

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.007 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.007

赵家艺,李润杰,孔小云,等.黄土高寒区典型小流域土壤团聚体稳定性及可蚀性空间变异特征[J].水土保持学报,2026,40(1):165-176.

ZHAO Jiayi, LI Runjie, KONG Xiaoyun, et al. Spatial variation characteristics of soil aggregate stability and erodibility in typical small watershed of loess alpine region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):165-176.

## 黄土高寒区典型小流域土壤团聚体 稳定性及可蚀性空间变异特征

赵家艺<sup>1,2</sup>, 李润杰<sup>2</sup>, 孔小云<sup>2,3</sup>, 辛继林<sup>2,3</sup>, 崔子龙<sup>1,2</sup>, 林成清<sup>2,3</sup>, 杨晓璇<sup>2,3</sup>,  
党怡乐<sup>2,3</sup>, 马占明<sup>2,3</sup>, 李航<sup>4</sup>, 朱元涛<sup>5</sup>, 李向<sup>5</sup>, 张永坤<sup>2</sup>

(1.青海大学生态环境工程学院,西宁 810016; 2.青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,西宁 810016; 3.青海大学农牧学院,西宁 810016; 4.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 5.青海大学土木水利学院,西宁 810016)

**摘要:** [目的] 为探究黑滩沟小流域不同土地利用类型土壤团聚体稳定性及可蚀性变化特征,明确环境因子与团聚体稳定性及可蚀性间的关系,为提升土壤侵蚀能力、耕地质量与生态系统功能提供依据。[方法] 以青海省东北部的黑滩沟小流域为研究区域,针对林地、草地和耕地布设50个样点,采集0~20、20~40 cm土层土样进行土壤团聚体组分及相关土壤性质的测定与计算,综合半方差函数、克里金空间插值、Pearson相关分析、冗余分析和结构方程模型(SEM)量化环境变量对 $>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ )、平均重量直径(MWD)和可蚀性( $K$ )空间变化的影响。[结果] 在3种不同土地利用类型下土壤团聚体特征和可蚀性表现出较大差异,耕地 $WSA_{>0.25}$ 和MWD显著低于林地和草地,耕地的 $K$ 高于林地( $p<0.05$ )。 $WSA_{>0.25}$ 和MWD在西南和东南有林地和草地覆盖的流域较高,东北部耕地边坡流域较低。整体来看,在 $WSA_{>0.25}$ 和MWD较高的区域, $K$ 较低;指数模型最优描述 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和 $K$ ;  $WSA_{>0.25}$ 和MWD表现出较强的空间自相关性, $K$ 表现出中等的空间自相关性;地形(坡度、剖面曲率、海拔、坡向)、植被(根系生物量、归一化植被指数)和土壤(粉粒、黏粒、pH、有机碳、总提取球囊霉素相关蛋白)均与土壤团聚体稳定性和可蚀性具有显著相关性( $p<0.05$ )。根据冗余分析,土地利用类型、粉粒和归一化植被指数共同贡献土壤团聚体稳定性和可蚀性空间变异的主要解释度。SEM结果表明,土地利用类型(Land use)、土壤有机碳质量分数和土壤黏粒、粉粒、砂粒是控制 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和 $K$ 变异的主要因素。[结论] 小流域土壤团聚体和可蚀性在不同土地利用类型上存在显著差异,土地利用类型、有机碳、砂粒、粉粒、黏粒和归一化植被指数是研究区土壤团聚体和可蚀性空间变异最重要的驱动因素,研究结果可为高寒区小流域提升团聚体稳定性、提高土壤抗侵蚀能力提供参考。

**关键词:** 土壤团聚体; 空间变异;  $>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数; 平均重量直径; 可蚀性

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0165-12

## Spatial Variation Characteristics of Soil Aggregate Stability and Erodibility in Typical Small Watershed of Loess Alpine Region

ZHAO Jiayi<sup>1,2</sup>, LI Runjie<sup>2</sup>, KONG Xiaoyun<sup>2,3</sup>, XIN Jilin<sup>2,3</sup>, CUI Zilong<sup>1,2</sup>, LIN Chengqing<sup>2,3</sup>, YANG Xiaoxuan<sup>2,3</sup>,  
DANG Yile<sup>2,3</sup>, MA Zhanming<sup>2,3</sup>, LI Hang<sup>4</sup>, ZHU Yuantao<sup>5</sup>, LI Xiang<sup>5</sup>, ZHANG Yongkun<sup>2</sup>

(1.College of Ecological Environment Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2.State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China; 3.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 4.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 5.School of Civil Engineering and Water Conservancy, Qinghai University, Xining 810016, China)

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-07-31

录用日期: 2025-08-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-25

资助项目: 青海省科技厅项目(2024-SF-148); 国家自然科学基金青年项目(42207375)

第一作者: 赵家艺(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 2070536605@qq.com

通信作者: 张永坤(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1659113442@qq.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

**Abstract:** [Objective] To investigate the variation characteristics of soil aggregate stability and erodibility under different Land use types in Heitangou small watershed, and to clarify the relationships between environmentals and soil aggregate stability and erodibility, thereby providing a basis for improving soil erosion resistance, cultivated land quality, and ecosystem function. [Methods] The study area was the Heitangou small watershed in northeastern Qinghai Province. 50 sampling sites were established across forestland, grassland, and cultivated land. Soil samples were collected from 0~20 and 20~40 cm layers for determination and calculation of soil aggregate composition and related soil properties. The influence of environmental variables on the spatial variation of mass fraction of soil water-stable aggregate  $>0.25$  mm ( $WSA_{>0.25}$ ), mean weight diameter (MWD), and erodibility ( $K$ ) was quantified using semivariance functions, Kriging spatial interpolation, Pearson correlation analysis, redundancy analysis, and structural equation model (SEM). [Results] The characteristics and erodibility of soil aggregates showed great differences under three different Land use types. The  $WSA_{>0.25}$  and MWD of cultivated land were significantly lower than those of forestland and grassland, and the  $K$  of cultivated land was higher than that of forestland ( $p < 0.05$ ). The values of  $WSA_{>0.25}$  and MWD were higher in watersheds covered by forestland and grassland in the southwestern and southeastern regions, but lower in the cultivated land slopes of the northeastern watersheds. Overall, regions with higher  $WSA_{>0.25}$  and MWD values exhibited lower  $K$  values. The exponential model provided the best fit for characterizing the spatial distributions of  $WSA_{>0.25}$ , MWD, and  $K$ . Both  $WSA_{>0.25}$  and MWD exhibited strong spatial autocorrelation, while  $K$  demonstrated moderate spatial autocorrelation. Topographics (slope gradient, profile curvature, elevation, and aspect), vegetation (root biomass and normalized difference vegetation index (NDVI)), and soil properties (silt, clay, pH, soil organic carbon (SOC), and total glomalin-related soil protein, T-GRSP) were all significantly correlated with soil aggregate stability and erodibility ( $p < 0.05$ ). Redundancy analysis revealed that Land use type, silt content, and NDVI jointly contributed the major explanatory power of the spatial variation of soil aggregate stability and erodibility. SEM analysis indicated that Land use type, SOC content, soil clay, silt, and sand fractions were the dominants controlling the variations of  $WSA_{>0.25}$ , MWD, and  $K$ . [Conclusion] Significant differences in soil aggregates and erodibility are observed among different Land use types in small watersheds. Land use type, organic carbon, sand, silt, clay and NDVI are the most important drivings for the spatial variation of soil aggregates and erodibility in the study area. The findings can provide references for improving aggregate stability and soil erosion resistance in small watersheds of alpine regions.

