

## 用人工模拟降雨研究不同土壤类型的产沙特征

仲亚婷<sup>1</sup>, 张文太<sup>2\*</sup>, 李建贵<sup>3</sup>, 黄俊华<sup>1</sup>, 张佩佩<sup>2</sup>, 张少博<sup>3</sup>

(1. 新疆农业大学林学与园艺学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业大学林业研究所, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**以新疆伊宁、玛纳斯县3种土壤类型为研究材料,采用室外人工模拟降雨试验、野外调查采样与土壤样品室内理化性质测定相结合的方法,比较了相同降雨条件下3种类型土壤的坡面侵蚀特征。结果表明:(1)土壤的颗粒组成和有机质含量是影响土壤可蚀性差异的主要因素。土壤中粉粒的含量越高,其含沙量、可蚀性K值愈大,越易发生侵蚀;土壤中粘粒含量越高,土壤含沙量、可蚀性K值越小,越易抵抗侵蚀。(2)相关性分析发现土壤的径流速率和产沙量的相关系数为0.56,没有显著的相关性。(3)土壤的有机质和累积含沙总量相关性分析,发现两者显著相关,相关系数为0.73。(4)通过打破土壤结构体,发现>2 mm结构体土壤中,灰钙土的产流速率、产沙量及可蚀性K值均最小;<2 mm土壤结构体中,棕钙土的产流速率、产沙量及可蚀性K值均最小,且>2 mm土壤结构体比<2 mm结构体的土壤抵抗侵蚀的能力大。

**关键词:**人工模拟降雨;土壤类型;侵蚀特征

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)03-0465-06

### Study on sediment yield characteristics in different soils using simulated rainfall

ZHONG Yating<sup>1</sup>, ZHANG Wentai<sup>2</sup>, Li Jiangu<sup>3</sup>, HUANG Junhua<sup>1</sup>, ZHANG Peipei<sup>2</sup>, ZHANG Shaobo<sup>3</sup>

(1. College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;

2. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;

3. Institute of Forestry, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

**Abstract:** Three soils in Yining County and Manas County were used as study materials. By using outdoor artificial simulated rainfall experiments, a field investigation and sampling as well as determination of physico-chemical properties of soil samples in lab was conducted to compare the erosion characteristics of the three soils. Results showed that: (1) The particle composition and soil organic matter were the main factors influencing the difference in soil erodibility (K). The higher the silt content, the higher the sediment concentration and K value, which meant much easier to cause soil erosion. On the contrast, the higher the clay content in the soil, the smaller the sediment concentration and K value, which meant much easier to produce soil anti-rosion. (2) A correlation analysis showed that the correlation coefficient of runoff rate and sediment yield was 0.56, without a significant difference. (3) The soil organic matter and cumulative total sediment had a significant correlation, with the correlation coefficient of 0.73. (4) By breaking the soil aggregates, we found the three types of soils with >2 mm soil aggregates, runoff rate, sediment yield and K value of Gray calcium soil were all the least; while the soils with <2 mm soil aggregates, runoff rate, sediment yield and K value of Brown calcium soil were all the least. The anti-erosion of the soil with >2 mm soil aggregates was larger than that of the soil with <2 mm soil aggregates.

**Key words:** artificial simulated rainfall; soil types; erosion characteristics

新疆地处欧亚大陆腹地,远离海洋,干旱少雨,生态环境极为脆弱,是全国土壤侵蚀最严重的地区之一。全国各省区水力侵蚀强度分级面积统计显示,

新疆水域流失的总面积已达 $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,水力侵蚀强度属于中等偏强<sup>[1]</sup>。而伊宁、玛纳斯又是自治区土壤流失的重点监督与防护区,本研究以这2个地

收稿日期: 2016-09-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B03)和新疆农业大学大型仪器设备新功能开发项目共同资助。

