干热河谷区耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀特性

戴佳栋[1,2]，张泽洪[3]，张建辉[1]，贾立志[4]，王 勇[1,5]，许海超[1,2]

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所，成都 610041；
2.中国科学院大学，北京 100049；3.西华师范大学国土资源学院，四川 南充 637000；
4.中央民族大学生命与环境科学学院，北京 100081；5.四川农业大学水利水电学院，四川 雅安 625014)

摘要：为了研究耕作侵蚀对坡面水动力学特性的影响，选择金沙江干热河谷地区的坡耕地作为研究对象，采用放水冲刷的试验方法，探讨耕作侵蚀影响侵蚀区土层厚度和作为侵蚀物源传输纽带这 2 种耕作侵蚀形式作用下坡面水动力参数的变化与分布规律，并分析坡面水动力参数与坡面产流和土壤剥离速率之间的关系。结果表明：耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理中，随着耕作侵蚀强度的增大，坡面产流速率和土壤剥离速率均呈现增大趋势；0～35 年耕作侵蚀强度处理下坡面水流流态主要表现为紊状缓流，耕作侵蚀强度达到 40 年时则为紊状急流；阻力系数呈现随耕作侵蚀强度增大而减小的趋势，剪切力则呈增大的趋势。在耕作沉积区不同耕作位移处理中，随着耕作位移量的增大，坡面产流速率呈减小趋势，而土壤剥离速率呈增大趋势；0，12 kg/m 的耕作位移处理下坡面水流流态主要表现为紊状急流，当耕作位移量达到 21 kg/m，即下坡部位的细沟因土壤耕作位移被完全填充时，水流流态则为紊状缓流；随着耕作位移量的增大，阻力系数表现为增大趋势，剪切力则呈减小趋势。将坡面产流速率、土壤剥离速率与水动力参数进行相关性分析后，发现雷诺数能够较好的描述耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀状态。研究结果为干热河谷区坡耕地土壤侵蚀机理及治理方法提供了科学依据。

关键词：耕作侵蚀；水动力参数；产流速率；土壤剥蚀率；干热河谷

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)01-0116-09

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.019

Effect of Tillage Erosion on Characteristics of Hydraulic Erosion in the Dry-hot Valley Region

DAI Jiadong[1,2], ZHANG Zehong[3], ZHANG Jianhui[1], JIA Lizhi[4], WANG Yong[1,5], XU Haichao[1,2]

(1.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu* 610041; 2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049; 3.*School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan* 637000; 4.*College of Life and Environment Sciences, Minzu University of China, Beijing* 100081; 5.*Sichuan Agricultural University, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Ya'an, Sichuan* 625014)

Abstract: This study aimed to quantitatively evaluate the effect of tillage erosion on runoff yield, sediment yield as well as hydraulic characteristics in the hilly croplands in the Dry-hot Valley Region by the simulated tillage and scouring experiments. Two forms of tillage erosion were adopted that one was the simulated tillage duration (10－, 20－, 30－, 35－, 40－year tillage) which caused the attenuation of soil thickness at the upper slope positions, and the other was the simulated soil flux (0, 12, 21 kg/m) which occurred in rills at the lower slope positions. Results showed that under the influence of tillage duration, both runoff yield and soil detachment rate displayed an increasing trend with the increase of tillage duration. Runoff stayed in the pattern of rapid laminar-flow for the treatment of 40-year tillage, while the slow laminar-flow for the other treatments. The drag coefficient and shear stress exhibited a decreasing and increasing trend as the tillage duration increased, respectively. Under the influence of soil flux, runoff yield rate was in a decreasing trend with the increase of soil flux while soil detachment rate was in an increasing trend. Runoff changed from the

收稿日期：2020-06-03
资助项目：国家自然科学基金项目(41877069)；四川省科技计划项目(2018SZDZX0034)
第一作者：戴佳栋(1991—)，男，博士研究生，主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail：jd_dai@outlook.com
通信作者：张建辉(1963—)，研究员，博士，博士生导师，主要从事土壤侵蚀与土壤物理研究。E-mail：zjh@imde.ac.cn

pattern of rapid laminar-flow to slow laminar-flow when the soil flux reached 21 kg/m. As the soil flux increased, drag coefficient presented an increasing trend and shear stress was in a decreasing trend. Reynolds number was the best hydrodynamic parameter which could explain the characteristics of hydraulic erosion under the influence of tillage erosion by correlation analysis. These results could provide scientific guidance for the exploration of soil erosion mechanism and treatment methods in the hilly croplands of Dry-hot Valley Region.