**Keywords:** soil aggregates; spatial variation; mass fraction of water-stable aggregate  $>0.25$  mm; mean weight diameter; erodibility

Received: 2025-05-27

Revised: 2025-07-31

Accepted: 2025-08-15

Online(www.cnki.net): 2025-09-25

土壤结构影响水分运动、气体交换、养分循环和土壤微生物的多样性。土壤团聚体是由胶结形成的土壤颗粒(包括土壤微团聚体)组成的,是自然组成土壤结构的基本单元<sup>[1]</sup>。土壤团聚体稳定性对于提高土壤生产力、抗侵蚀能力、促进植物生长、防止土壤退化等具有重要意义<sup>[2]</sup>。土壤可蚀性是土壤侵蚀模型中的核心参数,表征土壤在侵蚀营力作用下发生分离和迁移的难易程度,通常用 $K$ 因子进行量化表征。 $K$ 因子与土壤侵蚀敏感性显著相关,其科学量化对于土壤侵蚀机理研究及生态系统服务功能评估具有重要的理论和实践意义<sup>[3]</sup>。 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和 $K$ 因子常被用于评估土

壤退化程度和可蚀性的主要指标。然而,土壤团聚体稳定性与可蚀性呈显著的空间异质性,其分布格局主要受地形特征、土壤理化性质及农业管理措施和人为干扰所驱动的土地利用方式共同调控<sup>[4]</sup>。了解 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和 $K$ 因子的空间分布,以及分析影响因素对其空间变异的影响,可提高对驱动空间变异的影响因素的认识,最终有助于理解和管理土壤过程,以确保农业生态系统的可持续功能。

地统计学方法作为一种流行的空间异质性分析方法,考虑样本值的大小,关注样本的空间位置和距离,从而解决经典统计学忽视空间方向的局限性。

AZADMARD等<sup>[5]</sup>研究指出,土壤团聚体稳定性分析主要依赖于地统计学方法,特别是克里金插值法;大量研究<sup>[5-7]</sup>报道土壤质地、水分体积分数和有机质的空间异质性,但很少有研究报道 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和K因子的空间变异及其驱动因素的空间变化。环境因素对土壤团聚体稳定性和可蚀性影响的研究已成为该领域的一个重要研究方向。

土壤团聚体和K因子受多种因素控制,包括土壤基本性质(如机械组成、母质和矿物组成)<sup>[6]</sup>、气候条件(由温度和湿度波动导致的干湿交替和冻融循环)<sup>[7]</sup>、生物过程(植物、动物和微生物的分解)<sup>[8]</sup>和人类活动。一般而言,土壤性质对土壤团聚体的形成有直接影响,并且它们还相互影响。除土壤的固有性质外,各种因素往往通过改变土壤的性质来影响团聚体稳定性和K因子。土地利用可改变土壤结构、有机胶结材料和土壤微生物活性,从而使有机质在土壤团聚体中重组和重新分布,最终影响其稳定性。地形通过控制水动力学和土地利用类型来影响土壤团聚体<sup>[9]</sup>。因此,全面定量评价和分析上述因素对土壤团聚体稳定性和可蚀性空间异质性的贡献及其相互作用,对于优化土地管理具有重要意义。现有研究多聚焦于单一因素对土壤团聚体稳定性及K因子的影响,而忽视多因素的交互效应。尽管土壤团聚体稳定性和K因子与环境因子存在较强的相关性,但不同环境因子对其空间变异的相对贡献率尚不明确。

黑滩沟小流域位于青藏高原与黄土高原的重叠

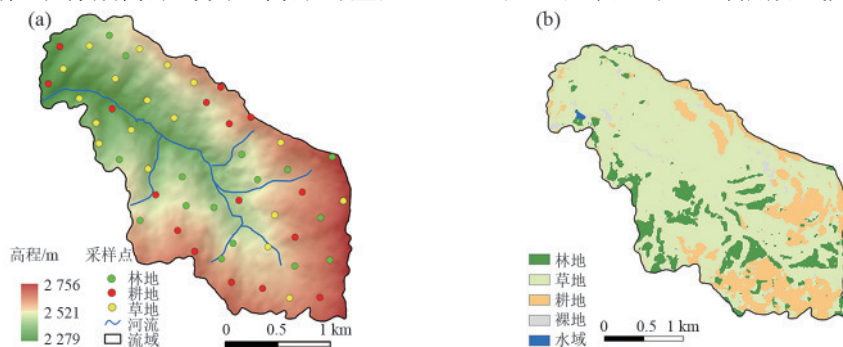


图1 黑滩沟小流域采样点分布与地形土地利用

Fig. 1 Sampling site distribution and topographic land use map of Heitangou small watershed

## 1.2 样点布设与样品采集

基于黑滩沟小流域土地利用类型的空间分布特征及面积比例,科学布设50个采样点,包括林地(16个)、草地(18个)和耕地(16个)。林地主要分布在流域的中部和南部区域;草地主要分布在流域的北部和东部边缘区域,以及部分中部地区;耕地主要分布在流域的东南部和东北部区域。采样区域海拔为2484~2693 m。采样前,先清除地表枯落物层。每个采样点按0~20、20~40 cm分层采集土壤样品。

区。该流域既有黄土高原湿陷性黄土的疏松土质,同时兼具青藏高原的高寒气候,是高寒黄土区的典型代表。林地、草地和耕地是该流域最常见的土地利用类型,由于经济的发展,部分草地被开垦为耕地,土地开垦改变土壤性质,土壤孔隙结构和团聚体稳定性的相应变化。本研究以黑滩沟小流域为高寒黄土区典型小流域的代表,分析土壤团聚体稳定性空间变化规律及其与环境因子的关系,以期达到的目的为:1)分析小流域土壤团聚体稳定性指标 $>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ )、平均重量直径(MWD)和土壤可蚀性(K)的空间变异特征;2)比较不同土地利用类型土壤团聚体稳定性和可蚀性差异;3)识别影响高寒区小流域土壤团聚体稳定性( $WSA_{>0.25}$ 、MWD)和土壤可蚀性(K)空间分布特征主控因子并明确其贡献率。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原与黄土高原交界地带的大通县黑滩沟小流域( $36^{\circ}45' \sim 36^{\circ}75'N$ ,  $101^{\circ}47' \sim 101^{\circ}78'E$ ),总面积约为475.3  $km^2$ 。该流域海拔为2400~3000 m(图1),地貌类型多样,以山地丘陵为主,属于西北黄土高原的过渡区域。气候类型为高原大陆性气候,年平均气温4.9  $^{\circ}C$ ;降水多集中于6—9月,年平均降雨量为429.6 mm。区域内土壤主要为山地栗钙土,质地以粉质黏土、粉质黏壤土、黏壤土和黏土为主(图2)。常见的土地利用方式为林地、草地和耕地。

采用内径9 cm的土钻获取各层土样,分装于10 cm铝盒中,用于分析土壤团聚体组成、有机碳及球囊霉素分数测量,共计100份样品;使用相同规格的根钻采集同深度土样,保存于自封袋中以测定根系生物量。采样工作于2023年10月开始,同步记录样点经纬度、海拔及地表覆盖信息。

### 1.3 指标测定

土壤团聚体使用湿筛法<sup>[10-11]</sup>测定。将野外采集的原状土中的小石块和根等杂质去除,沿土壤自身纹理

结构将其轻轻掰至直径 10 mm 左右的团块,随后在通风环境下自然干燥,取 100 g 预处理样品用于分析。通过湿筛法分离取得粒径为  $>0.25$ 、 $0.25\sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm 的团聚体组分。 $>0.25$  mm 土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ ,%)计算公式为:

$$WSA_{>0.25} = \frac{M_{w>0.25}}{MA} \times 100\% \quad (1)$$

土壤团聚体平均重量直径(MWD,mm)计算公

$$K_{epic} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{SAN} \left( 1.0 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left[ \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0.3} \times \left[ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[ 1.0 - \frac{0.7 \text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SNI})} \right] \quad (3)$$

$$K = -0.0138 + 0.51575 K_{epic} \quad (4)$$

式中:SAN 为砂粒(0.05~2.0 mm)占比,%;SIL 为粉粒(0.002~0.05 mm)占比,%;CLA 为黏粒( $<0.002$  mm)占比,%;C 为有机碳质量分数,%;SNI=1-SAN/100。

