

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.011; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.011.

杜芳悦, 刘俊娥, 牛百成, 等. 青藏高原—黄土高原过渡带土壤抗冲性及影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 39-47.

Du Fangyue, Liu June, Niu Baicheng, et al. Soil anti-scourability and influencing factors in the transition zone between the Qinghai-Xizang Plateau and Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 39-47.

青藏高原—黄土高原过渡带土壤抗冲性及影响因素

杜芳悦¹, 刘俊娥¹, 牛百成^{2,3}, 朱启明¹, 崔钦凯¹

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 青海师范大学 地理科学学院青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;

3. 青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

摘要: [目的] 探究青藏高原—黄土高原过渡带土壤抗冲性及其影响因素, 以为该区域水土流失防治和生态建设提供科学依据。[方法] 在青海省海南藏族自治州沙沟河流域的上、中、下游(样地 1, 样地 2, 样地 3), 选取典型栗钙土和风沙土为研究对象, 采用原状土冲刷法(2, 3, 4, 5, 6 L/min)进行土壤抗冲性试验, 测定不同土壤抗冲性变化特征, 研究土壤抗冲性对土壤理化性质、水动力条件等各因子的响应特征, 并据此建立土壤抗冲性方程。[结果] 3 个样地冲刷强度都呈初期最大、随后减少再趋于平缓的趋势, 土壤抗冲指数表现为样地 1 > 样地 3 > 样地 2, 径流含沙量与冲刷时间呈幂函数关系。3 个样地土壤理化性质存在显著差异, 容重、 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、有机质、平均重量直径和土壤抗冲指数均显著相关; 对径流剪切力和土壤抗冲指数进行拟合, 可用幂函数表达, R^2 均在 0.98 以上 ($p < 0.05$)。从土壤侵蚀动力和阻力两方面综合考虑, 选取径流剪切力、平均重量直径和有机质作为影响土壤抗冲性的主要因子构建土壤抗冲性方程。[结论] 栗钙土比风沙土抗冲性好; 基于平均重量直径和径流剪切力, 有机质和径流剪切力, 以及平均重量直径、有机质和径流剪切力建立的 3 个土壤抗冲性方程, 均有较好的拟合效果。

关键词: 青藏高原—黄土高原过渡带; 土壤抗冲性; 理化性质; 径流剪切力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0039-09

Soil anti-scourability and influencing factors in the transition zone between the Qinghai-Xizang Plateau and Loess Plateau

Du Fangyue¹, Liu June¹, Niu Baicheng^{2,3}, Zhu Qiming¹, Cui Qinkai¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes, School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Processes and Ecological Conservation of the Qinghai-Xizang Plateau, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore soil anti-scourability and influencing factors, and to provide a scientific basis for soil erosion prevention and ecological construction in the transitional zone between the Qinghai-Xizang Plateau and Loess Plateau. [Methods] In the upper, middle and lower reaches of the Shagou River Basin in Hainan Xizangan Autonomous Prefecture, Qinghai Province (sample plots 1, 2 and 3), typical chestnut soil and aeolian sandy soil were selected. The undisturbed soil scouring method (2, 3, 4, 5 and 6 L/min) was used to test the soil anti-scourability. The responses of soil anti-scourability to various factors such as soil physicochemical properties and hydrodynamic conditions were studied. The soil anti-scourability equation was constructed accordingly. [Results] The scouring intensity of three plots showed the maximum, and then decreased and then flattened, and the soil anti-scourability showed an order: sample

收稿日期: 2024-02-06

修回日期: 2024-03-18

资助项目: 青海省自然科学基金(2022-ZJ-942Q); 国家自然科学基金项目(42077058, 42107372); 中央高校基本科研业务费项目(GK202309005)

第一作者: 杜芳悦(2000—), 女, 陕西子洲人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: dfy1253362810@snnu.edu.cn

通信作者: 刘俊娥(1987—), 女, 山西河曲人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: liujune5@snnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

plot 1>sample plot 3>sample plot 2, and the runoff sediment content decreased as a power function with the scouring duration. There were significant differences in soil physical and chemical properties among the three plots, and soil anti-scourability was significantly correlated with bulk density, $WSA_{>0.25\text{ mm}}$, organic matter, and mean weight diameter. Relationships of shear stress and soil anti-scourability were well fitted by power function ($R^2>0.98$, $p<0.05$). Based on the comprehensive consideration of dynamics and resistance for soil erosion, the soil anti-scourability equation was constructed based on main factors of shear stress, mean weight diameter and organic matter. [Conclusion] Anti-scourability of chestnut soil is better than aeolian sandy soil. The soil anti-scourability equations based on the mean weight diameter and shear stress, organic matter and shear stress, and mean weight diameter, organic matter and shear stress all fit well.

Keywords: Qinghai-Xizang Plateau-Loess Plateau transitional zone; soil anti-scourability; physicochemical properties; shear stress

青海省东部地处青藏高原和黄土高原的交汇过渡带,是典型的农牧交错区,生态环境脆弱。独特的地理位置使其兼具两大高原特征,区内海拔高差大,沟谷交错,地形复杂,且降水多集中在夏季,易导致土壤侵蚀发生^[1]。该区也是黄土集中分布区,是全省水土流失最严重的地区,其中,高、中强度侵蚀区占流失面积的 50%^[2]。严重的水土流失造成了土壤生产力下降和生态环境恶化,影响该区经济和环境的可持续发展。