作者简介: 仲亚婷, 硕士研究生。E-mail: 1396808759@qq.com

\* 通信作者: 张文太, 博士, 副教授。E-mail: zwt@xjau.edu.cn

区为代表,采集土壤样品,研究不同类型土壤的坡面侵蚀特征,对于新疆水土流失的防治和治理工作具有重要的理论和现实作用。

多年来,国内外学者对土壤侵蚀进行了多方面研究。Middleton 比较了密苏里易蚀土壤和古巴不易侵蚀土壤,以及北卡罗来纳的易侵蚀土壤和不易侵蚀土壤,发现以分散状态存在的粉沙加粘粒含量与土壤的可蚀性有明显相关性<sup>[2]</sup>。Bouyoucos 用粘粒率作为土壤可蚀性指标,粘粒率越小土壤越不容易侵蚀<sup>[3]</sup>。Wischmeier 和 Mannering 早在 1969 年就指出,美国农田土壤侵蚀多出现在砂性和粉砂性土壤上<sup>[4]</sup>。

国内众多学者对不同地区土壤产流和侵蚀产沙规律也进行过研究。吴淑安和蔡强国在研究内蒙古东胜地区的土壤抗蚀性时确定了土壤物理化学特性和土壤抗蚀性的关系,并指出土壤颗粒组成是制约土壤抗蚀性的重要因素<sup>[5]</sup>。李勇等在黄土高原地区的研究也表明粗粉粒(0.05~0.01 mm)和砂粒(>0.05 mm)是决定土壤抗侵蚀性能的主导因素之一<sup>[6]</sup>。郭新送等用模拟降雨法比较研究了红壤、棕壤和褐土的泥沙流失特征,表明红壤坡面的产流排水率及径流泥沙浓度显著高于棕壤与褐土坡面<sup>[7]</sup>。张媛静利用不同尺度的放水冲刷试验,对比分析了中国水蚀区主要侵蚀性土壤黄土、黑土、紫色土和红土抵抗侵蚀能力的差异,并根据试验结果计算得出土壤的可蚀性 K 值:黄土>黑土>紫色土>红土<sup>[8]</sup>。史银志采用室内人工模拟降雨的方法揭示了新疆伊宁市北山坡土壤侵蚀特性<sup>[9]</sup>。

分析前人的研究结果,发现不同土壤的抗侵蚀性能主要与自身性质有关,并被认为是影响土壤侵蚀最稳定、最重要的因子,且不同类型的土壤具有不同的抗侵蚀能力。虽然有关土壤侵蚀的研究已经

取得了一些研究成果,但在新疆该领域的研究还不多见,特别是采用模拟降雨法研究土壤侵蚀特征的较少。不同类型土壤颗粒组成、团聚体稳定性以及理化性质等都存在较大差异,导致坡面产流机制也不同,将其产沙规律进行对比研究,对深入了解各种土壤的侵蚀机理非常重要。为此,本研究通过模拟降雨试验,进行相同降雨条件下不同地区 3 种土壤类型坡面侵蚀过程的对比研究,旨在为新疆水土流失研究作一些探索,这对于疆内的水土保持治理和生态环境防护具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

伊宁、玛纳斯县是新疆土壤侵蚀具有代表性的地区,根据新疆土壤特性,选择具有代表性的 3 种土壤。试验灰钙土取自于伊宁,属于大孔隙湿陷性黄土。另 2 种试验土壤皆来源于玛纳斯县。土壤类型为该区分布广泛、水土流失较严重的灰漠土和质地较粗多砾石的棕钙土。

每种土壤取表层(0~15 cm)原状土,取土前将表层杂草铲掉,自然风干后过 2 mm 筛,打破其土壤结构。土壤结构体是土壤的重要组成部分,影响着土壤的许多物理化学性质;其大小和稳定性亦影响着土壤的孔隙性、持水性、通气性和抗蚀性。自然筛分法对 3 种土壤进行分散处理,分别选取 2 mm 筛以上和 2 mm 筛以下的土壤供试,分析>2 mm 结构体土壤与<2 mm 结构体土壤,侵蚀特征的差异。将筛过的土壤样品带回实验室内烘干后进行理化性质的分析,分别测定土壤的机械组成、有机质。土壤的机械组成采用吸管法;有机质采用外加热法。试验土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 试验土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the studied soils