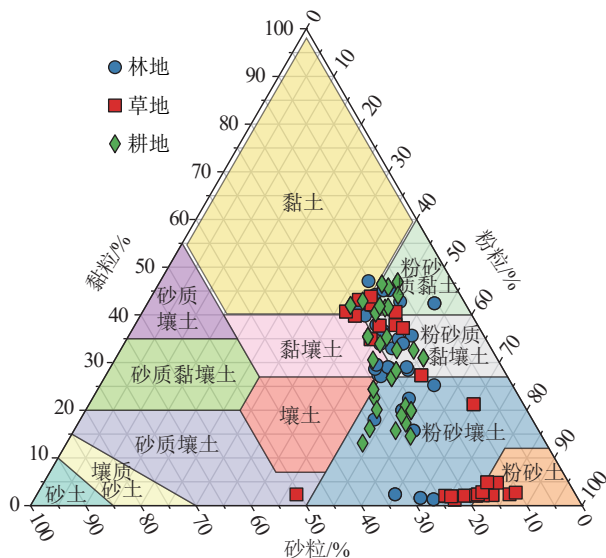


图 2 黑滩沟小流域土壤质地分类

Fig. 2 Soil texture classification of Heitangou small watershed

采用重铬酸钾外加热氧化法( $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ )测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)<sup>[14]</sup>。土壤颗粒组成采用 Mastersizer 3000 激光粒度仪(Malvern Instruments, Malvern, 英国)进行测定。球囊霉素相关土壤蛋白采用考马斯亮蓝法测定<sup>[15]</sup>,通过浓度-吸光值方程计算土壤中总球囊霉素(T-GRSP, TG)和易提取球囊霉素(EE-GRSP, EEG)的分数。土壤 pH 采用电位法测定,风干土:水为 1:2.5 的悬浮液中用 pH 计测定。采用 1 mm 筛网对原状土样进行流水冲洗,筛选出直径超过 1 mm 的根系,经 65 °C 恒温烘干后称量其重量,以此测定根系生物量/根重(root weight, RW)。

式为<sup>[12]</sup>:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (2)$$

式中: $M_{w>0.25}$ 为湿筛后 $>0.25$  mm 粒径团聚体重量总和,g;MA 为湿筛后土壤各粒级重量的总和,g; $x_i$ 为第  $i$  级的团聚体平均直径,mm; $w_i$ 为第  $i$  级团聚体质量分数,%。

土壤可蚀性 K 值计算公式<sup>[13]</sup>:

#### 1.4 环境因子提取

本研究中的环境因素主要包括土壤因子、地形因子和植被因子。地形数据和归一化植被指数通过地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)获得黑滩沟小流域 30 m×30 m 分辨率的数字高程模型(DEM),从 DEM 数据中提取指标包括坡向(SA)、坡度(SG)、坡长(SLF)、横向曲率(CC)、纵向曲率(LC)、汇流累积量(FA)、地形湿度指数(TWI)和归一化植被指数(NDVI)。

#### 1.5 数据分析与处理

土地利用类型为分类变量,用数字进行编码(1=林地、2=草地、3=耕地)。分析前进行数据正态分布和方差齐性检验。采用 Excel 2021 和 SPSS 27 软件对土壤团聚体稳定性指标  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 及 K 进行描述性统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、邓肯法比较不同土地利用类型对三者的影响差异。采用皮尔逊(Pearson)相关性分析、半方差函数、冗余分析(RDA)和结构方程模型分析小流域  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 及 K 的空间结构特征,探究  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 及 K 与各环境因子间的关系及影响三者的主要驱动因素。半方差函数用于分析三者的空间变异性,数据经满足正态分布,并在 GS+5.0 软件完成,在 ArcGIS 10.5 软件应用克里金插值法构建预测空间分布模型,并通过交叉验证优化半方差函数参数。结构方程模型(SEM)通过 R 4.3.3 软件完成,结果绘图在 Origin 2024 和 ArcGIS 10.5 软件实现。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体稳定性和可蚀性指标的描述性统计

在 0~20 cm 土层, $>0.25$ 、 $<0.053$  mm 的团聚体占主导地位,其平均值分别为 45.453%、32.218%;在 20~40 cm 土层, $>0.25$ 、 $<0.053$  mm 的团聚体同样占主导

地位,其平均值分别为 31.637%、43.295%。 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和K的平均值在0~20 cm土层分别为45.453%、0.554 mm和0.041 (t·h)/(MJ·mm);在20~40 cm土层分别为31.637%、0.405 mm和0.043 (t·h)/(MJ·mm)。0~20 cm土层中 $WSA_{>0.25}$ 的变异系数为35.656%,

呈中等变异;MWD的变异系数为31.713%,呈中等变异;K的变异系数为9.230%,呈弱变异;20~40 cm土层中 $WSA_{>0.25}$ 的变异系数为55.209%,呈中等变异;MWD的变异系数为46.504%,呈中等变异;K的变异系数为11.523%,呈中等变异(表1)。

表 1 黑滩沟小流域土壤团聚体稳定性和可蚀性指标

Table 1 Soil aggregate stability and erodibility indicators in Heitangou small watershed

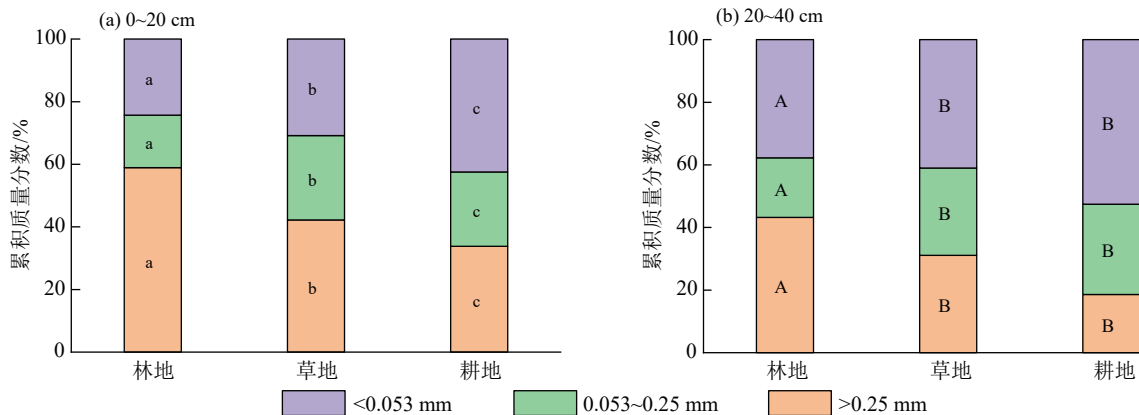
指标	土层深度/cm	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
$>0.25$ mm/%	0~20	13.921	79.090	45.435	16.195	35.645
	20~40	6.142	68.724	31.637	17.466	55.209
0.053~0.25 mm/%	0~20	8.481	55.246	22.314	10.588	47.450
	20~40	9.178	72.724	25.068	12.658	50.493
$<0.053$ mm/%	0~20	8.930	71.966	32.218	17.298	53.691
	20~40	10.820	79.164	43.295	18.815	43.458
$WSA_{>0.25}$ /%	0~20	13.921	79.090	45.453	16.207	35.656
	20~40	6.142	68.724	31.637	17.466	55.209
MWD/mm	0~20	0.199	0.909	0.554	0.176	31.713
	20~40	0.112	0.800	0.405	0.189	46.504
$K/(t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1})$	0~20	0.037	0.054	0.041	0.004	9.230
	20~40	0.037	0.063	0.043	0.005	11.523

注: $>0.25$  mm、0.053~0.25 mm、 $<0.053$  mm、 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和K分别为大团聚体、微团聚体、粉黏粒、 $>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数、土壤团聚体平均重量直径和可蚀性因子。下同。

2.2 不同土地利用  $WSA_{>0.25}$ 、MWD和K的差异

0~20 cm土层,林地的大团聚体( $>0.25$  mm)比例显著高于草地和耕地的大团聚体比例,草地的大团聚体比例显著高于耕地的大团聚体比例。林地的微团聚体( $<0.053$  mm)比例显著低于草地和耕地;

