

降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响*

沈海鸥¹ 郑粉莉^{1,2} 温磊磊¹ 姜义亮¹ 卢嘉¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 细沟的形态特征研究可揭示坡面侵蚀发生机理,且细沟形态对坡面径流和侵蚀有重要影响;而现有研究仅用细沟密度和细沟宽深比等指标来表征细沟形态,不能全面准确地反映细沟的形态特征。为此基于模拟降雨试验,研究降雨强度和坡度对黄土坡面细沟侵蚀和细沟形态特征的综合影响。试验处理包括3种黄土高原有代表性的侵蚀性降雨(50、75、100 mm/h)和3个细沟侵蚀发生最常见的坡度(10°、15°、20°)。试验结果表明,坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率均随着降雨强度和坡度的增加呈幂函数增加。试验条件下,细沟倾斜度介于16°~20°之间,随着降雨强度的增加而增大,随着坡度的增加而减小;细沟密度、细沟割裂度和细沟复杂度分别为0.74~1.95 m/m²、0.08~0.17和1.09~1.38,三者皆随降雨强度和坡度的增加而增大;细沟宽深比为1.93~2.35,随着降雨强度和坡度的增加而减小。通过分析发现,细沟割裂度是评价细沟侵蚀和细沟形态的最优指标;研究降雨强度对细沟形态的影响时,建议优先选用细沟割裂度、细沟复杂度和细沟倾斜度指标;分析坡度对细沟形态的影响时,除选取细沟割裂度外,建议优先选用细沟密度和细沟宽深比指标。细沟横断面主要呈“V形”,随着降雨强度和坡度的增加,径流紊动性增强,细沟横断面变化趋于不规则,说明细沟横断面变化可以反映径流的变化特征,从而揭示细沟侵蚀发生机理。

关键词: 细沟侵蚀 降雨强度 坡度 细沟形态 细沟横断面

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0162-09

Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Rill Morphological Characteristics

Shen Haiou¹ Zheng Fenli^{1,2} Wen Leilei¹ Jiang Yiliang¹ Lu Jia¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Studies on rill morphological characteristics can reveal soil erosion mechanisms, and rill morphology has important influence on runoff and soil loss of the hill slope. However, the existing studies only use rill density, rill width – depth ratio, etc. to characterize rill morphology, which cannot fully reflect rill morphological characteristics. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion and rill morphology at the loess hill slope were studied based on a rainfall simulation study. The experimental treatments included three rainfall intensities (50, 75 and 100 mm/h) of representative erosive rainfall on the Loess Plateau and three common slope gradients (10°, 15° and 20°) of rill erosion occurrence. The results showed that both soil erosion and rill erosion increased with increasing of rainfall intensity and slope gradient, where relationships among them were the power function. Rill inclination angle concentrated between 16°~20° under the experimental conditions, and it increased with an increase in

收稿日期: 2014-09-09 修回日期: 2014-10-28

* 国家自然科学基金资助项目(41271299)和水利部公益性行业科研专项资助项目(201201083)

作者简介: 沈海鸥, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究, E-mail: shensusan@163.com

通讯作者: 郑粉莉, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

rainfall intensity and decreased with an increase in slope gradient. Rill density, degree of rill dissection and rill tortuosity complexity were $0.74 \sim 1.95 \text{ m/m}^2$, $0.08 \sim 0.17$ and $1.09 \sim 1.38$, respectively, which all increased as rainfall intensity and slope gradient increased. Rill width - depth ratio was $1.93 \sim 2.35$, which decreased with increasing rainfall intensity and slope gradient. By analyzing correlations between rill erosion and rill morphological indicators, degree of rill dissection is the best indicator to evaluate rill erosion and rill morphology. When studying the effect of rainfall intensity on rill morphology, indicators of degree of rill dissection, rill tortuosity complexity and rill inclination angle are recommended to preferentially select. When analyzing the effect of slope gradient on rill morphology, indicators of rill density and rill width - depth ratio are recommended to preferentially select, except for degree of rill dissection. Most of rill cross sections presented "V" shapes. Generally, the rill cross section appeared more and more irregular change with increasing rainfall intensity and slope gradient, where the runoff turbulence increased. This indicated that the change of rill cross section can reflect change characteristics of runoff, thereby reveal the rill erosion mechanisms.

Key words: Rill erosion Rainfall intensity Slope gradient Rill morphology Rill cross section

