓杰，等.基于最小数据集的砒砂岩区人工林地土壤质量评价指标体系构建[J].土壤通报，2019,50(5):1072-1078.

[22] 伍艳，杨忠芳，刘慧，等.砒砂岩物质组成及其对养分含量的影响[J].人民黄河，2016,38(6):18-21,25.

[23] 朱燕琴，赵志斌，齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报，2019,33(2):9-16.

[24] 杨振奇，秦富仓，李龙，等.砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J].农业工程学报，2019,35(17):154-161.

[25] 刘钊，魏天兴，朱清科，等.黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征[J].土壤，2016,48(4):705-713.

[26] 王改玲，王青杵，石生新.晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报，2013,27(1):1-5.