耕地的粉黏粒(0.053~0.25 mm)比例显著高于林地和草地( $p < 0.05$ )。20~40 cm土层,林地的大团聚体比例显著高于草地和耕地的大团聚体比例,草地的大团聚体比例与耕地无显著差异( $p > 0.05$ );微团聚体与粉黏粒与0~20 cm土层的规律一致(图3)。



注:不同小写字母表示不同土地利用类型0~20 cm土层差异显著( $p < 0.05$ );不同大写字母表示不同土地利用类型20~40 cm土层差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 3 不同土地利用类型土壤团聚体粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of soil aggregates under different land use types

由图4可知,不同土地利用类型的土壤团聚体稳定性存在显著差异( $p < 0.05$ ),在0~20、20~40 cm土层,耕地的 $WSA_{>0.25}$ 显著低于草地,草地的 $WSA_{>0.25}$ 显著低于林地( $p < 0.05$ );在0~20、20~40 cm土层,耕地的MWD显著低于草地,草地的MWD显著低于林地( $p < 0.05$ );在0~20、20~40 cm土层,耕地的K显著略高于林地( $p < 0.05$ )。

2.3 土壤团聚体稳定性和可蚀性的空间异质性

由图5、表2可知,0~20、20~40 cm土层的

$>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ )、土壤团聚体平均重量直径(MWD)和可蚀性因子(K)的最佳半方差模型均为指数模型(exponential model)。不同土层土壤 $WSA_{>0.25}$ 的 $R^2$ 为0.60~0.75,MWD的 $R^2$ 为0.54~0.82,K的 $R^2$ 为0.59~0.68。不同土层土壤 $WSA_{>0.25}$ 的空间异质性比 $C0/(C0+C)$ 为0.04%~0.24%, $<25%$ ,并且随土层深度的增加而降低,说明黑滩沟小流域 $>0.25$  mm土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ )由弱的

空间自相关向强的自相关变化,但随着土层深度增加,空间分布相关性增加,表明黑滩沟小流域  $WSA_{>0.25}$  空间变异程度主要由土壤母质、地形和土壤基本性质等结构性因素的差异起主要作用。不同土层土壤 MWD 的空间异质性比  $C0/(C0+C)$  为 0.21%~21.65%、 $<25\%$ ,并且随土层深度的增加而增加。说明黑滩沟小流域土壤 MWD 有较强的空间自相关,但随着土层深度增加,空间分布相关

性有所降低,整体处于较强的空间自相关性,表明黑滩沟小流域 MWD 空间变异受人类活动等随机因素影响较小,受地形等结构性因素影响较大。不同土层土壤  $K$  的空间异质性比  $C0/(C0+C)$  为 48.27%~46.70%,属于中等强度的空间自相关性,表明黑滩沟小流域土壤  $K$  空间变异受土壤基本性质、地形和气候等结构性因素和施肥、耕作等随机性因素共同影响。

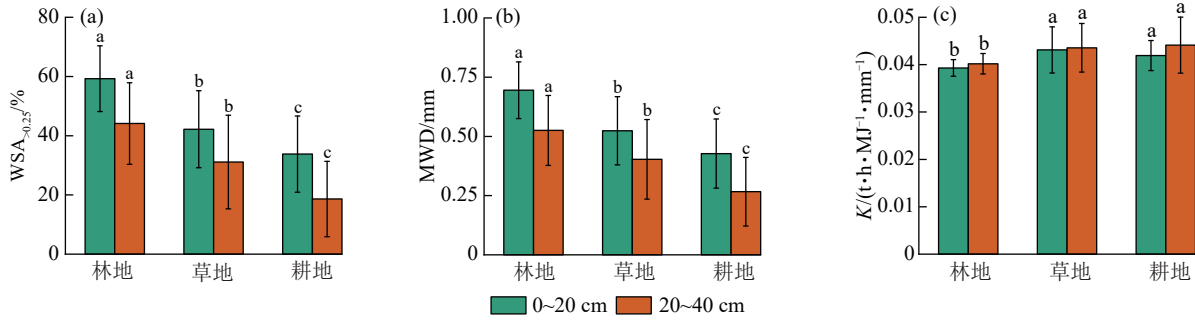


图 4 土地利用类型对团聚体稳定性和可蚀性的影响

Fig. 4 Influence of Land use types on aggregate stability and erodibility

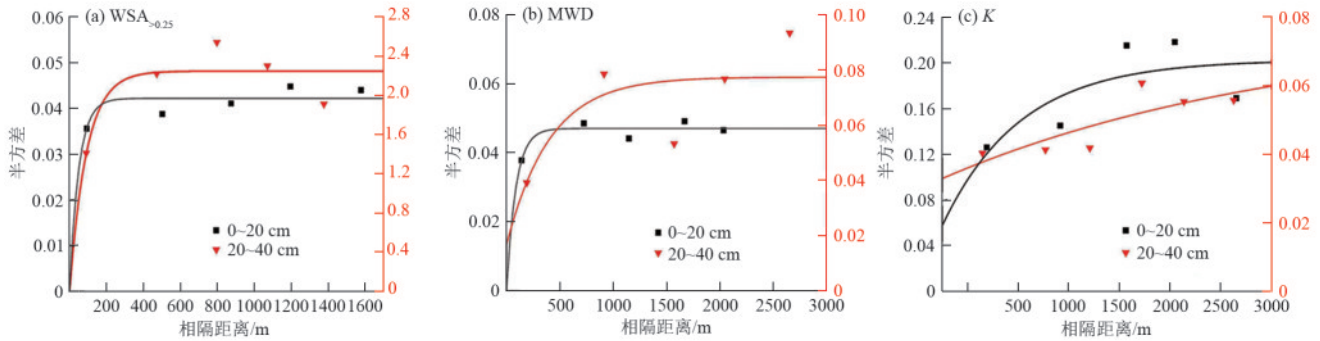


图 5 土壤团聚体稳定性和可蚀性的半方差模型

Fig. 5 Semivariance model of soil aggregate stability and erodibility

表 2 土壤团聚体稳定性和可蚀性的半方差模型描述参数

Table 2 Descriptive parameters of semivariance model of soil aggregate stability and erodibility

变量	土层深度/cm	模型	块金值	基台值	块基比	变程/km	决定系数 ( $R^2$ )
			(C0)	(C0+C)	$[C0/(C0+C)]/\%$		
$WSA_{>0.25}$	0~20	指数模型	0.000 1	0.042 2	0.24	0.15	0.605
	20~40	指数模型	0.001 0	2.247 0	0.04	0.28	0.731
MWD	0~20	指数模型	0.000 1	0.047 0	0.21	0.26	0.816
	20~40	指数模型	0.016 8	0.077 3	21.65	1.21	0.555
$K$	0~20	指数模型	0.097 7	0.202 4	48.27	2.32	0.591
	20~40	指数模型	0.036 0	0.077 1	46.70	10.39	0.672

表 3 为普通克里金插值在土壤团聚体稳定性和可蚀性的适用性,MAE 和 RMSE 是预测精度的量度,其值越小,则说明插值方法越精确<sup>[16]</sup>。 $WSA_{>0.25}$ 、MWD 和  $K$  的 MAE 分别为 11.364%、0.122、0.004, RMSE 的值分别为 14.327%、0.148、0.007,  $R^2$  分别为 0.411、0.440、0.300,表明普通克里金插值具有适用性。黑滩

沟小流域不同土层深度的  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 和  $K$  的空间分布(图 6)表明,  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 高的地区主要集中在流域的西南和东南方向,多为林地和草地覆盖;  $WSA_{>0.25}$ 、MWD 低的地区主要集中分布在流域的北部,多为耕地边坡;  $K$  高的地区主要集中分布在东北部方向,为耕地边坡。

表 3 土壤团聚体稳定性和可蚀性的普通克里金交叉验证  
Table 3 Ordinary Kriging cross validation of soil aggregate stability and erodibility