引言

细沟侵蚀是造成坡耕地严重土壤侵蚀的主要方式,也是坡耕地表土和养分流失的重要原因^[1-3],对坡面地貌发育及演化过程具有重要的潜在影响^[4]。细沟侵蚀过程及其影响因素一直是土壤侵蚀研究的热点。有关研究表明,降雨强度对细沟侵蚀的影响起关键作用,降雨强度越大,则细沟侵蚀量越大^[5];坡度也是影响细沟侵蚀的重要因素,随着坡度的增加,细沟侵蚀量和细沟平均深度均随之增加^[6-8]。降雨强度和坡度对土壤侵蚀的影响作用非常复杂,难以将其单独区分和量化各自对细沟侵蚀的影响。细沟侵蚀过程中,细沟在坡面上的分叉、合并及连通现象又促进了细沟侵蚀的发展,形成了复杂的侵蚀形态。Bruno等^[9]利用细沟长度和横断面描述细沟形态,得出细沟长度与细沟体积呈幂函数关系,并通过剖面形态变化推断细沟侵蚀-沉积情况。Di Stefano等^[10]通过野外调查,得到了细沟长度、宽度、深度和体积之间的经验关系。和继军等^[11]选用细沟密度和细沟宽深比等指标表征了杨凌塬土和安塞黄绵土的细沟侵蚀特征差异。由于雨季各场次降雨过程中细沟在坡面出现的不确定性及其形态的不规则性等,使得野外动态监测细沟侵蚀过程的方法和技术还不成熟。因此,国内外大多数学者^[12-13]采用模拟降雨试验研究细沟侵蚀特征。现有研究多是探讨降雨强度或坡度对细沟侵蚀量的影响,对细沟形态特征的影响研究较少,而细沟的形态特征研究是认识细沟发生机理的前提^[14],且坡面细沟形态对坡面径流和侵蚀有重要影响^[15]。目前,定量表征细沟形态的特征指标较少,大多数研究者仅用细沟密度和细沟宽深比等指标来表征细沟形

态。而坡面细沟形态特征受降雨特征和坡长等多种因素的影响,具有不确定性和复杂性,因而现有表征细沟形态的指标不能全面准确地反映细沟形态特征,需要寻求其他指标对其形态特征进行准确表达。据此,本文基于模拟降雨试验,选取细沟倾斜度、细沟密度、细沟割裂度、细沟复杂度和细沟宽深比5个指标,分析降雨强度和坡度对黄土坡面细沟形态特征的综合影响,提出表征细沟形态特征的最优指标,以为黄土区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,降雨设备为下喷式人工模拟降雨装置,降雨覆盖面积为 $27 \text{ m} \times 18 \text{ m}$,降雨高度 18 m ,能够满足所有雨滴达到终点速度^[16]。试验所用土槽为 10 m (长) $\times 1.5 \text{ m}$ (宽) $\times 0.5 \text{ m}$ (深)的液压式可调坡度钢槽,坡度调节范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$,试验土槽底部每 1 m 长排列4个孔径为 2 cm 的排水孔,用以保证降雨试验过程中排水良好。供试土壤为黄土高原丘陵沟壑区安塞县的耕层黄绵土,砂粒(当量粒径大于 $50 \mu\text{m}$)质量分数为 28.3% ,粉粒(当量粒径 $2 \sim 50 \mu\text{m}$)质量分数为 58.1% ,黏粒(当量粒径小于 $2 \mu\text{m}$)质量分数为 13.6% ,有机质(重铬酸钾氧化-外加热法)质量比 5.9 g/kg 。

1.2 试验设计

短历时、高强度暴雨是造成黄土区水土流失的主要降雨特征^[17],依据黄土高原侵蚀性降雨的瞬时雨强标准^[18](即 I_{15} 、 I_{10} 、 I_5 分别大于等于 0.852 、 1.055 、 1.520 mm/min),依次设计试验降雨强度为

50、75、100 mm/h(表1);降雨总量相同,为50 mm;降雨历时依次为60、40、30 min。由于细沟侵蚀在 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的裸露坡耕地上表现最明显^[19],而 25° 是坡耕地研究的上限,据此,设计的试验坡度为 10° 、 15° 、 20° 。每个试验处理重复2次。

表1 试验设计

Tab.1 Design of experimental treatments

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/min	坡度/(°)
50	60	10
		15
		20
75	40	10
		15
		20
100	30	10
		15
		20

1.3 试验方法

装填土槽时,用纱布填充试验土槽底部的排水孔,并在土槽底部填5 cm厚天然细沙作为透水层,以保障试验过程中土槽排水良好;细沙层之上覆盖纱布,再装填试验土壤。填土时将土层分为犁底层和耕作层,犁底层深度为15 cm,土壤容重控制在 1.35 g/cm^3 ;耕作层深度为20 cm,土壤容重控制在 1.10 g/cm^3 。为保证装土的均匀性,采用分层填土,每层土厚度为5 cm,填土时边填土边压实;每填完一层土后,将土层表面用齿耙耙松,再填装下一层土壤,以保证2个土层能接触良好;同时,将试验土槽四周边壁尽量压实,以尽可能减小边界效应的影响。

将试验土槽翻耕20 cm,并用齿耙耙平,模拟黄土区坡耕地耕层状况。翻耕完毕后,自沉降48 h。为保证试验前期土壤条件的一致性,采用30 mm/h降雨强度进行预降雨至坡面产流为止,所有试验处理的前期土壤含水率为 $(23.43 \pm 0.53)\%$,详见表2。预降雨结束后,为了防止试验土槽土壤水分蒸发和减缓结皮的形成,用塑料布将试验土槽覆盖,静置24 h待正式模拟降雨试验。

表2 降雨试验前坡面土壤含水率

Tab.2 Soil moisture content before each rainfall simulation experiment %

坡度/(°)	降雨强度/(mm·h ⁻¹)		
	50	75	100
10	23.32 ± 0.26	23.61 ± 0.48	23.07 ± 0.76
15	23.29 ± 0.59	23.78 ± 0.41	23.25 ± 0.72
20	23.38 ± 0.31	23.42 ± 0.75	23.24 ± 0.83