Keywords: tillage erosion; hydrodynamic parameters; runoff yield rate; soil detachment rate; dry-hot valley

金沙江干热河谷区是我国西南地区特殊的脆弱生态环境类型区，同时也是长江上游水土作用失衡的关键地带之一[1-2]。长期的人类活动导致干热河谷区水土流失严重，造成严重的土壤质量和生态系统退化，其中坡耕地已经成为水土流失主要的策源地[3-5]。重力侵蚀和沟蚀机理一直是干热河谷区坡耕地土壤侵蚀发生机制的主要研究内容[6-8]。近些年随着对导致干热河谷区水土失衡影响因子研究的逐步深入，有关研究[9-11]发现，耕作侵蚀是干热河谷区坡耕地中另一种重要的土壤侵蚀形式。耕作侵蚀的发生是耕作侵蚀力和土壤景观可蚀性 2 方面因素共同作用的结果，耕作侵蚀强度随着二者的增大而增大[12-13]。干热河谷区坡耕地陡峭的坡度、土壤较高的可蚀性以及人类不合理的耕作方式导致耕作侵蚀模数可以达到与水蚀模数相同的数量级，甚至超过水蚀模数[3,14]。

耕作侵蚀和水蚀作为干热河谷区坡耕地中 2 种重要的土壤侵蚀形式交替出现，除了各自的侵蚀过程造成严重的水土流失外，其相互间的作用引起的侵蚀过程也是总土壤侵蚀的主要构成。尤其是耕作侵蚀对水蚀的作用机制，近些年备受国内外学者[15-17]的关注，并且已经通过物理示踪[18]、侵蚀模型[19]、降雨模拟[20]和小区冲刷试验[21]得到验证。耕作侵蚀对水蚀的作用机制主要体现在 2 个方面[19-21]：(1)坡耕地景观内，耕作活动导致土壤团块向下坡移动，使得上坡部位土层浅薄化，从而通过影响坡面水分蓄存和迁移改变坡面水文和侵蚀过程；(2)耕作侵蚀表现为侵蚀物源传输纽带，土壤团块因耕作位移进入凹坡、细沟、冲沟等收敛地形中，一方面改变了坡面微地貌，影响坡面水文过程，另一方面耕作位移进入收敛地形中的土壤结构疏松，成为水力侵蚀重要的物源。尽管已有研究[19-21]通过降雨模拟和放水冲刷试验分析了以上耕作侵蚀对水蚀作用机制下坡面产流产沙的特征，但鲜有研究报道耕作侵蚀影响下坡面水动力参数的变化和分布特征。水动力参数包括径流流速、径流深、雷诺数、弗劳德数、阻力系数、剪切力、径流功率等指标，其变化规律是探究坡面土壤侵蚀过程和动力学机制的基础[22-24]。因此基于以上所述，本文采用放水冲刷的试验方法，定量评估 2 种耕作侵蚀形式对水蚀作用机制下坡面水动力参数在坡面的变化和分布特征，并对其与坡面产流、土壤侵蚀之间的相互关系进行研究，以期揭示耕作侵蚀影响下坡面水流的水动力学规律，并为研究区水土资源平衡和农业生产可持续发展提供重要的科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于金沙江干热河谷元谋境内(101°35′—102°06′E，25°23′—26°06′N)，海拔 898～2 836 m，属于南亚热带季风气候，年平均气温 21.9 ℃，极端最高气温 42.0 ℃，极端最低气温－2 ℃，年均降水量在 620 mm 左右，集中在 5—9 月，其他月份少雨或无雨，年均蒸发量在 4 000 mm 左右，是年降水量的 6 倍以上，无霜期为 360～365 天，具有炎热干燥、降雨集中和干湿季分明的特征[2-3]。植被主要以禾草和稀疏灌木为主。地带性土壤为燥红土、变性土和紫色土，以燥红土分布最为广泛，其具有土层浅薄、石砾含量高、有效养分含量低和保水性差等特征。