参数	Parameter	WSA <sub>&gt;0.25</sub> /%	MWD/mm	K/(t·h·MJ <sup>-1</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
绝对误差百分比	AEP/%	29.482	25.390	9.549
平均绝对误差	MAE	11.364	0.122	0.004
均方根误差	RMSE	14.327	0.148	0.007
决定系数	R <sup>2</sup>	0.411	0.440	0.300

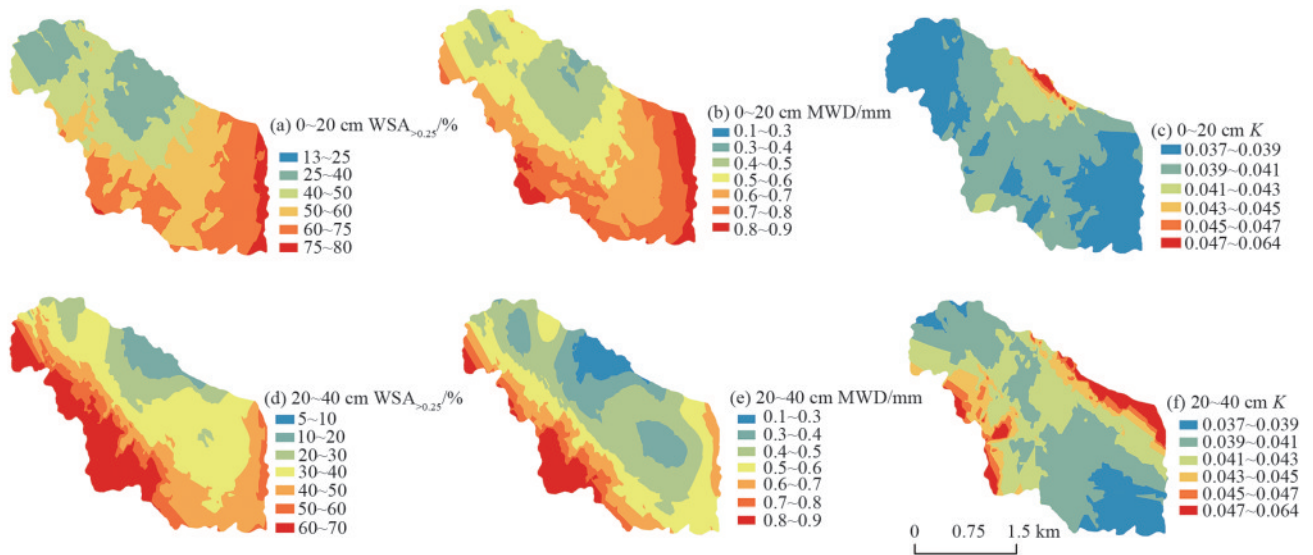


图 6 土壤团聚体稳定性和可蚀性的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of soil aggregate stability and erodibility

2.4 影响因素

2.4.1 土壤团聚体稳定性和可蚀性与环境因素的相关性 由表4可知,在0~20 cm 土层深度中 WSA<sub>>0.25</sub> 与有机碳、粉粒、总球囊霉素、海拔、剖面曲率和根重呈显著正相关,与酸碱度和土地利用类型呈显著负相关( $p < 0.05$ )。MWD 与有机碳、粉粒、总球囊霉素、海拔、剖面曲率和根重呈显著正相关,与黏粒、酸碱度和土地利用类型呈显著负相关( $p < 0.05$ )。K 与粉粒、归一化植被指数和土地利用类型呈显著正相关,与黏粒、易提取球囊霉素、坡度和横向曲率呈显著负相关( $p < 0.05$ )。在 20~40 cm 土层,WSA<sub>>0.25</sub> 与有机碳、总球囊霉素、海拔、坡度、剖面曲率和根重呈显著正相关,与酸碱度和土地利用类型呈显著负相关( $p < 0.05$ )。MWD 与有机碳、总球囊霉素、海拔、坡度、剖面曲率和根重呈显著正相关,与酸碱度和土地利用类型呈显著负相关( $p < 0.05$ )。K 与粉粒、归一化植被指数和土地利用类型呈显著正相关,与黏粒、易提取球囊霉素、根重和剖面曲率呈显著负相关( $p < 0.05$ )。

2.4.2 影响因素的贡献 冗余分析结果(图 7)表明,前 2 个轴分别占总土壤团聚体稳定性和可蚀性变化的 73.48%、58.60%,其中第 1 轴在 0~20、20~40 cm 土层中分别占 51.41%、45.90%。由表 5

可知,RDA 中环境变量对土壤团聚体稳定性和可蚀性指标的解释率是影响土壤团聚体稳定性和可蚀性指标的重要环境变量。其中,Land use、NDVI 和 Silt 对 0~20 cm 土层土壤团聚体稳定性和可蚀性解释率分别为 32.1%、17.3%、6.3%。在 20~40 cm 土层中,土壤团聚体稳定性和可蚀性的变化主要受土地利用类型(Land use)和粉粒(Silt)的影响,贡献率分别为 31.5%、6.0%。

2.4.3 影响因素的影响路径和机制 图 8 为影响因素通过直接或间接对土壤团聚体稳定性和可蚀性因子的作用路径及贡献系数。通过逐步回归分析得出,所选环境因子对 WSA<sub>>0.25</sub>、MWD 和 K 的解释率分别为 50%、50%、44%。剖面曲率(LC)和土地利用类型(Land use)对 WSA<sub>>0.25</sub> 和 MWD 的影响最大,而归一化植被指数(NDVI)对 K 的影响最大。

土地利用类型(Land use)、土壤有机碳(SOC)和砂粒(Sand)对 WSA<sub>>0.25</sub> 均产生显著影响,其中土地利用类型(Land use)和砂粒(Sand)为显著负向影响,SOC 为显著正向影响;地形因子(剖面曲率)对 WSA<sub>>0.25</sub> 的影响主要通过土地利用类型(Land use)和根重(RB)的影响传递,地形因子(剖面曲率)对 WSA<sub>>0.25</sub> 的间接影响最大;土地利用类型(Land use)和粉粒(Silt)对 MWD 均产生显著影响,其中土

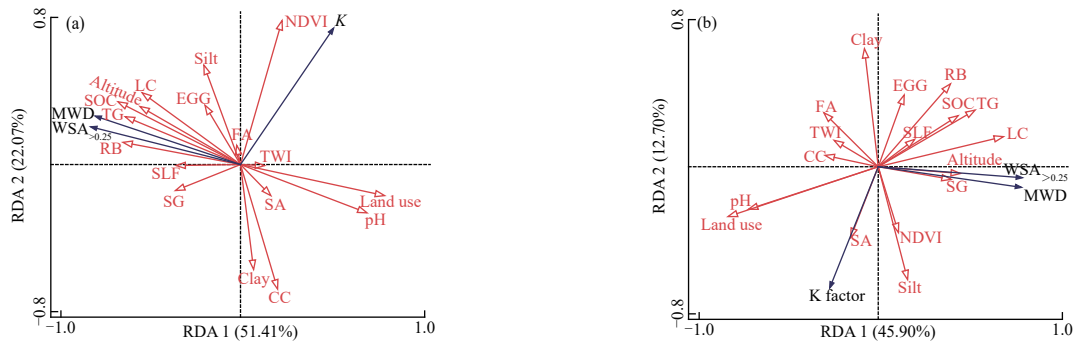
地利用类型(Land use)为显著负向影响,Silt为显著正向影响;黏粒(Clay)和归一化植被指数(NDVI)对 WSA 均产生显著影响,其中黏粒(Clay)为显著负向影响,NDVI为显著正向影响。

表 4 黑滩沟小流域土壤团聚体稳定性和可蚀性与环境变量的相关性

Table 4 Correlation between soil aggregate stability and erodibility and environmental variables in Heitangou small watershed