注:表中数据形式为平均值±标准差。

为了确保模拟降雨的均匀性和准确性,试验开

始前对降雨强度进行率定,当降雨均匀度大于90%,实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于5%时方可进行正式降雨。坡面产流后,记录初始产流时间,接取径流泥沙样,取样间隔为1 min或2 min。降雨过程中,用染色剂示踪法测定径流流速,由于该流速为坡面最大流速,故将实测流速乘以修正系数0.75,作为径流平均流速^[20]。降雨结束后,称取径流泥沙的总质量,并将其静置6~8 h,倒掉其上清液后转移到已知质量的铝盒中,后将其放入设置恒温为 105°C 的烘箱烘干,称取其质量,计算每个径流泥沙样的含沙浓度及其对应采样间隔的侵蚀量,各采样间隔侵蚀量之和即为一次降雨过程的坡面总侵蚀量;用径流泥沙的总质量减去泥沙质量即可得到由降雨转化为径流的水量。采用直尺测量次降雨后坡面细沟基本形态,具体方法是沿着细沟沟槽每隔5 cm或10 cm详细测量细沟的位置坐标(x, y)及细沟的宽度和深度,在特殊沟槽位置也会进行加密测量^[21-22]。对于细沟侵蚀量,采用容积法进行计算,即计算细沟体积,再乘以土壤容重即为容积法量测的细沟侵蚀量。由于细沟形状的不规则,造成容积法估算的误差,因此,已有的研究^[23]建议用填土法估算细沟侵蚀量,即根据已知的土壤容重称取一定量的土壤,然后将其填充到细沟沟槽,得到较准确的细沟侵蚀量。所以,本研究基于容积法与填土法估算细沟侵蚀量的关系式^[23],将容积法估算的细沟侵蚀量换算为填土法估算的细沟侵蚀量,即本研究中的细沟侵蚀。

1.4 表征细沟形态的参数描述

细沟的基本形态指标为细沟长度、宽度和深度。根据细沟基本形态指标可以衍生多个指标用于表征坡面细沟形态。这里借鉴现有研究成果,选取细沟倾斜度、细沟密度、细沟割裂度、细沟复杂度和细沟宽深比,用于对比不同降雨强度和坡度条件下的细沟形态差异。

(1)细沟倾斜度借鉴倾斜度的概念进行定义,是指细沟走向与所在斜坡走向夹角的平均值,即细沟的倾斜程度;细沟倾斜度能够反映细沟在水平方向和垂直方向的延展性,计算式为

$$\delta = \sum_{i=1}^n \theta_i / n \quad (1)$$

式中 δ ——细沟倾斜度, (°)

θ_i ——第*i*个监测点处细沟走向与所在斜坡走向的夹角, (°)

n ——坡面上监测点总数

(2)细沟密度^[7,24]是指单位研究区域内所有细沟的总长度,细沟密度能够反映坡面的破碎程度,计

算式为

$$\rho = \sum_{j=1}^m L_{ij} / A_0 \quad (2)$$

式中 ρ ——细沟密度, m/m^2

A_0 ——研究坡面的表面积, m^2

L_{ij} ——坡面上第 j 条细沟及其分叉的总长度, m

m ——坡面上细沟总条数

(3) 细沟割裂度参照地面割裂度进行定义,是指单位研究区域内所有细沟的平面面积之和,该参数为一无量纲参数;细沟割裂度能够更加客观地反映坡面的破碎程度及细沟侵蚀强度,计算式为

$$\mu = \sum_{j=1}^m A_j / A_0 \quad (3)$$

式中 μ ——细沟割裂度

A_j ——坡面上第 j 条细沟的表面积, m^2

(4) 细沟复杂度是指一条细沟及其分叉的总长度与相应的垂直有效长度的比值;细沟复杂度能够反映细沟网的丰富度,计算式为

$$c = L_{ij} / L_j \quad (4)$$

式中 c ——细沟复杂度

L_j ——第 j 条细沟的垂直有效长度, m

(5) 细沟宽深比^[11]是指细沟宽度与对应深度的比值,该参数为一无量纲参数;细沟宽深比可以客观反映细沟沟槽形状的变化,计算式为

$$R_{WD} = \sum_{i=1}^n W_i / \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

式中 R_{WD} ——细沟宽深比

W_i ——第 i 个监测点处的细沟宽度, cm

D_i ——第 i 个监测点处的细沟深度, cm

1.5 数据处理

应用 Excel 2003、SigmaPlot 10.0、Matlab 7.9.0、SPSS 19.0 进行数据处理与分析:采用 SigmaPlot 10.0 绘制坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度关系的三维图;采用 Matlab 7.9.0 对侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系进行拟合;采用 SPSS 19.0 中相关分析方法比较侵蚀速率与细沟形态指标之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和坡度对坡面侵蚀和细沟侵蚀的影响

坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度关系的三维曲面图表明,坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率均随着降雨强度和坡度的增加而明显增大(图1、2)。通过分析观测资料可知,不同试验条件

下,细沟侵蚀速率占坡面侵蚀速率的 62.2% ~ 84.8%,平均值为 73.4%,该试验结果与郑粉莉等^[25]研究结果一致。说明细沟侵蚀对坡面土壤侵蚀产沙有重要贡献,因此,研究细沟侵蚀对黄土坡面土壤侵蚀防治有重要意义。