1.2　径流小区布设

于 2016 年 4—6 月在中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所元谋沟蚀崩塌观测试验站内建立径流小区完成冲刷试验。径流小区共 8 个，均长 10 m，宽 2 m，坡度为 10°，土层厚度由上坡向下坡逐渐增大，平均厚度为 40 cm，土壤有机碳含量 5.53 g/kg，容重 1.40×10^3 kg/m^3，黏粒(＜0.002 mm)含量 1.09%，粉粒(0.002～0.05 mm)含量 27.20%，砂粒(0.05～2 mm)含量 71.71%，土壤类型为燥红土。

1.2.1　耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理　上坡土层变薄是耕作侵蚀的典型特征，强烈的耕作侵蚀甚至能够导致上坡耕作层消失，出现淀积层或者母岩裸露的现象[25-26]。因此，在已建立的径流小区距上边界 0～5 m 的部位(称为“耕作侵蚀区”)设置 5 种不同厚度的土层，分别为 0，5，10，20，30 cm，用于代表不同的与耕作年限相关的耕作侵蚀强度(以下均将这种处理称为“耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理”)，其中 0 cm 代表因强烈的耕作侵蚀导致耕作层消失的情况。试验方法参照已有研究[20,27]。具体的试验方法：在耕作侵蚀区的坡面分别挖出 0，5，10，20，30 cm 厚度的土层，随后在开挖土层后的坡面上铺设塑料布，用于模拟耕作层下部相对耕作层具有弱透水或者

不透水性质的淀积层和基岩面[28]，再分别回填 0，5，10，20，30 cm 厚度的土层，并保持土壤容重和坡面坡度一致。回填的土壤颗粒过 1 cm 筛，去除砾石、杂草以及植物根系等非土壤物质，确保每个径流小区的土壤性质较为均一(图 1a)。因而设置的耕作侵蚀区土层厚度分别为 0，5，10，20，30 cm。利用耕作侵蚀速率公式和减少的土层厚度土壤损失量计算耕作年限，耕作侵蚀速率按公式(1)进行计算：

$$R=\frac{10\cdot D\cdot B\cdot(k_1+k_2S)}{L} \tag{1}$$

式中：R 为耕作侵蚀速率(Mg/(hm^2 · tillage pass))；D 为耕作深度(m)；B 为土壤容重(kg/m^3)；k_1 和 k_2 为土壤传输系数(kg/(m · tillage pass))；S 为坡度(m/m)；L 为坡面长度(m)。本研究中耕作深度 D 为 0.2 m，土壤传输系数 k_1 和 k_2 分别为 0.136 8，0.638 4 kg/(m · tillage pass)[10]，坡度 S 为 10°，坡面长度 L 为 10 m。

耕作侵蚀区土壤损失量按公式(2)进行计算：

$$S_L=\frac{10\cdot V_s\cdot B}{A} \tag{2}$$

式中：S_L 为土壤损失量(Mg/hm^2)；V_s 为上坡挖出的土壤体积(m^3)；A 为径流小区面积(m^2)。

耕作次数按公式(3)进行计算：

$$T=\frac{S_L}{R} \tag{3}$$

式中：T 为耕作次数。假定 1 年耕作 1 次，不同耕作层深度与耕作年限折算见表 1。

表 1 耕作侵蚀区不同土层厚度与耕作侵蚀强度间的关系

耕作侵蚀强度	土层厚度/cm	土壤损失量/(t · hm^{-2})	模拟的耕作次数/次	模拟的耕作年限/a
剧烈	0	2800	40	40
极强烈	5	2450	35	35
强烈	10	2100	30	30
中度	20	1400	20	20
轻度	30	700	10	10

1.2.2 耕作沉积区不同耕作位移量处理 细沟和冲沟侵蚀是元谋干热河谷区坡耕地中主要的水蚀形式。当地农民通过对中上坡土壤进行耕作传输作用填充水蚀沟，达到维持农业生产的目的。为了研究发生于细沟内的耕作位移对坡面水动力学特征的影响，基于对干热河谷区细沟形态特征的相关研究和调查[29-30]，在径流小区距上边界 5～10 m 部位模拟设置 2 条水蚀沟(0.3 m 宽×0.3 m 深)，沟间距为 0.5 m(图 1b)(称为“耕作沉积区”)。试验方法参照已有研究[20,27]。具体试验方法：将细沟挖掘出来的土壤团块粉碎后过 1 cm 筛，去除砾石、杂草、植物根系等非土壤物质。对土壤称重后填入细沟内，按每层 5 cm 进行填充，填充后用耕锄进行压实处理。耕作位移量可以通过填入细沟土壤物质的量进行计算[20]：

$$Q_s=\frac{F}{N} \tag{4}$$

式中：Q_s 为耕作位移量(kg/m)；F 为填入细沟的土壤重量(kg)；N 为细沟的长度(m)。细沟内填土量与耕作位移量间的关系见表 2。试验共设置 3 个耕作位移量处理，分别为 0，12，21 kg/m，对应的细沟深度分别为 0.30，0.15，0 m(以下均将这种处理称为“耕作沉积区不同耕作位移量处理”)。