土壤抗冲性指土壤抵抗降雨、径流等外力对其破坏和搬运的能力^[3-4],是评价土壤抗侵蚀能力的重要指标之一,土壤抗冲性受土壤性质和土表径流水动力特征的综合影响。一方面,土壤理化性质是影响土壤抗冲性的重要因素,众多研究表明^[5-6],土壤容重、团聚体稳定性、有机质、含水率和土壤粒径等都会影响土壤抗冲性。史冬梅等^[7]研究发现,在紫色丘陵地区,土壤抗冲性和土壤容重显著正相关,和孔隙度显著负相关,但也有研究表明土壤容重越低,土壤抗冲指数越高。金晓^[8]发现土壤性质指标中,总孔隙度、水稳性团聚体含量对土壤抗冲性的影响权重最大,而土壤黏粒含量和砂粒含量的影响最小。许航等^[9]同样发现土壤团聚体稳定性影响最为显著,对提高土壤抗冲性起到重要作用。另一方面,径流水动力学特性控制着土壤分离过程,对土壤抗冲性也有一定影响。径流剪切力能够分离土壤颗粒,为土壤侵蚀提供物质来源,进而增大侵蚀程度。Horton^[10]分析了径流剪切力和坡面土壤侵蚀的关系。孙佳美等^[11]研究发现,在植被覆盖坡面上,径流剪切力和产沙率呈显著线性相关关系。张光辉等^[12]对黄土区原状土壤分离过程的水动力参数和分离速率之间关系进行了定量模拟,在常用的径流剪切力、单位水流功率和水流功率 3 个参数中,水流功率和土壤分离速率间的关系最密切,径流剪切力次之。Zi 等^[13]通过不同土壤冲刷

试验,发现土壤抗冲性与水力条件密切相关,流速是预测土壤抗冲性最佳的水动力因子。此外,不同土地利用方式也会改变地表状况和土壤性质,直接或间接地影响土壤抗冲性^[14]。由于研究区和其下垫面条件不同,主导影响因子可能会发生变化,对于土壤抗冲性指标选取也存在差异性。

目前关于土壤抗冲性的研究主要集中在生态脆弱区,多集中于黄土高原地区、喀斯特地区、科尔沁沙地等,而对于青藏高原—黄土高原过渡带土壤抗冲性及影响因素鲜有研究。基于此,本研究选取青海省海南藏族自治州沙沟河流域为研究区,探讨不同土壤抗冲性变化特征,明确土壤抗冲性对影响因素的响应关系,以期为该地区水土流失有效防控提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取青海省海南藏族自治州贵南县的沙沟河流域为研究区(东经 $100^{\circ}13'$ — $101^{\circ}33'$,北纬 $35^{\circ}09'$ — $36^{\circ}08'$),该区位于青藏高原向黄土高原过渡的地带,境内地形地貌复杂多样,高原山地、沙漠滩地、黄河谷地错落分布,属典型的高原大陆性气候,年均气温 3.1°C ,年均蒸发量 $1\,378.5\text{ mm}$,年均降水量 403.8 mm ,土壤随海拔高度呈垂直分布规律,主要有高山草甸土、栗钙土和风沙土^[15],大部分河流为黄河外流水系且多季节河,植被类型以森林、灌丛和草甸为主。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集 基于实地调查和遥感影像,结合流域内的土地利用类型及河流分布情况,在流域的上、中、下游选取了 3 个具有代表性的样点,分别代表该流域的主要土地利用类型(图 1)。样点 1 位于沙沟河流域的上游,主要代表高寒草甸,地表草本生长旺盛,土

壤类型为栗钙土(土壤机械组成为砂粒 78.76%,粉粒 20.21%,黏粒 1.03%);样点 2 位于沙沟河流域中游,主要代表沙漠滩地,地表植被稀少,土壤类型为风沙土(土壤机械组成为砂粒 88.36%,粉粒 10.94%,黏粒 0.70%);样点 3 位于沙沟河流域下游,主要代表黄河谷地,地表零散分布草本植物,土壤类型为栗钙土(土壤机械组成为砂粒 79.09%,粉粒 19.84%,黏粒 1.07%)。

于 2022 年 8 月,在各样地选取具有代表性的采样点,使用特制取样器(铁盒 10 cm×10 cm×10 cm)采集原状土用于土壤抗冲性测定,使用保鲜膜多层密封并粘贴胶带加固,尽量减少对原状土的扰动。设置两次重复。同时,在每个样地内用 14 cm×10 cm×5 cm 大小的铝盒采集表层原状土(0—10 cm),用于测定团聚体;此外,用环刀采取表层土样(0—10 cm),用于测定容重;在样地内沿 S 型路线采集 10 个表层土壤样品(0—10 cm)并将其混合,用于土壤理化性质分析。以上均设置三次重复。

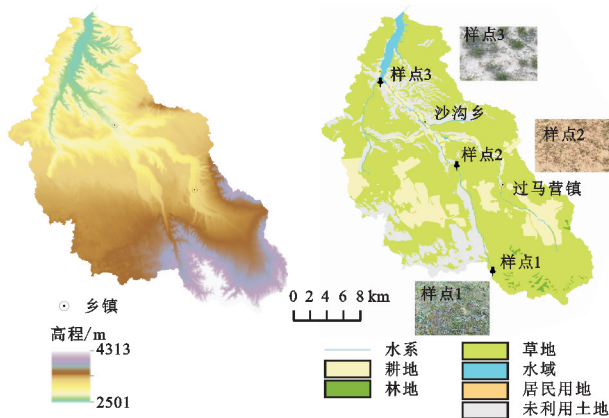


图 1 研究区采样点概况

Fig. 1 Overview of sampling points in the study area

1.2.2 样品测定 将野外采集的样品带回实验室,风干晾晒,土壤干容重采用环刀法测定,土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定,土壤粒径采用激光粒度仪测定。