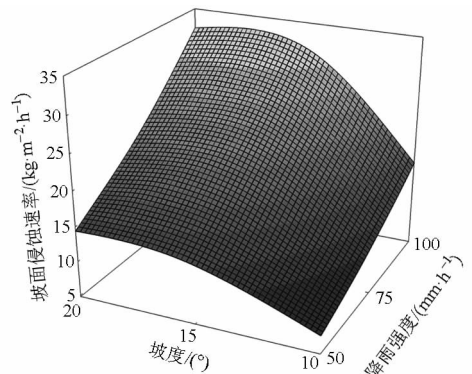


图1 坡面侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系
Fig.1 Relationships of soil erosion rate with rainfall intensity and slope gradient

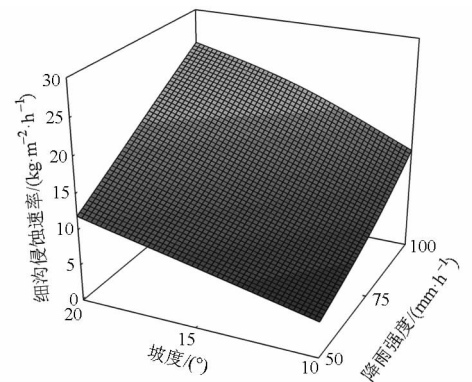


图2 细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系
Fig.2 Relationships of rill erosion rate with rainfall intensity and slope gradient

采用 Matlab 7.9.0 中 Surface Fitting Tool 分别对坡面侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系及细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度的关系进行拟合,拟合过程中采用信赖域方法,同时考虑方程的物理意义,据此获取最优经验回归方程

$$S_t = 0.010R^{1.230}S^{0.815} \quad (R^2 = 0.946, n = 18) \quad (6)$$

$$S_r = 0.005R^{1.244}S^{0.940} \quad (R^2 = 0.964, n = 18) \quad (7)$$

式中 S_t ——坡面侵蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

S_r ——细沟侵蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

R ——降雨强度, mm/h

S ——坡度, ($^\circ$)

由经验回归方程可知,细沟侵蚀速率与坡面侵蚀速率随降雨强度和坡度的变化趋势基本一致,细沟侵蚀强弱可以反映坡面侵蚀的强弱。坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率与降雨强度和坡度呈幂函数关系。对比回归方程(6)和(7)可知,降雨强度对坡面

侵蚀和细沟侵蚀的影响相近,而坡度对细沟侵蚀的影响大于其对坡面侵蚀的影响。

2.2 降雨强度和坡度对细沟形态的影响

通过对比不同降雨强度和坡度下的坡面细沟形态特征指标(表3),发现试验条件下,细沟倾斜度介于 $16^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间。对于降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 及由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理,细沟倾斜度平均增加率较为相近,分别为 6.0% 和 6.1% 。对于坡度由 10° 增大到 15° 及由 15° 增大到 20° 的试验处理,细沟倾斜度分别减小了 5.1% 和 2.2% 。分析原因是,在坡度一定的条件下,降雨强度越大,雨滴打击和径流冲刷能力越大,

造成径流流路更加复杂,且为保证降雨总量相同,降雨强度越大,降雨历时越短,导致径流对细沟的冲刷修饰作用减弱,因此,细沟在垂直方向的延展性降低;在降雨强度一定的条件下,坡度越大,坡面土壤在坡面向下方向上的重力分量就越大,土体稳定性降低,且随着坡度的增加,细沟内股流流速增大(图3),导致径流越来越来不及分散即流出坡面,反而造成径流流路较为单一,细沟倾斜度减小。试验结果也表明,坡度由 10° 增大到 15° 的试验处理对细沟倾斜度的影响大于坡度由 15° 增大到 20° 的试验处理。与坡度相比,降雨强度对细沟倾斜度的影响更加敏感。

表3 不同降雨强度和坡度下坡面细沟形态特征指标

Tab.3 Rill morphological indicators under different rainfall intensities and slope gradients

坡度 $S/(\text{ }^{\circ})$	降雨强度 $R/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	坡面细沟形态特征指标				
		细沟倾斜度 $\delta/(\text{ }^{\circ})$	细沟密度 $\rho/(\text{m}\cdot\text{m}^{-2})$	细沟割裂度 μ	细沟复杂度 c	细沟宽深比 R_{WD}
10	50	17.25 ± 1.15^a	0.74 ± 0.12^b	0.08 ± 0.01^b	1.09 ± 0.05^b	2.35 ± 0.08^a
	75	19.09 ± 1.10^a	1.19 ± 0.09^a	0.11 ± 0.00^{ab}	1.18 ± 0.03^b	2.27 ± 0.09^a
	100	19.25 ± 0.30^a	1.40 ± 0.16^a	0.13 ± 0.01^a	1.32 ± 0.04^a	2.22 ± 0.05^a
15	50	16.78 ± 0.85^a	1.11 ± 0.14^b	0.09 ± 0.02^b	1.15 ± 0.00^a	2.18 ± 0.12^a
	75	17.31 ± 1.29^a	1.34 ± 0.19^b	0.12 ± 0.01^b	1.20 ± 0.08^a	2.11 ± 0.13^a
	100	18.63 ± 1.21^a	1.92 ± 0.19^a	0.17 ± 0.01^a	1.33 ± 0.09^a	1.94 ± 0.12^a
20	50	16.19 ± 0.95^b	1.85 ± 0.18^a	0.13 ± 0.01^a	1.20 ± 0.00^b	1.96 ± 0.08^a
	75	16.89 ± 0.22^{ab}	1.91 ± 0.19^a	0.15 ± 0.02^a	1.24 ± 0.02^b	1.94 ± 0.07^a
	100	18.53 ± 0.05^a	1.95 ± 0.14^a	0.17 ± 0.01^a	1.38 ± 0.04^a	1.93 ± 0.01^a