土壤类型 Soil type	过筛(2 mm) Sieve the soil	有机质/g·kg <sup>-1</sup> Organic matter	砂粒/% Sand particle	粉粒/% Silt particle	粘粒/% Clay particle
灰钙土 Gray calcium soil	>2 mm	9.12	58.54	23.26	18.20
灰漠土 Gray desert soil	>2 mm	7.41	60.32	26.57	13.11
棕钙土 Brown calcium soil	>2 mm	10.54	58.81	24.91	16.28
灰钙土 Gray calcium soil	<2 mm	4.55	58.08	31.62	10.30
灰漠土 Gray desert soil	<2 mm	6.83	58.56	26.63	14.81
棕钙土 Brown calcium soil	<2 mm	9.68	50.27	21.60	28.13

### 1.2 试验设计

1.2.1 试验土槽准备 所用土槽为自行设计的钢制槽,其尺寸规格为:长×宽×高=120 cm×40 cm

×20 cm,在土槽径流出口处安装了 V 形钢制径流收集槽收集径流(倒置三角形集流槽)。将处理过的土壤逐次平铺与钢槽里,填土时,采用边填边压

实的方法, 以减小边坡所造成的对入渗、产流和产沙过程的影响。在装填过程中应始终保持表土层土质均匀, 要注意不时踏实土层, 尽量接近于土层在自然状态下的紧实状态, 并减少对土壤的 2 次扰动, 该过程完成后还需让土壤静止一段时间。

**1.2.2 模拟降雨试验设计** 采用便携式全自动垂直下喷式不锈钢人工降雨设备, 此设备是专门为科研试验研制开发的一种喷射型人工模拟仿真降雨设备。降雨高度 2 m, 满足降雨雨滴达到终点速度, 降雨均匀度大于 75%。降雨强度由不同的喷头来控制, 通过连续调整, 把雨强控制在  $36.8 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。模拟降雨试验于 2016 年 8 月在新疆农业大学进行, 降雨历时为  $40 \text{ min}\cdot\text{次}^{-1}$ , 每场降雨时间间隔为 10 min, 试验坡度为 10%。在人工降雨过程中, 应注意观察其产流时间, 自产流 1 min 后, 每隔 4 min 用水桶从集流槽下收集径流量, 200 mL 瓶子从水桶里采集水样, 同时记录每种土壤的初始产流时间以及每 4 min 的产流量, 每场降雨共收集样品 10 个。降雨结束后利用烘干法测其含沙量。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 产沙量的测定** 泥沙量的测定方法采用烘干法测出。

含沙量 = (烘干后重量 - 烧杯重量) / 样本的体积。  
单位为  $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。 (1)

**1.3.2 可蚀性 K 值的估算**

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \times [\text{SIL}/(\text{SLA} + \text{SIL})]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25\text{C}/[\text{C} + \exp(3.72 - 2.95\text{C})]\} \times \{1.0 - 0.7\text{SNI}/[\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SNI})]\} \quad (2)$$

式中: SAN—砂粒 (2~0.1 mm) 含量%, SIL—粉砂 (0.1~0.002 mm) 含量%, SLA—粘粒 (<0.002 mm) 含量%, C—有机碳含量%,  $\text{SNI} = 1 - \text{SAN}/100$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型土壤的径流速率

2 mm 筛以上土壤的径流速率, 在 0~32 min 内, 灰漠土最大, 棕钙土其次, 灰钙土最小 (图 1a)。这是因为灰漠土的质地较粘重, 土粒较细, 土壤颗粒间孔隙小, 通气透水性弱, 降水来不及全部渗入土壤而产生地表径流, 形成较大径流量。棕钙土土粒较粗, 土壤孔隙大, 土壤渗透性较好, 相比灰漠土不易发生径流。在第 15 分钟时, 棕钙土径流速率达到最低值。因为棕钙土多砂粒, 随着降雨历时的增加, 细颗粒物质被侵蚀带走, 表土中沙粒和砾石量相对增多, 一定的砂粒含量能够保护土壤免受雨滴的溅蚀, 减少地表结皮, 使表层土壤维持更高的