土壤抗冲性采用原状土冲刷法。将采集好的土样持续浸润 12 h,随后将已经饱和的土壤静置 8 h,去除重力水,用于土壤分离能力测定试验。冲刷槽尺寸为 2 m×0.1 m×0.1 m。冲刷流量设置根据当地暴雨径流特征和细沟特征,计算确定试验的冲刷流量为 2,3,4,5,6 L/min^[16-17]。试验开始前将水槽坡度调到 15°,流量调至设计值。率定好流量后,使用高锰酸钾染色法测定流速。在距离水槽上部 1 m 的地方滴入高锰酸钾溶液并记录染色水体到达土样室的时间,每场试验在水槽的左、中、右部位各测三次,根据雷诺数判断其流态并对流速进行系数校正^[18]。冲

刷时间为 6 min,冲刷的前 2 min,每 30 s 收集 1 次水流泥沙样,此后每隔 1 min 收集 1 次,共进行 8 次取样。冲刷试验结束后静置去除上清液,过滤剩下的泥水样,并移至烘箱在 100 °C 下持续烘干 48 h,再用电子天平称量泥沙质量(精确到 0.01 g)。

1.2.3 相关指标计算 将土壤的粉粒占比/(砂粒占比+黏粒占比)定义为粉粒率(%)。 D_{50} 为中值粒径,即一个样品的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径。团聚体湿筛后得到 6 个级别水稳性团聚体,并通过计算获取各粒级土壤水稳性质量百分比 WSA(%) 和平均重量直径 MWD。将每分钟冲刷的泥沙量定义为冲刷强度(g/min),每 500 ml 径流所含泥沙定义为径流含沙量。

径流剪切力计算见公式(1):

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \quad (1)$$

式中: τ 是径流剪切力(Pa); γ 是水的容重(N/m³); R 为水力半径(m), $R = Qb / (2Q + VbW_d)$; Q 为流量(m³/s); V 为平均流速(m/s); b 为水宽(m); W_d 为水槽宽度(m); J 为水力坡度, $J = \sin\theta$, θ 为床面坡度(°)。

土壤抗冲指数计算见公式(2):

$$ASI = T / W \quad (2)$$

式中:ASI 为土壤抗冲指数(s/g); T 为冲刷时间(s); W 为冲失土样的重量(g)。

1.3 数据处理

整理试验数据并录入 Excel 表中,运用 SPSS 26 对数据进行处理,采用多重比较法、单因素方差分析和 Pearson 相关分析方法,通过逐步回归和相关分析进行通径分析,以上结果均使用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤抗冲性

2.1.1 不同样地土壤冲刷过程

(1) 冲刷强度过程变化特征。不同样地土壤的冲刷强度随时间动态变化如图 2 所示。3 个样地不同流量条件下冲刷强度总体呈相同趋势,即初期冲刷强度最大,随着冲刷时间的增加,冲刷强度均先减少再趋于平缓,整体冲刷强度表现为样地 2>样地 3>样地 1。同一样地,流量增加,冲刷强度也随之增大,在 2,3 L/min 小流量下冲刷强度整体较平缓,在 4,5,6 L/min 流量下,冲刷强度在前 4 min 内减幅明显,完成了大部分冲刷量。样地 1 和样地 3 的土壤冲刷强度基本在 4 min 后接近于零,而样地 2 的土壤冲刷强度在 5 min 后接近于零。这主要是由于 3 个样

地的土壤类型不同,样地 2 的土壤是风沙土,地表分散有大量土壤颗粒,在水流作用下极容易被搬运移走,而且当流量增大时,水流的携带能力也会增强,土质越疏松则前期的冲刷强度越大,整体冲刷时间越长。样地 1 和样地 3 的土壤均是栗钙土,土壤结构较

风沙土更为紧实,抵抗水流、风力等外营力作用的能力更强,且样地 1 的植被生长状况优于样地 3,已有许多研究证明植被根系可以有效减少径流的冲刷作用,故在 3 个样地中,样地 2 土壤的冲刷强度最大、样地 3 居中和样地 1 最小。