注:相同坡度不同字母表示各个降雨强度间经 F 检验差异显著($P < 0.05$);表中数据形式为平均值 \pm 标准差。

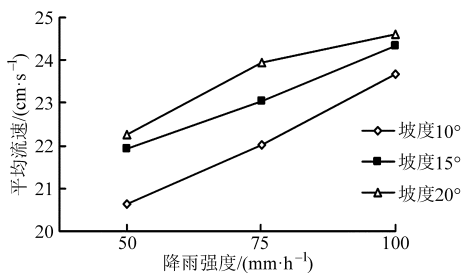


图3 不同降雨强度和坡度下细沟内股流平均流速

Fig.3 Average rill flow velocities under different rainfall intensities and slope gradients

细沟密度、细沟割裂度和细沟复杂度随降雨强度和坡度的变化趋势较为一致,均随着降雨强度和坡度的增加而增大。试验条件下,细沟密度为 $0.74 \sim 1.95 \text{ m}^2$ 。对于降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 及由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理,细沟密度的平均增加率分别为 28.3% 和 21.0% 。对于坡度由 10° 增大到 15° 及由 15° 增大到 20° 的试验处理,细沟密度的平均增加率分别为 33.2% 和 36.9% 。分析原因是,降雨强度和坡度越大,细沟内股流流速越大(图3),径流侵蚀能力越强,造成细沟溯源侵蚀强度越大,细沟密度增大。此

外,随着坡度的增加,不同降雨强度下细沟密度的增加率逐渐减小。试验结果也表明,降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 的试验处理对细沟密度的影响大于降雨强度由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理;随着坡度的增加,细沟密度的增加率较为相近。与降雨强度相比,坡度对细沟密度的影响更为敏感。

试验条件下,细沟割裂度为 $0.08 \sim 0.17$ 。对于降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 及由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理,细沟割裂度的平均增加率分别为 28.7% 和 23.9% 。对于坡度由 10° 增大到 15° 及由 15° 增大到 20° 的试验处理,细沟割裂度的平均增加率分别为 16.2% 和 25.0% 。原因是随着降雨强度和坡度的增加,坡面径流侵蚀能力增强,导致细沟沟壁崩塌侵蚀强度增大,坡面的破碎程度及细沟侵蚀强度增加,即细沟割裂度增加。试验结果还表明,降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 的试验处理对细沟割裂度的影响大于降雨强度由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理;坡度由 10° 增大到 15° 的试验处理对细沟割裂度的影响小于坡度由 15° 增大到 20° 的试验处理。与坡度相比,降雨

强度对细沟割裂度的影响更加敏感。

试验条件下,细沟复杂度为 1.09 ~ 1.38。对于降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 及由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理,细沟复杂度的平均增加率分别为 5.3% 和 11.3%。对于坡度由 10° 增大到 15° 及由 15° 增大到 20° 的试验处理,细沟复杂度的平均增加率分别为 2.7% 和 3.8%。上述结果表明,降雨强度和坡度越大,细沟网的丰富度越大,即细沟复杂度越大。降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 的试验处理对细沟复杂度的影响小于降雨强度由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理;坡度由 10° 增大到 15° 的试验处理对细沟复杂度的影响小于坡度由 15° 增大到 20° 的试验处理。与坡度相比,降雨强度对细沟复杂度的影响更加敏感。

细沟宽深比能够反映细沟沟槽形状的变化。不同降雨强度和坡度下,细沟宽深比为 1.93 ~ 2.35,随着降雨强度和坡度的增加而减小,但未表现出显著性差异。说明随着降雨强度和坡度的增加,在细沟溯源侵蚀和沟壁崩塌侵蚀均增强的同时,细沟下切侵蚀增强的幅度更加明显^[11],造成宽深比逐渐减小。对于降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 及由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 的试验处理,细沟宽深比的减小率分别为 2.5% 和 3.6%。对于坡度由 10° 增大到 15° 及由 15° 增大到 20° 的试验处理,细沟宽深比的减小率分别为 9.0% 和 6.2%。上述结果表明,与降雨强度相比,坡度对细沟宽深比的影响更为敏感。

综上所述,降雨强度对细沟倾斜度、细沟割裂度和细沟复杂度的影响更加敏感,而坡度对细沟密度和细沟宽深比的影响更加敏感。上述 5 个指标能够全面准确地反映细沟形态特征,弥补了现有细沟形态特征研究的不足。分析降雨强度对细沟形态的影响时,建议优先选用细沟倾斜度、细沟割裂度和细沟复杂度指标;研究坡度对细沟形态的影响时,建议优先选用细沟密度和细沟宽深比指标。