影响因子	变量	0~20 cm			20~40 cm		
		WSA <sub>&gt;0.25</sub>	MWD	K	WSA <sub>&gt;0.25</sub>	MWD	K
土壤因子	有机碳	0.632**	0.632**	-0.128	0.384**	0.372**	-0.224
	黏粒	-0.216	-0.248*	-0.393**	-0.052	-0.078	-0.287*
	粉粒	0.287*	0.317**	0.336**	0.125	0.153	0.283*
	砂粒	-0.105	-0.091	0.231	-0.157	-0.154	0.097
	总球囊霉素	0.562**	0.557**	-0.164	0.491**	0.489**	-0.141
	易提取球囊霉素	0.156	0.139	-0.251*	0.187	0.160	-0.350**
	酸碱度	-0.594**	-0.593**	0.120	-0.512**	-0.506**	0.177
地形因子	海拔	0.446**	0.453**	0.001	0.265*	0.267*	-0.035
	坡度	0.201	0.175	-0.388**	0.344**	0.335**	-0.192
	坡向	-0.197	-0.196	0.056	-0.114	-0.092	0.277*
	汇流累积量	0.017	0.030	0.162	-0.195	-0.185	0.171
	横向曲率	-0.179	-0.213	-0.411**	-0.103	-0.104	0.022
	剖面曲率	0.452**	0.459**	-0.001	0.438**	0.424**	-0.275*
	坡长因子	0.206	0.198	-0.148	0.184	0.174	-0.161
	地形湿度指数	-0.060	-0.057	0.052	-0.151	-0.145	0.129
植被因子	根重	0.488**	0.482**	-0.194	0.319*	0.295*	-0.323*
	归一化植被指数	0.058	0.104	0.603**	0.068	0.096	0.301*
土地利用因子	土地利用类型	-0.649**	-0.637**	0.299*	-0.601**	-0.584**	0.338**

注:\*表示  $p < 0.05$ ; \*\*表示  $p < 0.01$ 。



注: SOC、Clay、Silt、Sand、TG、EEG、pH、Altitude、SG、SA、FA、CC、LC、SLF、TWI、RB、NDVI 和 Land use 分别为有机碳、黏粒、粉粒、砂粒、总球囊霉素、易提取球囊霉素、酸碱度、海拔、坡度、坡向、汇流累积量、横向曲率、剖面曲率、坡长因子、地形湿度指数、根重、归一化植被指数和土地利用类型。

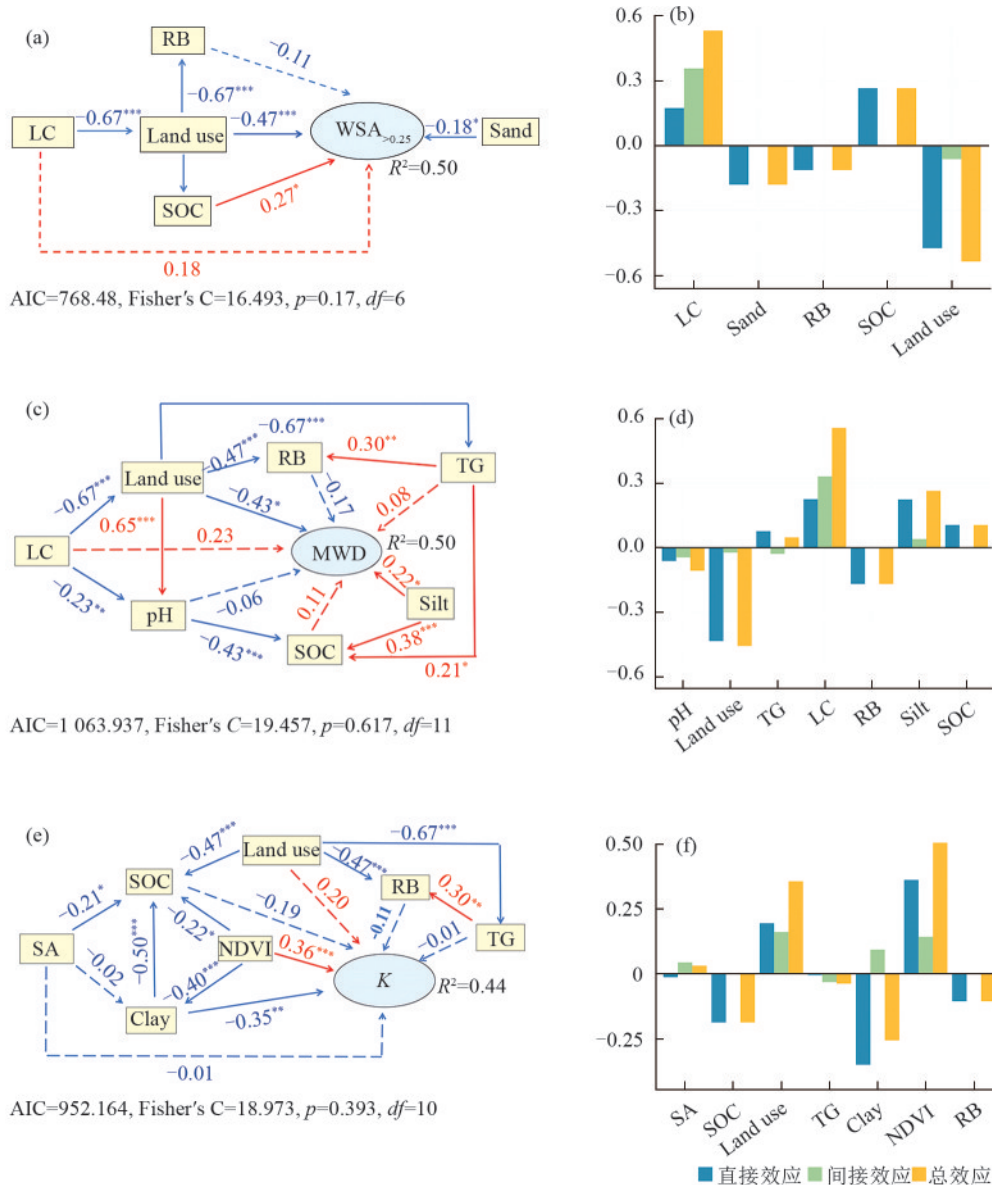
图 7 土壤团聚体稳定性和可蚀性指标与环境变量相关性

Fig. 7 Correlation between soil aggregate stability and erodibility indicators and environmental variables

表 5 冗余分析(RDA)中环境变量对土壤团聚体稳定性和可蚀性指标的解释率

Table 5 Explanatory power of environmental variables on soil aggregate stability and erodibility indicators in redundancy analysis (RDA)

变量	0~20 cm		变量	20~40 cm	
	解释变异量/%	p		解释变异量/%	p
土地利用类型	32.1	0.002**	土地利用类型	31.5	0.002**
归一化植被指数	17.3	0.002**	粉粒	6.0	0.040*
粉粒	6.3	0.016*	汇流累积量	3.8	0.106
纵向曲率	3.5	0.070	根重	3.2	0.164
黏粒	3.0	0.084	纵向曲率	2.4	0.240
有机碳	2.0	0.190	有机碳	1.6	0.342



注:箭头方向表示因果关系,实线表示关系显著,虚线表示关系不显著;各影响因素的相互作用通过标准化路径系数进行量化表征;R<sup>2</sup>表示自变量对因变量总变化的解释;\*表示p<0.05,\*\*表示p<0.01,\*\*\*表示p<0.001。

图 8 环境因素对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响路径

Fig. 8 Path analysis of the influence of environmental factors on soil aggregate stability and erodibility

### 3 讨论

#### 3.1 土壤团聚体稳定性和可蚀性的空间变化

本研究中,林地与草地的土壤团聚体稳定性(WSA<sub>>0.25</sub>和MWD)显著高于耕地,且随着土层深度增加,土壤团聚体稳定性降低;而耕地的土壤可蚀性(K)显著高于林地和草地,且随着土层深度增加,土壤可蚀性增加。表明土地利用类型对土壤团聚体稳定性和可蚀性具有显著影响。该结果与众多已有研究相似,如ANNABI等<sup>[4]</sup>在突尼斯农业区域的研究发现,不同土地利用类型下土壤团聚体稳定性存在显著差异,且自然植被覆盖区域(类似本研究中的林地和草地)的土壤团聚体稳定性更高。此差异主要源于不同土地利用方式下的植被覆盖、根系活动及