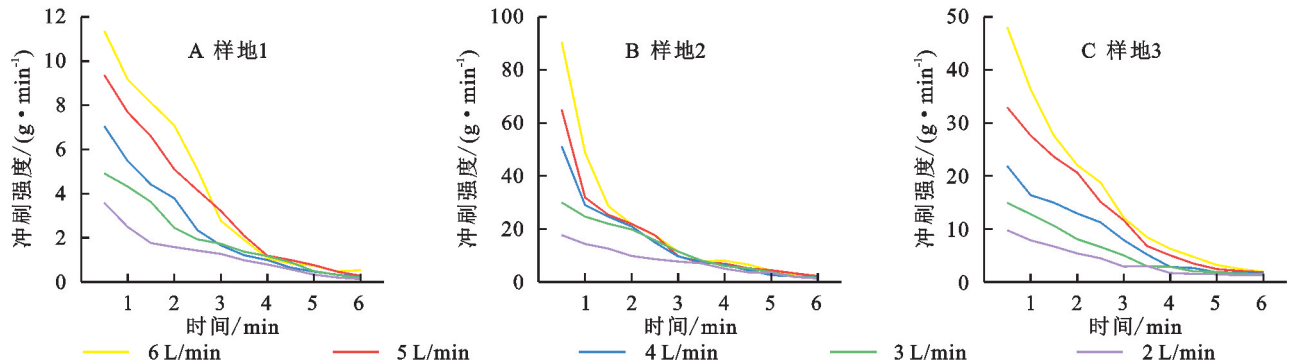


图 2 冲刷强度变化特征

Fig. 2 Variations of scouring intensity

(2) 径流含沙量过程变化特征。由图 3 可知,在同一流量的条件下,3 个样地冲刷过程中的径流含沙量随冲刷时间表现出来的变化基本相似。在前 3 min 内,3 个样地的径流含沙量都急剧下降,随着时间延长,径流含沙量变化平缓。综合比较 3 个样地冲刷过程中的径流含沙量大小依次为样地 2>样地 3>样地 1,这与三者的冲刷强度表现一致。随着流量的增大,3 个样地径流含沙量都呈上升趋势,其中样地 2 有一定增长,但样地 1 的涨幅非常小。对不同样地的冲刷时间和径流含沙量进行非线性拟合,可以得到不同流量条件下,冲刷时间和径流含沙量之间的关系可以用幂函数较好地表达, R^2 均大于 0.80。径流含沙量变化特征差异主要由土壤类型差异引起,栗钙土土壤结构较好,颗粒紧实,说明该土壤在小流量条件下对流量梯度变化不是很敏感,而风沙土呈不稳定易流动表现,在不同流量梯度的作用下径流含沙量的变化较之更为明显,故 3 个样地冲刷过程中的含沙量大小表现为风沙土大于栗钙土。

2.1.2 土壤抗冲指数 各样地土壤抗冲指数变化见图 4。冲刷流量从 6 L/min 减少到 2 L/min,3 个样地土壤抗冲指数大小均呈上升趋势,在 6, 5, 4, 3, 2 L/min 流量梯度下,样地 1 的土壤抗冲指数最高可达 47.68 s/g,最低为 14.65 s/g,样地 2 的土壤抗冲指数最高可达 7.74 s/g,最低为 2.87 s/g,样地 3 的土壤抗冲指数最高可达 15.26 s/g,最低为 3.75 s/g,可见 3 个样地的土壤抗冲性表现为样地 1>样地 3>样地 2。3 个样地所处地理环境存在差异,多因素综合作用下形成不同类型的土壤,样地 2 的土壤抗冲指数低

于样地 1 和样地 3,地表植被生长状况也不尽相同,土壤理化性质随之发生变化,其土壤抗冲指数大小同样呈差异化表现,样地 1 的土壤抗冲指数要高于样地 3。同一样地不同流量条件下,土壤抗冲指数越大,代表水流对土壤负面影响越小,即水流对地表的机械破坏作用越小,土壤颗粒不易脱离流失,土壤抗冲性也会越高,在本试验中 2 L/min 流量下土壤发生侵蚀量越少。

2.2 土壤特征

2.2.1 土壤理化性质 土壤理化性质是土壤内在特征,3 个样地在土壤理化性质上存在显著差异,详见表 1。土壤容重大小表现为样地 2>样地 3>样地 1,土壤含水率和有机质含量表现为样地 1>样地 3>样地 2。由于风沙土体土层浅薄、结构差,质地较粗,因此,样地 2 的土壤容重最大;而样地 1 的植被生长较好,地下根系盘结,可以增加土壤团粒之间的黏结力,改善土壤孔隙度,因此,样地 1 的土壤容重小于样地 3。样地 2 的含水量远低于样地 1 和样地 3,这是由于样地 2 的风沙土结构差,蓄水能力弱,其地表植被覆盖较低,因此,土壤含水量极低;而样地 1 的土壤容重较小,孔隙度较大,土壤下渗能力较强,加之地表高覆盖的植被具有一定的保水能力,因此样地 1 的含水量会较高;而样地 3 的土壤类型和样地 1 一致,但植被生长略差,因此含水率介于两者之间。样地 2 的风沙土有机质含量低,有盐分和碳酸钙的聚集,有机质含量低,样地 1 和样地 3 的土壤类型相同但样地 1 的植被覆盖密集,在根系作用下较样地 3 土壤发育更好,因此有机质含量最高。