表 2 耕作沉积区填土量与耕作位移量间的转化关系

耕作侵蚀强度	填沟强度	填入土重/kg	耕作位移量/(kg · m^{-1})
无侵蚀	未填沟	0	0
轻度侵蚀	填半沟	60	12
强烈侵蚀	填满沟	105	21

1.3 冲刷试验

基于试验站建立的气象站获取的降雨数据，分析得到 60 mm/h 是干热河谷地区雨季主要的降雨强度之一，换算成放水流量为 10 L/(min · m)，从而完成耕作影响侵蚀区土层厚度和耕作侵蚀作为侵蚀物源传输纽带这 2 种不同耕作侵蚀形式作用下的冲刷试验，观测坡面产流产沙与水动力变化和分布特征。

冲刷装置包括供水系统、蓄水桶、控水阀门、缓冲池和收集桶(图 1)。试验前用 TDR 测定土壤含水量，若径流小区内土壤含水量较高，让径流小区在蒸发作用 3～4 天后再进行观测，确保不同处理的径流小区内土壤含水量在 10%左右。放水冲刷试验开始后，用秒表记录小区下边界出流口开始产流的时间，用 6 000 mL 塑料桶每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙样，至塑料桶 5 000 mL 刻度处，记录每次收集所需的时间，产流时间均持续 30 min。冲刷试验结束后，将 6 000 mL 塑料桶内采集的水沙样摇匀，用 500 mL 的塑料瓶在塑料桶内中间部位采集水沙样，称重获取水沙样总重，采用烘干法(105 ℃)测定泥沙量(g)。

将径流小区坡面按与小区上边界的距离分为上(0～4 m)、中(4～7 m)和下(7～10 m)3 个部位。试验过程中在相同时间测定上、中、下 3 个部位的流速、径流深和径流宽。径流流速是在每个观测部位的中间位置用染色法测得坡面最大流速，然后根据径流流态进行修正(层流的修正系数为 0.67，过渡流的修正系数为 0.7，紊流的修正系数为 0.8)。同时采用直尺在上、中、下的 3 个部位的左、中、右位置分别测定径流深度和径流宽度。

1.4 指标测定及计算

坡面平均产流速率和平均土壤剥离速率分别采用公式(5)和公式(6)进行计算：

$$R=\sum_{i=1}^{n}V/(t_i\cdot n) \tag{5}$$

$$D=\sum_{i=1}^{n}10\cdot m_i/(t_i\cdot A\cdot n) \tag{6}$$

式中:R 为平均产流速率(L/min);V 为收集的径流体积,V 为 5 L;D 为平均土壤剥离速率(g/(m^2 · min));m_i 为用 500 mL 塑料瓶在第 i 个采样点收集的泥沙质量(g);A 为径流小区面积,A 为 20 m^2;t_i 为第 i 次采样的水沙收集时间;n 为采样个数,n 为 15。