通过上述分析可知,各个细沟形态特征指标分

别从不同角度对细沟侵蚀及细沟形态进行了评价,为了选取最优细沟形态指标,有必要对这些指标与侵蚀速率的关系以及各个指标之间的关系进行相关分析(表 4)。由表可知,细沟侵蚀速率与坡面侵蚀速率呈极显著正相关关系,相关系数达到 0.959,表明二者之间信息重叠较多,相互解释度较高,因此,细沟侵蚀强弱可以反映坡面侵蚀强弱,前者可以代替后者与其他细沟形态特征指标进行相关分析。研究结果还表明,细沟侵蚀速率与细沟割裂度、细沟复杂度和细沟密度呈极显著正相关关系,与细沟宽深比呈极显著负相关关系,与细沟倾斜度未呈现显著性相关关系。各个形态特征指标间的相关分析表明,细沟割裂度与其他指标的相关性最高,其次依次是细沟密度、细沟复杂度、细沟宽深比和细沟倾斜度。综上所述,细沟割裂度是评价细沟侵蚀和细沟形态的最优指标,其他指标也值得被广泛应用,具体可根据研究需要选定。

2.3 降雨强度和坡度对细沟横断面的影响

细沟横断面是次降雨后,在坡面上选取典型细沟的 3 个断面位置进行测量得到的该断面细沟宽度和深度,为了保证所有试验处理的可比性,选取的断面位置比较一致,分别介于坡长 330 ~ 400 cm(坡上)、530 ~ 600 cm(坡中)和 840 ~ 860 cm(坡下)之间。由于细沟宽度一般不超过 30 cm^[25],为充分体现坡面上、中、下各部位的细沟横断面特征,假设其中轴线相同,以 15 cm 作为中轴,其右侧最大值与左侧最小值的差值即为实际细沟宽度。根据这些数值可绘制 10°、15°、20° 条件下 50、75、100 mm/h 降雨强度的细沟横断面特征图(图 4)。由图可见,细沟横断面呈“V 形”或箱形,符合典型细沟剖面特征^[26],其中“V 形”的细沟横断面所占比例较高。

对比相同试验处理的细沟横断面特征发现,一般随着坡长的增加,细沟横断面的“V 形”更加明显;且坡上部的细沟宽度和深度均较小,即其细沟横断面最小;此外,对于降雨强度(50 mm/h)和坡度(10°)较小的试验处理,坡中部的细沟横断面大于

表 4 坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率与细沟形态特征指标的相关分析

Tab. 4 Correlation matrix between soil erosion rate, rill erosion rate and rill morphological indicators

	坡面侵蚀速率 S_p	细沟侵蚀速率 S_r	细沟倾斜度 δ	细沟密度 ρ	细沟割裂度 μ	细沟复杂度 c	细沟宽深比 R_{WD}
坡面侵蚀速率 S_p	1						
细沟侵蚀速率 S_r	0.959 **	1					
细沟倾斜度 δ	0.304	0.317	1				
细沟密度 ρ	0.796 **	0.874 **	0.100	1			
细沟割裂度 μ	0.896 **	0.936 **	0.354	0.904 **	1		
细沟复杂度 c	0.853 **	0.911 **	0.587 *	0.777 **	0.864 **	1	
细沟宽深比 R_{WD}	-0.698 **	-0.709 **	0.105	-0.841 **	-0.712 **	-0.548 *	1