孔隙度, 从而促进降雨入渗, 减少坡面地表径流<sup>[10]</sup>。棕钙土在 0~35 min 内, 径流速率随着降雨时间的增加而逐渐增加, 并在第 35 分钟内达到最大值。这种现象主要是因为当坡面开始产流后, 土壤团聚体被破坏, 土壤的分散和移动堵塞了地表空隙, 随着降雨过程的持续, 表层土壤的入渗能力随着降雨时间的推移而减弱, 使径流速率逐渐增大, 且降雨持续时间越大, 径流速率也越大。

2 mm 筛以下土壤的径流速率波动较大 (图 1b)。在 0~16 min 内, 灰钙土的径流速率最大, 灰漠土次之, 棕钙土的径流速率最小。灰钙土少粘粒, 颗粒间呈松散状接触式胶结, 缺乏黏粒胶结, 故虽利于渗透, 但结构结持力差而不稳定, 遇强降雨表土易分散, 从而易产生地表径流<sup>[11]</sup>。灰漠土在 20~35 min 内, 径流速率最大。因为土壤结构体粒径较小, 且易散碎, 且土粒团聚程度很低, 降雨过程中其细颗粒容易封堵表土空隙, 使表土紧实, 因而这一过程中径流量最大。棕钙土在 0~25 min 内, 径流速率较低, 且变化比较平稳。因为其粉、砂粒含量较高, 土粒较粗, 土壤孔隙大, 不易发生径流。在 25~40 min 内, 其径流速率随时间的增加明显增大。因为土壤结构体被打破, 土壤稳定性较差, 颗粒不均匀, 所以在持续降雨中, 径流速率逐渐变大。

### 2.2 不同类型土壤的含沙量

大于 2 mm 结构体的土壤在 0~20 min 内, 灰漠土泥沙浓度明显较高, 其次为灰钙土, 最后为棕钙土 (图 2a)。这是因为灰漠土粘粒含量稍高, 易形成结皮, 且结皮更加稳固, 所以入渗较少而产流排水率较高, 故其水土流失较为严重; 棕钙土土壤含有砾石, 一般可以起到稳定土壤, 保护颗粒免受降雨和径流侵蚀的作用<sup>[12]</sup>。在 20~32 min 内, 灰漠土和棕钙土的泥沙浓度相对较高; 灰钙土的泥沙浓度在第 24 分钟时达到峰值, 高达  $0.02 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 棕钙土在第 32 分钟时达到峰值。因为这段时间雨滴的击溅作用较高, 使得土壤中大团聚体破碎崩解成不同粒径的土壤颗粒, 坡面土壤颗粒进一步破碎成细粒径的颗粒, 使更多的泥沙颗粒随径流流失, 从而使得泥沙浓度较高。在 32~40 min 内, 灰漠土泥沙含量稳定且上升缓慢, 灰钙土则呈现降低的趋势。这是由于降雨后, 地表水在入渗和径流之间分配, 降雨初始径流较小, 产沙率也较小, 而随着降雨时间的持续, 土壤坡面因雨滴的砰溅, 粉粒与粘粒在土壤空隙中下渗, 使得土壤坡面表层及亚表层形成一层结皮, 使受雨滴侵蚀的泥沙减少, 故降雨后期径流泥沙浓度有所降低<sup>[13]</sup>。

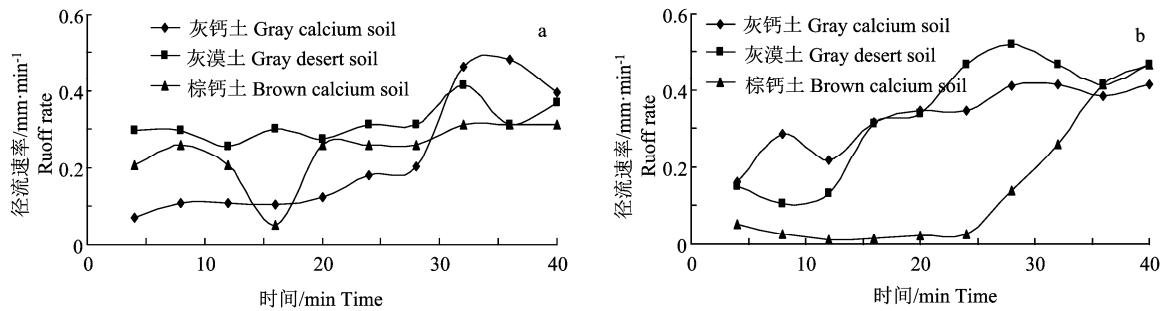


图 1 3 种不同类型土壤的径流速率 (a.2 mm 筛以上, b.2 mm 筛以下)