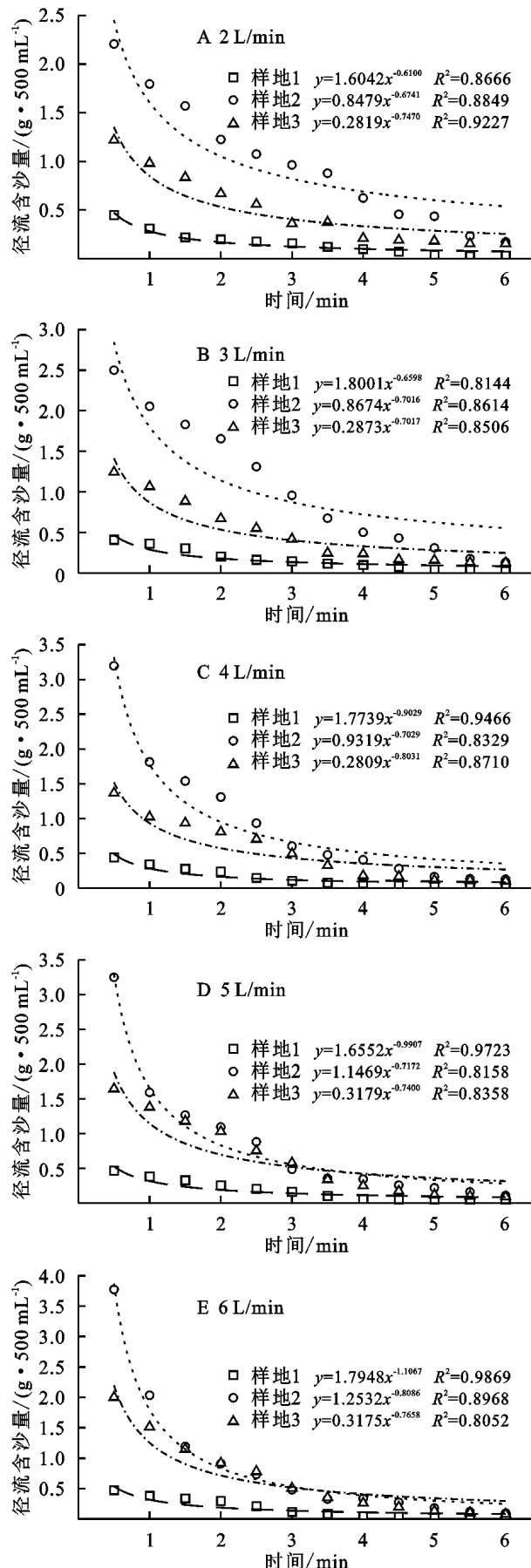


图3 径流含沙量动态变化特征

Fig. 3 Variations of runoff sediment content

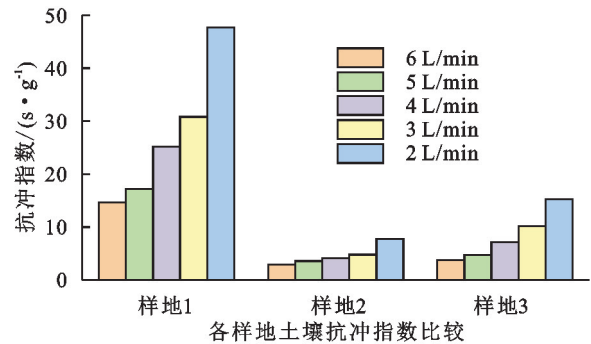


图4 不同样地土壤抗冲性对比

Fig. 4 Anti-scourability of different soils

土壤颗粒大小不同会导致抵抗径流搬运迁移能力不同^[19]。由表1可知,土壤中值粒径 D_{50} 表现为样地2>样地1>样地3,样地2和样地1,样地3存在显著差异,样地2的 D_{50} 为 $107.90\mu\text{m}$,该值远远大于样地1和样地3。本研究中各样地土壤机械组成粉粒占比差异性最大,且不同样地的粉粒率表现为样地1>样地3>样地2,样地2和样地1,样地3显著不同。这是因为样地2的土壤为风沙土,风沙土成土于风成沙性母质,在风力分选的作用下多粗颗粒,呈砂粒含量较高、粉粒和黏粒含量低的特点,本研究中样地2的风沙土土壤机械组中砂粒占比达88.36%,因此粉粒占比相对较低。

2.2.2 团聚体稳定性 团聚体稳定性是团聚体抵抗外界破坏、维持结构稳定的能力,是决定土壤结构好坏的关键因素。不同样地土壤团聚体的变化由表2可知,3个样地的平均重量直径MWD表现为样地1>样地3>样地2。对比各粒径水稳性团聚体含量得出,样地1的 $WSA_{>5\text{mm}}$, $WSA_{5\sim 0.25\text{mm}}$ 和 $WSA_{<0.25\text{mm}}$ 之间有显著差异,样地2,样地3均在 $WSA_{>0.25\text{mm}}$ 和 $WSA_{<0.25\text{mm}}$ 之间有显著差异。3个样地的土壤大团聚体含量和土壤小团聚体含量之间均存在差异性,样地1的大团聚体质量占比最高,分别是样地2和样地3的4.6倍和2.9倍。样地1的平均重量直径MWD为1.93mm,显著高于样地2和样地3,说明样地1的土壤结构稳定性最好,土壤抗冲性强,而样地2的土壤结构稳定性最差,土壤抗冲性最弱。大团聚体中含有更多的有机碳^[20],样地1的大团聚体质量占比显著高于其他样地,这也与3个样地的有机质含量表现一致。

2.3 土壤抗冲性的影响因素

2.3.1 土壤抗冲指数和径流剪切力的关系 径流剪切力是研究土壤侵蚀过程重要的水动力学参数,会对土壤结构产生冲击毁坏使土壤颗粒分散,土壤抗冲性可反映土壤抵抗径流剪切力的能力^[21]。表3为土壤抗冲指数随径流剪切力的变化关系,土壤抗冲指数

ASI 和径流剪切力 τ 呈很好的幂函数关系,幂指数变化范围为 $-1.488\ 5\sim-1.123\ 3$, R^2 范围为 $0.979\ 3\sim0.986\ 4$,模型在 0.05 水平都表现出高显著性。3 个样地的径流剪切力的变化影响着土壤抗冲指数 ASI,

且两者呈负相关,即随着径流剪切力的减小,土壤抗冲指数逐渐增强,这主要是由于径流剪切力减小意味着地表径流的动力减少,其对土壤颗粒的破坏与搬运能力随之降低,因此土壤抗冲性增强。

表 1 土壤容重、含水率、有机质和粒径
Table 1 Soil bulk density, moisture content, organic matter and particle size

样地	容重 BD/(g · cm ⁻³)	含水率 SMC/%	有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	D ₅₀ /μm	粉粒率/%
样地 1	1.10±0.07b	12.46±0.58a	10.38±0.89a	63.03±6.73b	25.41±3.71a
样地 2	1.61±0.08a	0.61±0.19c	5.69±0.49c	107.90±2.72a	12.30±1.74b
样地 3	1.52±0.04a	2.36±0.29b	7.72±0.67b	57.87±7.70b	24.97±6.23a