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; $n = 18$ 。

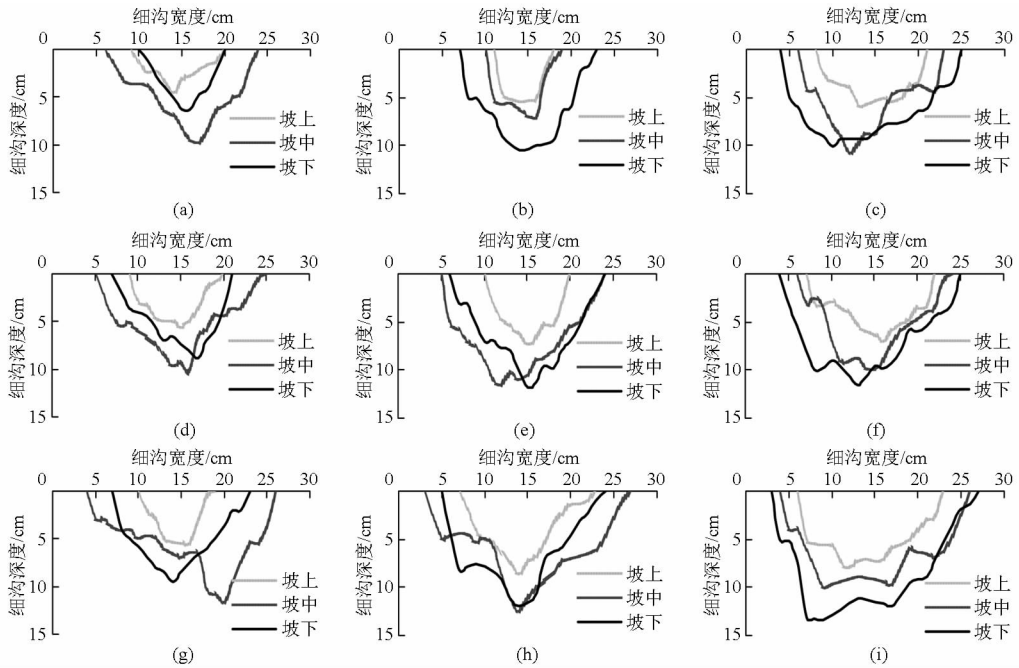


图4 细沟横断面特征

Fig.4 Characteristics of rill cross section

- (a) 降雨强度 50 mm/h, 坡度 10° (b) 降雨强度 75 mm/h, 坡度 10° (c) 降雨强度 100 mm/h, 坡度 10°
 (d) 降雨强度 50 mm/h, 坡度 15° (e) 降雨强度 75 mm/h, 坡度 15° (f) 降雨强度 100 mm/h, 坡度 15°
 (g) 降雨强度 50 mm/h, 坡度 20° (h) 降雨强度 75 mm/h, 坡度 20° (i) 降雨强度 100 mm/h, 坡度 20°

坡下部的细沟横断面,随着降雨强度和坡度的增加,坡下部的细沟横断面逐渐增大。分析原因是,坡上部汇水面积较小,水流相对均匀,径流侵蚀力较弱,对细沟沟壁和沟底的侵蚀冲刷作用较小,细沟较为“窄浅”,即细沟横断面较小,随着坡长的增加,汇水面积逐渐增大,径流汇集作用增强,径流侵蚀力增大,对细沟沟壁和沟底的侵蚀冲刷加强,导致细沟“V形”更加明显。细沟侵蚀沿坡面呈现强弱交替的波动趋势^[27-28],侵蚀、搬运和沉积在坡面侵蚀过程中随时随地发生,坡面侵蚀呈现以侵蚀-搬运为主与侵蚀-沉积为主的交替现象,且越向坡下部的侵蚀增强作用越明显,当降雨强度和坡度较小时,径流流速和径流侵蚀力较弱,坡面细沟侵蚀强弱交替周期较长,本研究选取的坡中(530~600 cm)可能刚好位于侵蚀增强带,而坡下(840~860 cm)可能位于侵蚀减弱带或者刚刚开始增强带,因此坡中细沟横断面大于坡下,随着降雨强度和坡度的增加,径流侵蚀力明显增强,坡面细沟侵蚀强弱交替周期缩短,本研究选取的坡下部位可能也位于侵蚀增强带,故其细沟横断面较大。

对比各个试验处理的细沟横断面特征发现,随着降雨强度和坡度的增加,细沟宽度和深度增加,细沟横断面的变化趋于不规则。原因可能是降雨强度越大,径流量增大,导致径流紊动性增强,径流对细沟的冲刷侵蚀波动较大;而坡度越大,径流流速越

大,同时由于径流沿坡面倾斜方向的重力分量增大,也促进了径流流速的增加;此外,坡面土体在坡面向下方向上重力的分量越大,土体稳定性越差,因此,细沟横断面变化趋于不规则。

3 结论

(1) 坡面侵蚀速率和细沟侵蚀速率均随降雨强度和坡度的增加呈幂函数增加;降雨强度对坡面侵蚀和细沟侵蚀的影响相近,而坡度对细沟侵蚀的影响大于其对坡面侵蚀的影响。

(2) 试验条件下,细沟倾斜度介于 16°~20°之间,随着降雨强度的增加而增大,随着坡度的增加而减小。细沟密度、细沟割裂度和细沟复杂度分别为 0.74~1.95 m/m²、0.08~0.17 和 1.09~1.38,三者皆随降雨强度和坡度的增加而增大,细沟宽深比为 1.93~2.35,随着降雨强度和坡度的增加而减小,说明随着降雨强度和坡度的增加,在细沟溯源侵蚀和沟壁崩塌侵蚀均增强的同时,细沟下切侵蚀增强的幅度更加明显。

(3) 通过相关分析发现,细沟割裂度是评价细沟侵蚀和细沟形态的最优指标。此外,考虑到影响细沟形态因素的复杂性,建议分析降雨强度对细沟形态的影响时,除选取细沟割裂度外,也可选用细沟复杂度和细沟倾斜度指标;而研究坡度对细沟形态的影响时,建议除选取细沟割裂度外,也可选用细沟