Figure 1 Runoff rates of 3 types of soils (a. larger than 2 mm sieve, b. less than 2 mm sieve)

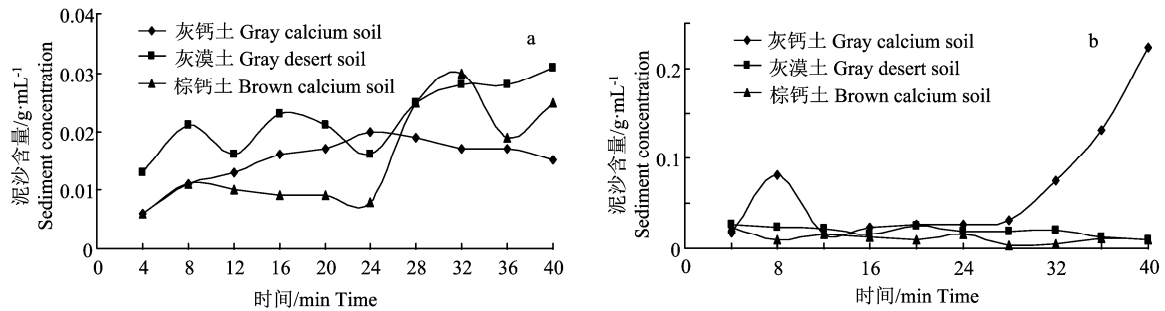


图 2 3 种不同类型土壤的径流含沙量 (a.2 mm 筛以上, b.2 mm 筛以下)

Figure 2 Sediment concentrations of 3 types of soils (a. larger than 2 mm sieve, b. less than 2 mm sieve)

表 2 径流稳定状态下试验土壤的径流速率与累积含沙量

Table 2 Average runoff rate and cumulative sediment concentration under steady runoff state

土壤类型 Soil types	平均径流速率/mm·min <sup>-1</sup> Average runoff rate	累积径流含沙量/g·mL <sup>-1</sup> Cumulative sediment concentration	K 值 K value
灰钙土 (>2 mm) Gray calcium soil	0.28	0.151	0.229
灰漠土 (>2 mm) Gray desert soil	0.42	0.222	0.333
棕钙土 (>2 mm) Brown calcium soil	0.33	0.152	0.240
灰钙土 (<2 mm) Gray calcium soil	0.44	0.650	0.435
灰漠土 (<2 mm) Gray desert soil	0.45	0.194	0.259
棕钙土 (<2 mm) Brown calcium soil	0.19	0.112	0.152

小于 2 mm 结构体的土壤, 灰钙土的泥沙浓度变化幅度最大, 而灰漠土和棕钙土的含沙量变化比较平稳 (见图 2b)。在 0~10 min 内, 灰钙土泥沙含量显著增加, 且波动较明显。有机质含量相对较低, 颗粒呈松散状接触, 结构结持力差而不稳定, 不易形成稳定的团状结构体, 在一定雨滴强击溅作用下, 大量泥沙和砂粒被侵蚀带走<sup>[14]</sup>; 在 28~40 min 内, 灰钙土泥沙含量随时间增加急剧上升。因其土质多为直立型湿陷性黄土母质, 该类土壤一旦遇有外力尤其是水蚀的作用则成片坍塌, 形成侵蚀沟, 水土流失现象较为严重。灰漠土颗粒间孔隙小, 通气透水性弱, 粘结性、粘着性、可塑性和胀缩性强, 土壤抵抗侵蚀能力较强, 且质地较粘重, 易形成稳定

的结皮, 这层结皮阻断了坡面径流与更深层土壤的进一步接触, 从而减弱了侵蚀的强度, 因而其含沙量相对较低<sup>[1]</sup>; 而棕钙土有机质较高, 对土壤侵蚀有积极影响, 而石砾本身又可以起到稳固土壤, 能防止土壤一定程度的侵蚀, 所以其含沙量相对最小。