人类干扰程度。林地植被丰富、根系发达,凋落物较多,微生物活动旺盛,有助于大团聚体的形成和稳定;草地虽然根系相对林地较浅,但植被覆盖度较高,也能在一定程度上维持土壤团聚体结构。而耕地由于频繁的耕作活动,如翻耕、施肥等,破坏土壤原有的团聚体结构,使大团聚体破碎成更多细小颗粒,同时耕地植被覆盖度相对较低,对土壤的保护作用较弱,耕地土壤抗侵蚀能力降低<sup>[17]</sup>。

变异系数是衡量样本变异程度的重要指标,能够有效区分元素的来源是自然成因还是人为影响。通常情况下,变异系数较低的元素主要来源于本地背景值,表明其分布较为均匀且受外界干扰较小;而变异系数较高的元素则往往与强烈的人为活动密切

相关,暗示其分布受到显著的外部干预。因此,变异系数的大小可作为判断元素来源及其受人为影响程度的重要依据<sup>[18]</sup>。在本研究中, $>0.25$  mm 土壤水稳定性团聚体质量分数( $WSA_{>0.25}$ )和土壤团聚体平均重量直径(MWD)在该流域呈中等变异,表明土壤的团聚体稳定性可能受到农业管理措施、土地利用方式、耕作干扰、施肥、放牧等人类活动和本地背景值的共同影响。土壤可蚀性( $K$ )在该流域呈现弱度到中等变异( $CV=9\% \sim 12\%$ ),表明其在空间分布上较为均匀。原因可能是土壤可蚀性( $K$ )主要受土壤质地和有机质质量分数的影响,如果该因素在空间上分布均匀, $K$ 的变异系数较低<sup>[13]</sup>。

该流域土壤团聚体稳定性的空间分布格局为 $WSA_{>0.25}$ 、MWD高的地区主要集中分布在流域的西南和东南方向,多为林地和草地覆盖, $WSA_{>0.25}$ 、MWD低的地区主要集中分布在流域的东北方向,多为耕地边坡。可能是因为植被发达的根系网络和活跃的微生物活动能够促进有机物质的积累,从而增强土壤团聚体的稳定性<sup>[19]</sup>。相比之下,流域东北部地区以坡耕地为主,频繁的耕作活动及较低的地表植被覆盖度削弱土壤团聚体的稳定性<sup>[20]</sup>。

### 3.2 土壤团聚体稳定性和可蚀性空间变异驱动因素

3.2.1 土壤因子的影响 本研究发现,土壤有机碳(SOC)与该土壤团聚体稳定性呈显著正相关(表4),表明SOC可有效促进土壤大团聚体形成,增强土壤团聚体稳定性,提高土壤的抗侵蚀能力。原因主要包括:1)SOC是团聚体的主要胶结物质,SOC质量分数越高,将提高土壤团聚体稳定性,改善土壤结构,增强土壤的抗侵蚀能力。2)土壤有机碳为微生物提供丰富的碳源,促进微生物的生长和代谢活动。微生物分泌的胞外聚合物(EPS)和其他代谢产物可作为天然的黏合剂,增强土壤颗粒的结合力,从而促进团聚体的形成和稳定性<sup>[21]</sup>。3)SOC能够减少土壤颗粒在湿润条件下的分散性,增强团聚体的稳定性<sup>[22]</sup>。

土壤总球囊霉素(TG)与土壤团聚体稳定性呈显著正相关,ZHANG等<sup>[23]</sup>和SPOHN等<sup>[24]</sup>的研究也得出一致结果。原因可能由于球囊霉素是由丛枝菌根真菌(AMF)产生的糖蛋白,具有很强的黏结作用,可将土壤颗粒紧密结合在一起,从而形成稳定的团聚体结构。该黏结作用不仅有助于大团聚体的形成,还能增强团聚体的水稳性,提高土壤的抗侵蚀能力。EGG与土壤可蚀性呈显著负相关,表明易提取球囊霉素(EGG)具有很强的黏结作用,能够在湿润条件下保持土壤团聚体的稳定性,减少土壤颗粒的分散。球囊霉素的存在能够改善土壤的结构性质,

增加土壤孔隙度,提高土壤通气性和透水性,进一步减少水分在土壤中的滞留时间,降低土壤饱和度,从而减少土壤侵蚀的风险。

土壤酸碱度(pH)与土壤团聚体稳定性呈显著负相关,该结果可能由于pH增大可能减少钙离子、镁离子等多价阳离子的有效性,阳离子在胶体间起桥接作用,促进团聚体形成<sup>[25]</sup>。土壤黏粒(Clay)与土壤可蚀性( $K$ )呈显著负相关(表4、图8e),ZHU等<sup>[26]</sup>和陈英等<sup>[27]</sup>的研究也得出一致结果,原因可能是黏土颗粒易于与土壤有机物质结合形成水稳性团聚体,从而降低土壤颗粒的分离能力,提高土壤的抗侵蚀性。

3.2.2 植被因子的影响 本研究发现,植被因子中根系生物量(RB)与土壤团聚体稳定性呈显著正相关,RB与土壤可蚀性呈显著负相关(表4);20~40 cm土层中,归一化植被指数(NDVI)对土壤团聚体稳定性( $WSA_{>0.25}$ 、MWD)和土壤可蚀性( $K$ )有显著影响(表5),且NDVI对 $K$ 有显著正影响(图8e),表明地上生物量和地下生物量的增加将有力促进土壤大团聚体的形成,从而提高团聚体稳定性,提高土壤的抗侵蚀能力。赫好鑫<sup>[28]</sup>研究发现,枯落量、植被覆盖度、根重密度和细根长密度等与土壤团聚体稳定性具有显著正相关,主要是因为:1)植物根系在土壤中生长时,能够缠绕土壤颗粒,促进大团聚体的形成。2)根系死亡和分解后转化为土壤有机质,进一步促进团聚体的形成和稳定。3)凋落物分解过程中,微生物活动增强,分泌的多糖和其他胶结物质能够促进团聚体的形成。

3.2.3 土地利用类型的影响 土地利用类型对 $WSA_{>0.25}$ 、MWD和 $K$ 的影响途径存在显著差异,是由于土地利用变化改变土壤性质对环境的响应,进而影响土壤可蚀性<sup>[29]</sup>。农田和耕地,由于缺少地表覆被,表层土壤直接暴露在雨水中,容易受到雨水溅蚀和径流冲刷。频繁地翻耕活动降低表层土壤的稳定性,增加土壤侵蚀性<sup>[30-31]</sup>。林地比其他2种土地利用类型表现出更高的团聚体稳定性和较低的可蚀性(图4),是因为林地植被覆盖丰富,枯枝落叶相对较多。有机物覆盖不仅能有效截留雨水,减少直接冲刷土壤的力量,还能增强土壤结构的稳定性。枯枝落叶逐渐分解后增加土壤中的有机质,进一步改善土壤的持水能力和渗透性,从而有效地降低土壤侵蚀性<sup>[30-32]</sup>。

3.2.4 地形因子的影响 本研究发现,海拔、坡度和剖面曲率与土壤团聚体稳定性呈显著正相关,坡度、横向曲率和剖面曲率与可蚀性呈显著负相关,坡向与可蚀性呈显著正相关;有研究<sup>[33]</sup>发现,表层土壤的团聚体稳定性随着海拔升高逐渐增强,可能是由于高海拔地

区的土壤黏粒较高、毛管孔隙度较高及具有较丰富的植被类型,增加土壤有机碳和全氮,有利于土壤水分保持和微生物活动,从而促进团聚体稳定性和土壤抗侵蚀能力;WANG等<sup>[34]</sup>对黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性研究表明,坡度形状通过改变径流能量分布,从而影响土壤侵蚀,缓坡区域的土壤可蚀性更低。