密度和细沟宽深比指标。

(4)细沟横断面主要呈“V形”,少数呈箱形,一般随着坡长的增加,细沟横断面的“V形”更加明显;随着降雨强度和坡度的增加,径流紊动性增强,

细沟横断面变化趋于不规则,说明细沟横断面变化可以反映径流的水力学变化特征,从而揭示细沟侵蚀发生机理。

参 考 文 献

- 1 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 109-116.
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land [J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 109-116. (in Chinese)
- 2 Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion [J]. CATENA, 2008, 75(1): 38-44.
- 3 Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes [J]. CATENA, 2012, 91(S1): 21-34.
- 4 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 12-18.
Cai Qiangguo, Zhu Yuanda, Wang Shiyong. Research on processes and factors of rill erosion [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 12-18. (in Chinese)
- 5 王治国,魏忠义,段喜明,等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀的研究(I)——影响细沟侵蚀因素的综合分析[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 51-57.
Wang Zhiguo, Wei Zhongyi, Duan Ximing, et al. Study on sloping field erosion under simulated rainfall on Loess Broken Plateau—the comprehensive analysis of factors effected on rill erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 51-57. (in Chinese)
- 6 王贵平. 细沟侵蚀研究综述[J]. 中国水土保持, 1998(8): 23-26.
- 7 Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- 8 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1319-1325.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion [J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1319-1325. (in Chinese)
- 9 Bruno C, Stefano C D, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(2): 263-279.
- 10 Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy [J]. CATENA, 2013, 101: 226-234.
- 11 和继军,吕焯,宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 398-405.
He Jijun, Lü Ye, Gong Huili, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 398-405. (in Chinese)
- 12 刘和平,王秀颖,刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究, 2011, 30(9): 1660-1668.
Liu Heping, Wang Xiuying, Liu Baoyuan. Study on rill and interrill flow velocity along hillslopes with simulated rainfall [J]. Geographical Research, 2011, 30(9): 1660-1668. (in Chinese)
- 13 刘俊体,蔡强国,孙莉英,等. 黄土坡面细沟流速随细沟发育的特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 44-48.
Liu Junti, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Characteristics of the rill flow rate with development of rill on loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 44-48. (in Chinese)
- 14 严冬春,王一峰,文安邦,等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 469-473.
Yan Dongchun, Wang Yifeng, Wen Anbang, et al. Configuration evolution of rill development on purple slopedland [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 469-473. (in Chinese)
- 15 Govindaraju R S, Kavvas M L. A spectral approach for analyzing the rill structure over hillslopes. Part 1. Development of stochastic theory [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3-4): 333-347.
- 16 郑粉莉,赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178.
Zheng Fenli, Zhao Jun. A brief introduction on the rainfall simulation laboratory and equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177-178. (in Chinese)
- 17 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175.
Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169-175. (in Chinese)
- 18 周佩华,王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J]. 水土保持通报, 1987, 7(1): 38-44.
Zhou Peihua, Wang Zhanli. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water

- Conservation, 1987, 7(1): 38-44. (in Chinese)
- 19 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62-65.
Bai Qingjun, Ma Shusheng. Mechanism of flow drop pit forming during process of rill erosion over slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 62-65. (in Chinese)
- 20 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237. (in Chinese)
- 21 Øygarden L. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway [J]. CATENA, 2003, 50(2-4): 217-242.
- 22 Di Stefano C, Ferro V. Measurements of rill and gully erosion in Sicily [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(14): 2221-2227.
- 23 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41-45, 49.
Zheng Fenli. A research on method of measuring rill erosion amount [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(4): 41-45, 49. (in Chinese)
- 24 Bewket W, Sterk G. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97(1-3): 81-93.
- 25 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.
Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Rill erosion developing and its control on steep slope land of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(1): 36-48. (in Chinese)
- 26 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996: 59.
- 27 吴永红, 王愿昌, 刘斌, 等. 黄土坡面的土壤侵蚀波动性[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 28-31.
Wu Yonghong, Wang Yuanchang, Liu Bin, et al. Soil erosion fluctuations of loess slope [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(2): 28-31. (in Chinese)
- 28 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 73-78. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 117 页)

- 13 刘希锋, 徐冬, 谭海林. 全混合日粮(TMR)搅拌机的种类与应用[J]. 农机化研究, 2006(2): 126-127.
- 14 何延东, 王宇, 高连兴. 饲料混合机的混合机理及工作性能的评定[J]. 农机化研究, 2006(2): 64-66.
- 15 Bargo F, Muller L D, Delahoy J E, et al. Performance of high producing dairy cows with three different feeding systems combining pasture and total mixed rations [J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(11): 2948-2963.
- 16 Schroeder G F, Delahoy J E, Vidaurreta I, et al. Milk fatty acid composition of cows fed a total mixed ration or pasture plus concentrates replacing corn with fat [J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(10): 3237-3248.
- 17 任广跃, 王红英, 于庆龙, 等. 翻转卸料双轴桨叶饲料混合机工作性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 132-135.  
Ren Guangyue, Wang Hongying, Yu Qinglong, et al. Experimental study on mixing performance of the twin-shaft paddle rotating mixer [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 132-135. (in Chinese)
- 18 王德福, 张全国. 全混合日粮混合质量评价指标试验方法的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 126-129.  
Wang Defu, Zhang Quanguo. Experimental methods for evaluating indexes of processing quality of total mixed ration [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 126-129. (in Chinese)
- 19 王德福, 王吉权. 单卧轴全混日粮混合机的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 205-207.
- 20 马云海, 荣宝军, 佟金, 等. 双旋转卧式滚筒粉料混合造粒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 123-126.  
Ma Yunhai, Rong Baojun, Tong Jin, et al. Design and test of horizontal double-rotary mixer granulator [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 123-126. (in Chinese)
- 21 刘江涛, 张志杰. 单轴卧式全混日粮混合机加工性能试验研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(7): 218-222.  
Liu Jiangtao, Zhang Zhijie. Study on characteristics of the single-shaft horizontal total mixed ration mixer [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 218-222. (in Chinese)
- 22 杨明金, 李锡文, 史铁林, 等. 高黏度流体混合机混合均匀度试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 137-142.  
Yang Mingjin, Li Xiwen, Shi Tielin, et al. Mixture homogeneity in a high-viscous flow mixer [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 137-142. (in Chinese)