注:小写字母表示不同样地之间差异显著($p<0.05$)。

表 2 不同样地土壤水稳性团聚体含量
Table 2 Contents of soil water-stable aggregates

样地	平均重量	各粒径水稳性团聚体含量 WSA _i /%						
	直径 MWD/mm	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	>0.25 mm
样地 1	1.93±0.74a	25.02±10.98Ba	6.99±2.39Ca	4.04±1.09Ca	5.22±0.68Ca	4.60±0.33Ca	54.11±14.86Ab	45.89±14.86a
样地 2	0.37±0.09b	2.44±0.90Bb	2.07±0.89Bb	0.57±0.56Ba	2.61±1.74Ba	2.19±1.72Ba	90.12±4.25Aa	9.88±4.25b
样地 3	0.67±0.07b	7.38±1.56Bb	1.58±0.12Bb	2.36±2.82Ba	2.48±2.91Ba	2.14±1.93Ba	84.05±6.68Aa	15.95±6.68b

注:小写字母表示同一粒径不同样地之间差异显著,不同的大写字母表示同一样地不同粒径之间差异显著($p<0.05$)。

表 3 土壤抗冲性与径流剪切力的关系
Table 3 Relationship between soil anti-scourability and flow shear stress

样地	模型	R ²	p
样地 1	ASI=139.9119 $\tau^{-1.3056}$	0.9864	0.05
样地 2	ASI=52.7714 $\tau^{-1.4885}$	0.9793	0.05
样地 3	ASI=19.1114 $\tau^{-1.1233}$	0.9822	0.05

2.3.2 土壤抗冲指数和土壤理化性质的关系 通过 Person 相关分析(图 5),在 0.01 显著性水平上,土壤抗冲指数和土壤容重、 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、有机质和平均重量直径 MWD 均呈显著相关,相关指数分别为 $-0.93,0.89,0.92,0.89$ 。土壤抗冲指数与 D_{50} 呈负相关,与粉粒率呈正相关,但均没有达到显著水平,相关指数分别为 $-0.53,0.65$ 。

团聚体是土壤结构的基本单元,影响土壤中的物理化学过程,对土壤结构好坏起着重要作用,WSA 和 MWD 都是评价团聚体稳定性的重要指标,水稳性团聚体越多,土壤团粒结构越好,其抵抗水流分散能力越强,进而抗冲性越高^[22]。有机质对微团聚体和大团聚体的形成有重要作用,有机质作为胶结物质可以与土壤矿质颗粒结合,形成的团聚体可以增强土壤的抗冲能力,同时有机质是亲水胶体,能吸收大量水分直接或间接地缓冲水流对泥沙的输送作用,提高土壤的抗冲性能。本研究中容重和土壤抗冲性呈显著负相关,主要是由于样地 1 地表植被分布广泛,受根系生长影响,其土壤孔隙度较大,导致容重最低;但由于植被生长旺盛,使其有机质含量和团聚体稳定性明显高于其他样地,显著提高其抗

冲性,综合影响下呈现出容重虽小但土壤抗冲性较高的结果。部分学者也证实了低容重土壤具有良好的结构也可能具有较高的抗冲性^[23-24]。

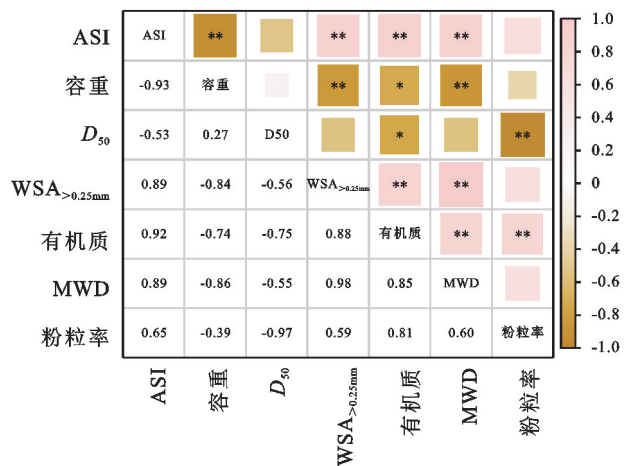


图 5 土壤抗冲指数与土壤理化性质相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis between soil anti-scourability and soil physical and chemical properties

由图 5 可知,土壤理化性质各变量之间存在相关性,且部分关系显著,为减少土壤理化性质变量间的干扰,进一步阐明土壤抗冲性与土壤性质的关系,对土壤抗冲指数与土壤性质进行通径分析,结果如图 6 所示。通过逐步回归剔除影响较小或多重共线性的因素,得到容重和有机质两个变量,容重和有机质不存在多重共线性, $R^2=0.969(p<0.01)$,模型解释度为 96.9% 。由前述土壤特征变化可知,容重和有机质都受到 3 个样地不同植被生长状况的影响,因此,容重和有机质都作为土壤抗冲指数的直接影响因素。 D_{50} , $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、平均重

量直径和粉粒率可通过影响容重和有机质间接影响土壤抗冲指数。由于土壤机械组成不同,土壤质地也会发生变化,可能会导致土壤容重存在差异,进而对土壤抗冲性造成影响。 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、平均重量直径和容重之间显著相关, $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、平均重量直径和有机质呈正相关,团聚体数量和稳定性会对容重和有机质产生影响,会改变土壤抗冲性。

2.4 土壤抗冲性方程

在土壤抗冲性机理认识方面,已有大量研究从土壤理化性质、力学性质、根系特性等角度入手^[25-28],众多研究结果表明土壤抗冲性受多因素共同影响。基于此,本研究选取径流剪切力、土壤容重、 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、有机质和平均重量直径、 D_{50} 和粉粒率作为比较列,通过灰色关联度综合分析各影响因素(表 4)。结果显示,本研究选取的各因素对土壤抗冲指数均有较大的影响,关联度

变化范围为 0.677~0.836,表明这些因子共同决定土壤抗冲性大小,其中平均重量直径 MWD 和土壤抗冲指数关系最密切,其次是 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 和有机质。