尽管本研究揭示黑滩沟小流域土壤团聚体稳定性和可蚀性的空间变异特征及其驱动因素,但仍存在一些局限性;首先,研究区域相对较小,且主要集中在高寒黄土区,未来研究可扩展到更大范围的不同气候和土壤类型区域,以验证本研究结果的普适性;其次,本研究主要基于静态的土壤采样数据,未来可考虑长期定位观测,以揭示土壤团聚体稳定性和可蚀性的动态变化过程;最后,本研究主要关注土壤理化性质、地形因子和植被因子对团聚体稳定性和可蚀性的影响,未来可以进一步探讨微生物群落和土壤酶活性等生物因素的作用。

#### 4 结论

1)该流域 $WSA_{>0.25}$ 和MWD呈中等变异;0~20 cm土层 $K$ 呈弱变异,20~40 cm土层 $K$ 呈中等变异。 $WSA_{>0.25}$ 和MWD表现为林地>草地>耕地, $K$ 表现为耕地/草地>林地。

2)在空间上, $WSA_{>0.25}$ 和MWD表现出较强的空间自相关性, $K$ 表现出中等的空间自相关性。 $WSA_{>0.25}$ 和MWD在西南和东南多为林地和草地覆盖的流域较高,北部耕地边坡流域较低,在 $WSA_{>0.25}$ 和MWD较高的区域, $K$ 较低。

3)土地利用类型(Land use)、有机碳(SOC)、砂粒(Sand)、粉粒(Silt)、黏粒(Clay)和归一化植被指数(NDVI)主导着土壤团聚体稳定性和可蚀性的主要影响因素。

#### 参考文献:

- [1] PENG X H, HORN R, HALLETT P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter and scale matter[J].*Soil and Tillage Research*,2015,146:1-3.
- [2] DONG L B, LI J W, ZHANG Y, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau[J].*Journal of Environmental Management*,2022,302:e113985.
- [3] CHEN Z X, GUO M M, WANG W L, et al. Response of soil erodibility of permanent gully heads to revegetation along a vegetation zone gradient in the loess-table and gully region of the Chinese Loess Plateau[J].*Science of the Total Environment*,2023,892:e164833.
- [4] ANNABI M, RACLOT D, BAHRI H, et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia[J].*Catena*,2017,153:157-167.
- [5] AZADMARD B, MOSADDEGHI M R, AYOUBI S, et al. Spatial variability of near-saturated soil hydraulic properties in Moghan Plain, north-western Iran[J].*Arabian Journal of Geosciences*,2018,11:e452.
- [6] YU Z H, ZHENG Y Y, ZHANG J B, et al. Importance of soil interparticle forces and organic matter for aggregate stability in a temperate soil and a subtropical soil[J].*Geoderma*,2020,362:e114088.
- [7] GUAN S, AN N, ZONG N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J].*Soil Biology and Biochemistry*,2018,116:224-236.
- [8] MODAK K, BISWAS D R, GHOSH A, et al. Zero tillage and residue retention impact on soil aggregation and carbon stabilization within aggregates in subtropical India [J].*Soil and Tillage Research*,2020,202:e104649.
- [9] ZHANG W C, WU W, LI J W, et al. Climate and topography controls on soil water-stable aggregates at regional scale: Independent and interactive effects [J].*Catena*,2023,228:e107170.
- [10] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J].*Soil Science Society of America Journal*,1986,50(3):627-633.
- [11] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J].*Soil Science Society of America Journal*,2000,64(2):681-689.
- [12] 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.
- [13] ZHANG K L, SHU A P, XU X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J].*Journal of Arid Environments*,2008,72(6):1002-1011.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M].3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press,2000.
- [16] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J].*Plant and Soil*,1998,198:97-107.
- [17] 史文娇,岳天祥,石晓丽,等.土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J].*自然资源学报*,2012,27(1):163-175.
- [18] SHI W J, YUE T X, SHI X L, et al. Research progress in soil property interpolators and their accuracy [J].*Journal of Natural Resources*,2012,27(1):163-175.
- [19] 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.
- [18] 卢鑫,邝荣禧,何跃,等.基于APCS-MLR模型和地统计学相结合的矿区农田土壤砷源解析[J].土壤,2022,54(2):379-384.
- LU X, KUANG R X, HE Y, et al. Source apportionment of arsenic in agricultural soils from a typical mining area based on APCS-MLR model and geostatistics [J]. Soils,2022,54(2):379-384.
- [19] 李睿,江长胜,郝庆菊.缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J].环境科学,2015,36(9):3429-3437.
- LI R, JIANG C S, HAO Q J. Impact of land utilization pattern on distributing characters of labile organic carbon in soil aggregates in Jinyun Mountain [J].Environmental Science,2015,36(9):3429-3437.
- [20] 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.
- YANG R P, GUO X S, LV J F, et al. Affects of distribution and stability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping [J].Journal of Soil and Water Conservation,2010,24(1):252-256.
- [21] 李娜,韩晓增,尤孟阳,等.土壤团聚体与微生物相互作用研究[J].生态环境学报,2013,22(9):1625-1632.
- LI N, HAN X Z, YOU M Y, et al. Research review on soil aggregates and microbes [J].Ecology and Environmental Sciences,2013,22(9):1625-1632.
- [22] BOYLE M, FRANKENBERGER W T, STOLZY L H. The influence of organic matter on soil aggregation and water infiltration [J].Journal of Production Agriculture,1989,2(4):290-299.
- [23] ZHANG S X, LI Q, ZHANG X P, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of northeast China [J].Soil and Tillage Research,2012,124:196-202.
- [24] SPOHN M, GIANI L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils [J].Soil Biology and Biochemistry,2010,42(9):1505-1511.
- [25] 曾全超,李娅芸,刘雷,等.黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J].草地学报,2014,22(4):743-749.
- ZENG Q C, LI Y Y, LIU L, et al. Study on soil aggregate stability and soil erodibility in the grassland vegetation of the Loess Plateau region [J].Acta Agrestia Sinica,2014,22(4):743-749.
- [26] ZHU X L, FU S H, WU Q Y, et al. Soil detachment capacity of shallow overland flow in earth-rocky mountain area of southwest China [J].Geoderma,2020,361:e114021.
- [27] 陈英,魏兴萍,雷珊.青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J].中国岩溶,2020,39(6):836-844.
- CHEN Y, WEI X P, LEI S. Analysis on soil erodibility of different land use types in the Qingmuguan karst valley [J].Carsologica Sinica,2020,39(6):836-844.
- [28] 郝好鑫.侵蚀环境下根系功能性状对土壤保持的影响及机制[D].武汉:华中农业大学,2020.
- HAO H X. The effect and mechanism of root functional traits on soil conservation following the restoration of eroded land [D].Wuhan: Huazhong Agricultural University,2020.
- [29] NZEYIMANA I, HARTEMINK A E, RITSEMA C, et al. Mulching as a strategy to improve soil properties and reduce soil erodibility in coffee farming systems of Rwanda [J].Catena,2017,149:43-51.
- [30] 王硕.沱河流域不同土地利用方式下土壤理化性质及可蚀性研究[D].济南:山东师范大学,2020.
- WANG S. Study on physical and chemical properties and erodibility of soil under different Land use patterns in Beng River basin [D].Jinan: Shandong Normal University,2020.
- [31] 任荣秀,杜章留,孙义亨,等.华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2020,40(19):6991-6999.
- REN R X, DU Z L, SUN Y H, et al. Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of north China [J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(19):6991-6999.
- [32] 季卫英,管丹蓉,宓立峰,等.不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J].水土保持通报,2024,44(6):377-386.
- JI W Y, GUAN D R, MI L F, et al. Effects of different land-use patterns on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen [J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(6):377-386.
- [33] 秦崧悦,吴新亮,褚保森,等.贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素[J].生态学报,2024,44(17):7770-7785.
- QIN S Y, WU X L, CHU B S, et al. Characteristics and influencings of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain [J].Acta Ecologica Sinica,2024,44(17):7770-7785.
- [34] WANG Y X, XU Y Y, YANG H Y, et al. Effect of slope shape on soil aggregate stability of slope farmland in black soil region [J].Frontiers in Environmental Science,2023,11:e1127043.