通过图 1 和图 2 可以发现, 供试 3 种土壤中, 粒径 >2 mm 结构体土壤的径流速率与泥沙含量相对较小且变化比较平稳; 粒径 <2 mm 结构体土壤的径流速率与泥沙含量较大, 且随着降雨历时的增加波动较大。也就是说, 土壤颗粒越均匀, 土壤稳定性越差; 土壤颗粒不均匀系数越大, 土壤越稳定。

由于大颗粒结构体孔隙多、孔径大且入渗率高, 导致径流强度小于小颗粒结构体。且 <2 mm 结构

体易形成结皮, 结皮的形成影响土壤孔隙状况, 显著减小土壤入渗率, 使得径流强度增大, 携带与搬运泥沙能力增强, 因此侵蚀量剧增。综上所述, 结构体的稳定性与土壤侵蚀和径流密切相关, 是土壤对径流和侵蚀敏感性的有效指示因子。

### 2.3 土壤含沙量与径流速率以及与有机质之间的相关性

在径流稳定状态下, 3 种 2 mm 筛以上的土壤中, 灰漠土的径流速率最大, 棕钙土次之, 灰钙土的径流速率最小(表 2); 灰漠土的径流速率为黄土的 1.5 倍, 棕钙土的 1.28 倍。相对含沙总量而言, 灰漠土坡面的含沙量最高, 棕钙土次之, 灰钙土的泥沙含量最小; 灰漠土的泥沙浓度为棕钙土的 1.46 倍, 灰钙土的 1.47 倍。3 种 2 mm 筛以下的土壤中, 灰钙土的径流速率最大, 灰漠土次之, 棕钙土的径流速率最小; 灰钙土的径流速率为灰漠土的 1.02 倍, 棕钙土的 2.34 倍; 同样, 灰钙土的泥沙含量最大, 是灰漠土的 3.35 倍, 棕钙土的 5.8 倍。通过分析, 发现土壤的径流速率与含沙量没有很明显的关联性, 相关系数仅为 0.56。

通过表 1 和表 2 数据, 对不同土壤的有机质含量和含沙总量做散点图进行分析, 发现两者线性相关(负相关), 相关系数为 0.73。可见, 有机质含量与泥沙浓度关系密切, 其含量的降低会引起土壤含沙量相应程度的增加。因其有机质是一种重要的胶结剂, 在土壤中主要以胶膜形式包被在矿质土粒的外表; 有一定的粘结力, 能够使相对松散的土壤颗粒通过自身的胶结作用形成团粒结构, 使水稳定性团聚体的含量增加, 并能改善土壤的孔隙状况, 是影响土壤侵蚀的重要因素之一<sup>[15]</sup>。

### 2.4 土壤可蚀性 K 值与含沙量的相关关系

土壤可蚀性(soil erodibility)是评价土壤被降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的一项指标, 是影响土壤流失的内在因素, 通常用 K 值来衡量土壤可蚀性。K 值的求法主要有 3 种: 直接测定、诺谟图法和公式法<sup>[16]</sup>。直接测定 K 值方法综合了所有土壤性质对土壤侵蚀的影响, 但是所需的时间较长, 经费较多; 诺谟图法也比较繁琐; 公式法则比较快捷。但是, 公式法有好多种, 通过类比, 采用 Sharpley 和 Williams 于 1990 年在 EPIC(Erosion productivity impact calculator)模型中土壤可蚀性因子 K 值计算方法<sup>[16]</sup>, 同时, 本计算方法也被许多研究人员所采用, 计算公式如材料与方法中所示。

借助表 1 所测得的土壤理化性质, 计算出了这

几种不同类型土壤的可蚀性 K 值(如表 2 所示), 在 0.435~0.152 之间。查找相关文献, 发现新疆不同土壤类型的可蚀性 K 值平均为 0.238~0.441, 这与新疆大多数研究和实际情况是相符合的<sup>[17]</sup>。通过对不同土壤的累积含沙量和 K 值做散点图进行分析, 发现两者具有显著的线性相关, 相关系数为 0.8(正相关)。由此可见, 土壤可蚀性 K 值的高低与其含沙量具有一致性, 土壤的含沙量越高, K 值增加的趋势越明显, 在同种状况下土壤流失量也就相应增加, 这与国内外的许多学者的研究结论是一致的。