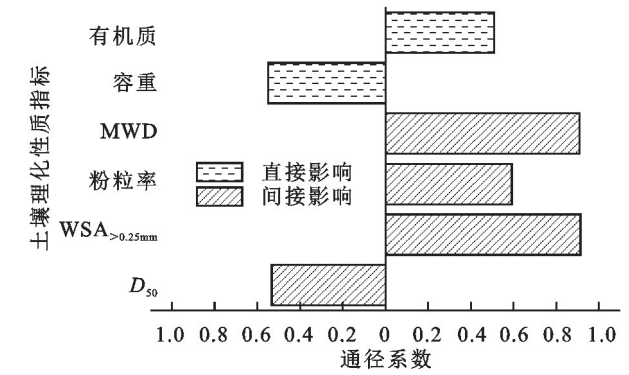


图 6 土壤抗冲指数与土壤理化性质通径分析

Fig. 6 Path analysis diagram of factors for soil anti-scourability

表 4 土壤抗冲指数与影响因素关联度

Table 4 Correlation between soil impact index and influencing factors

因素	关联度	排名	因素	关联度	排名
平均重量直径 MWD	0.836	1	径流剪切力 τ	0.707	5
$WSA_{>0.25\text{ mm}}$	0.832	2	D_{50}	0.682	6
粉粒率	0.775	3	容重 BD	0.677	7
有机质 SOM	0.773	4			

平均重量直径和土壤抗冲指数关联最密切且显著相关,可作为表征土壤物理性质的因子,结合前文对各影响因素的相关分析,有机质对土壤抗冲指数影响也较大,适合作为土壤化学性质的代表指标。从土壤侵蚀动力和侵蚀阻力两方面综合考虑,本文选取径流剪切力、平均重量直径和有机质作为 3 个主要影响因素,建立基于不同因素下的土壤抗冲指数方程并进

行显著性检验,结果如表 5 所示。基于平均重量直径和径流剪切力建立的方程($R^2=0.868$)与基于平均重量直径、有机质和径流剪切力建立的方程($R^2=0.868$)拟合效果最佳,最后是基于有机质和径流剪切力建立的方程($R^2=0.814$)。拟合方程的决定系数 R^2 和纳什效率系数 NSE 均高于 0.80, F 统计量在 0.01 水平显著,3 个方程的拟合效果均较好。

表 5 基于不同因子的土壤抗冲性拟合方程

Table 5 Equations of soil anti-scourability based on different factors

序号	模型	R^2	NSE	F
1	$ASI=14.588MWD-5.381\tau+19.843$	0.868	0.868	38.390 **
2	$ASI=4.968SOM-5.384\tau-4.721$	0.814	0.814	26.250 **
3	$ASI=16.355MWD-0.650SOM-5.381\tau+23.202$	0.868	0.868	24.215 **

注: ** 表示差异极显著, $p < 0.01$ 。

3 结论

(1) 同一坡度不同流量下,3 个样地冲刷强度趋势相同,初期冲刷强度最大,随后减少再趋于平缓。随着冲刷时间的增加径流含沙量越来越少,且两者之间呈幂函数关系;3 个样地土壤抗冲指数最好的是样地 1,样地 3 次之,样地 2 最差,即栗钙土的抗冲性高于风沙土。

(2) 3 个样地土壤理化性质存在显著差异,样地 1(栗钙土)的水稳性团聚体和有机质含量最大。土壤抗冲指数和土壤容重呈显著负相关,和 $WSA_{>0.25\text{ mm}}$ 、有机质、平均重量直径均呈显著正相关,容重和有机

质对土壤抗冲指数产生直接影响。土壤抗冲指数对径流剪切力的响应呈现出很好的幂函数关系。

(3) 综合考虑选取径流剪切力、平均重量直径和有机质 3 个主要影响因素,依次建立了基于平均重量直径和径流剪切力,有机质和径流剪切力,以及平均重量直径、有机质和径流剪切力的土壤抗冲性方程,3 个方程均能较好地模拟该区域土壤抗冲性。

参考文献 (References):

[1] 杨晶晶. 青海省黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀状况研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
Yang J J. Study on soil reosion in Loess hillyand gullyregion

- of Qinghai province[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2014.
- [2] 张平仓,王斌科,唐克丽.青海省东部黄土地区土壤侵蚀的区域特征及其防治途径[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):87-96.
- Zhang P C, Wang B K, Tang K L. The district character and prevenient way of soil erosion on the Loess Area in the east of Qinghai Province[J]. Memoir of NISWC Academia Sinica, 1988(1):87-96.
- [3] Sha X Y, Li K, Wang W L, et al. Characteristics of soil anti-scourability in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Ying Yong Sheng The Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):133-140.
- [4] 李勇,朱显谟,田积莹,等.黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J].科学通报,1990,35(5):390-393.
- Li Y, Zhu X M, Tian J Y, et al. Preliminary study on soil erosion resistance mechanism on the Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1990,35(5):390-393.
- [5] Ma R, Zheng Z C, Li T X, et al. Temporal variation of soil erosion resistance on sloping farmland during the growth stages of maize(*Zea mays* L.)[J]. Hydrological Processes, 2021,35(9): e14353.
- [6] Liu J Y, Zhou Z C, Liu J E, et al. Effects of root density on soil detachment capacity by overland flow during one growing season[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022,22(5):1500-1510.
- [7] 史东梅,陈晏.紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J].中国农业科学,2008,41(5):1400-1409.
- Shi D M, Chen Y. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in purple soil hilly region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41 (5):1400-1409.
- [8] 金晓.晋西黄土区不同植被类型表层土壤抗冲性及影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- Jin X. Study on the anti-scourability and influencing factors of surface soil of different vegetation types in the Loess Area of Western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [9] 许航,秦岭,何淑勤,等.大渡河干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性特征[J].干旱区资源与环境,2023, 37(10):102-108.
- Xu H, Qin L, He S Q, et al. Soil anti-scourability under different land use types in arid valley area of Dadu River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(10):102-108.
- [10] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56(3):275-370.
- [11] 孙佳美,侯沛轩,逢育波,等.植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理[J].水土保持通报,2022,42(2):1-7.
- Sun J M, Hou P X, Pang Y B, et al. Hydrodynamic mechanism of soil erosion on vegetation covered slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42 (2):1-7.
- [12] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.
- Zhang G H, Liu B Y, He X W. Study on hydro-dynamic mechanism of natural soil detachment in loess region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,19(4): 48-52.
- [13] Zi R Y, Zhao L S, Fang Q, et al. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of Karst hillslopes[J]. Catena, 2023,228:107177.
- [14] 高双,贾燕锋,范昊明,等.冻融作用下东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲性研究[J].水土保持学报, 2015,29(6):69-73.
- Gao S, Jia Y F, Fan H M, et al. Effect of freezing and thawing on soil anti-scourability under different land use types in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29 (6):69-73.
- [15] 王玮璐,贺康宁,张潭,等.青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J].植物资源与环境学报,2020,29(2):69-77.
- Wang W L, He K N, Zhang T, et al. Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2020,29(2):69-77.
- [16] 郑世清,周佩华,刘宝元,等.长武王东试验区土壤抗冲试验研究[J].水土保持通报,1993,13(3):6-8.
- Zheng S Q, Zhou P H, Liu B Y, et al. Study on soil anti-scourability in experimental area located in Changwu County, Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993,13(3):6-8.
- [17] 胡建忠,周心澄,李文忠,等.退耕地青海云杉人工林土壤抗冲性试验研究[J].水土保持学报,2004,18(6):6-10.
- Hu J Z, Zhou X C, Li W Z, et al. Experiment on soil anti-scourability of artificial *Picea crassifolia* forest in rehabilitation lands[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(6):6-10.
- [18] 朱启明,程西科,刘俊娥,等.黄土高原水蚀风蚀交错区风沙土细沟分离能力探究[J].水土保持学报,2022,36 (6):189-194,205.
- Zhu Q M, Cheng X K, Liu J E, et al. Research on the rill detachment capacity of aeolian sandy soil in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,

- 36(6):189-194,205.
- [19] Zhang G H, Wang L L, Tang K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(7):1289-1299.
- [20] Xiao L M, Zhang W, Hu P L, et al. The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical Karst area[J]. Science of the Total Environment, 2021,801:149588.
- [21] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
- Yang C X, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Distribution of shear stress and the relationship between soil detachment rate and shear stress under experiments[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010,8(6):53-57.
- [22] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):105-112.
- Li Q, Liu G B, Xu M X, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(17):105-112.
- [23] Wang X S, Guo M M, Liu J L, et al. Soil anti-scourabilities of four typical herbaceous plants and their responses to soil properties, root traits and slope position in Northeast China [J]. Sustainability, 2022,14(24):16807-16819.
- [24] 周维,张建辉,李勇,等.金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J].水土保持通报,2006,26(5):26-30,42.
- Zhou W, Zhang J H, Li Y, et al. Soil anti-scourability under different land uses in dry-warm valleys of the Jinshajiang River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(5):26-30,42.
- [25] 吕猛,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施土壤抗冲性及其与物理性质的关系[J].灌溉排水学报,2019,38(S1):90-93.
- Lyu M, Lyu G, Zhai J X, et al. Soil anti-scourability and its relationship with physical properties of different forest and grass measures in the southern margin of horqin sandy land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(S1):90-93.
- [26] 杨瑞杰,何淑勤,周树峰,等.杂交梁草生长期土壤抗冲性变化特征及其根系调控效应[J].草业学报,2023,32(7):149-159.
- Yang R J, He S Q, Zhou S F, et al. Root regulation of soil scourability in hybrid sorghum grass during the growing period[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(7):149-159.
- [27] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- Wang Y Q, Zhang J J, Li L, et al. Analysis of factors impacting soil anti-scourability of typical grassland ecosystems on the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(1):122-131.
- [28] 刘泉宏,湛芸,颜哲豪,等.紫色土区草篱根系对其根-土复合体抗剪和抗冲性能的影响[J].草业学报,2021,30(11):98-107.
- Liu X H, Chen Y, Yan Z H, et al. The effects of grass hedgerow roots on shear strength and scouring resistance of root-soil complexes in the purple soil region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021,30(11):98-107.

~~~~~

(上接第 38 页)

- [26] 于宗恺,刘小伟,朵莹,等.黄土高原退耕草地演替过程中土壤及微生物碳氮磷化学计量关系时空变化[J].中国草地学报,2023,45(8):118-128.
- Yu Z K, Liu X W, Duo Y, et al. Temporal and spatial variations of soil and microbial carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric relationships during the succession of rehabilitated grassland on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(8):118-128.
- [27] Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2007,71:163-174.
- [28] 郭钰,姚佳峰,董媛,等.油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征[J].应用生态学报,2023,34(11):2881-2888.
- Guo Y, Yao J F, Dong Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(11):2881-2888.
- [29] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010,98:139-151.
- [30] 由政,张鹏,薛蕊,等.退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J].草地学报,2017,25(3):657-661.
- You Z, Zhang P, Xue S, et al. Effect of vegetation succession on abandoned cropland on soil stoichiometry characteristics[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017,25(3):657-661.