## 3 讨论与结论

本次研究发现, 不同土壤类型的坡面侵蚀特征是不一样的。有机质与机械组成都会对土壤的抗侵蚀能力产生一定的影响。有机质含量越高的土壤, 胶结程度愈高, 能改善土壤的持水量和入渗量, 同时抗侵蚀能力愈强。

土壤的机械组成影响着土壤的渗透性能, 不同土壤类型中粘粒与粉粒的含量不同, 导致土壤的性质如粘着性、可塑性和胀缩性等有明显差异。粘粒含量越高, 土壤可蚀性 K 值愈小, 越易抵抗侵蚀; 土壤中粉粒含量越高, 土壤可蚀性 K 值越大, 越易发生侵蚀。此次研究还发现, 3 种不同的土壤类型中, 径流速率与含沙量没有明显的相关性。同样, 土壤的含沙量越大, 其 K 值也愈大, 土壤的含沙量与可蚀性 K 值呈现一定的相关性。大于 2 mm 结构体的土壤中, 灰漠土产沙量、可蚀性 K 值最大, 其抗侵蚀性表现最弱; 小于 2 mm 结构体的土壤中, 灰钙土产沙量、可蚀性 K 值最大, 其抗侵蚀性表现最弱。

在持续降雨条件下, 小于 2 mm 结构体的土壤稳定性最好。因其易形成结皮, 短时间内径流强度增大, 携沙能力增强, 入渗率减小, 最终导致侵蚀量剧增。相反, 大于 2 mm 结构体土壤的径流强度和侵蚀量相对较小。土壤结构体的形成和稳定, 使其抵抗侵蚀的能力相对较大。综上所述, 筛上与筛下土壤的径流强度和侵蚀量差异显著, 且结构体的稳定性与土壤侵蚀和径流密切相关。

通过对 3 种土壤进行过筛处理, 打破其土壤结构, 发现 3 种土壤类型的径流速率与泥沙含量的大小依次为: 灰漠土>棕钙土>灰钙土(>2 mm); 灰钙土>灰漠土>棕钙土(<2 mm)。所以, 综合分析, 大于 2 mm 结构体的土壤中, 灰钙土抵抗侵蚀的能力最大, 小于 2 mm 结构体的土壤中, 棕钙

土抵抗侵蚀的能力较大。

### 参考文献:

- [1] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. 中国水土保持, 2013 (10): 26-34.
- [2] MIDDLETON H E. Properties of soils which influence soil erosion[M]. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1930.
- [3] BOUYOUCOS G J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. J Am Soc Agron, 1935(9),738-741.
- [4] WISCHMEIER W H, MANNERING J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. Soil Sci Soc Am J, 1969, 33(1): 131-137.
- [5] 吴淑安, 蔡强国. 内蒙古东胜地区土壤抗蚀性实验研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 38-45.
- [6] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究- I .油松人工林根系对土壤抗冲性的增强效应[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 1-16.
- [7] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨下 3 种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 23-28.
- [8] 张媛静. 基于能量分析的不同类型土壤抗侵蚀特征研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010: 45-48.
- [9] 史银志. 基于人工模拟降雨的伊宁市北山坡土壤侵蚀特性试验及预报模型研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
- [10] 师长兴. 砾石对土壤可蚀性的影响及土壤可蚀性值估算方法[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1398-1401.
- [11] 贾莲莲. 模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [12] 李闯, 刘艳伟, 杨具瑞. 人工模拟降雨条件下红壤水土保持效应的研究综述[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(23): 7838-7838.
- [13] 高杨. 模拟降雨条件下三种类型土壤侵蚀特征及其氮素流失的控制效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [14] 吴凤至. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [15] 杨才敏. 土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 177-179.
- [16] SHARPLEY A N, WILLIAMS J R. EPIC-Erosion/ Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation [M]. Washington, D C: United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, 1990.
- [17] 仲嘉亮, 郭朝霞. 新疆土壤可蚀性K值空间插值及其分布特征研究[J]. 新疆环境保护, 2014, 36(3): 1-4.