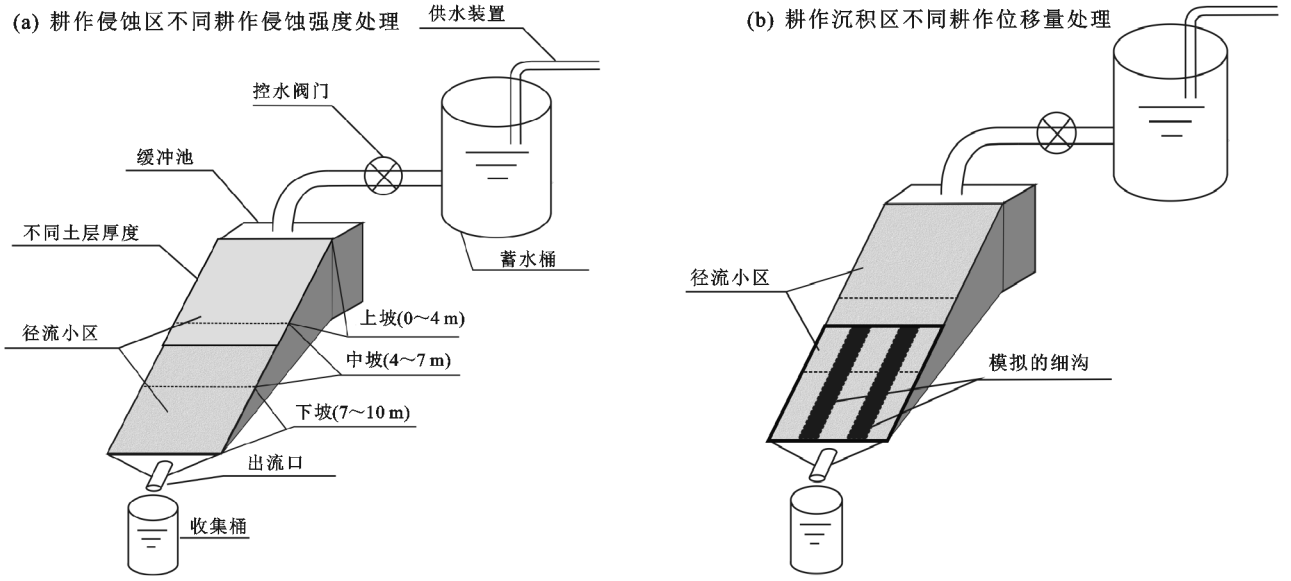


图 1　试验装置示意

采用公式(7)计算雷诺数 Re、公式(10)计算弗劳德数 Fr、公式(11)计算阻力系数 f、公式(12)计算水流剪切力 τ:

$$Re=\frac{VR}{v} \tag{7}$$

式中:R 为水力半径(m);v 为水流运动黏滞系数(m^2/s),分别按公式(8)和(9)进行计算:

$$R=\frac{bh}{b+2h} \tag{8}$$

$$v=\frac{0.01775}{1+0.0337T+0.000221T^2} \tag{9}$$

式中:R 为水力半径(m);b 为水流过水断面宽度(m);h 为径流深度(m);T 为水体温度(℃);V 为径流平均流速(m/s)。

$$Fr=\frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{10}$$

式中:Fr 为弗劳德数;V 为坡面径流平均流速(m/s);g 为重力加速度(m/s^2);h 为径流平均水深(m)。

$$f=\frac{8gRJ}{V^2} \tag{11}$$

式中:f 为 Darcy-Weisbash 阻力系数;J 为水力坡度,近似为坡度的正弦值。

$$\tau=\rho gRJ \tag{12}$$

式中:τ 为径流剪切力(N/m^2);ρ 近似为水流密度,为 1.0×10^3 kg/m^3。

1.5　数据处理

采用 Origin 9.0 软件对产流速率、土壤剥离速率和坡面水动力学数据进行作图,用 SPSS 20.0 软件对产流速率和土壤剥离速率与水动力参数间进行相关性分析。

2　结果与分析

2.1　耕作侵蚀作用下坡面产流产沙特征

坡面地表产流速率和土壤剥离速率是土壤水力侵蚀的直观表现。在放水冲刷试验中,坡面平均产流速率和土壤剥离速率在耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理和耕作沉积区不同耕作位移处理中呈现不同的变化趋势。由图 2a 可知,在上坡侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理中,平均产流速率和平均土壤剥离速率的最大值均出现在 40 年耕作年限处理中,即土层厚度为 0 cm,最小值出现在 10 年耕作年限处理中,即土层厚度为 30 cm。平均产流速率和平均土壤剥离速率均呈现随耕作年限的增长而增大的趋势,说明耕作强度增大导致土层更加浅薄后能够加剧坡面水土流失。

在耕作沉积区不同耕作位移处理的冲刷试验中,平均产流速率最大值出现在 0 kg/m 的耕作位移处理中,即无耕作侵蚀处理,而平均产流速率的最小值出现在 21 kg/m 的耕作位移处理中,即强烈耕作侵蚀处理,平均产流速率呈现随耕作位移量的增大而减小的趋势(图 2b)。而土壤剥离速率则相反,即随着耕作位移量的增大,平均土壤剥离速率呈现出增大的趋势,表明发生于下坡细沟内的耕作位移尽管能够抑制坡面产流,却为水力侵蚀提供了重要的物源。

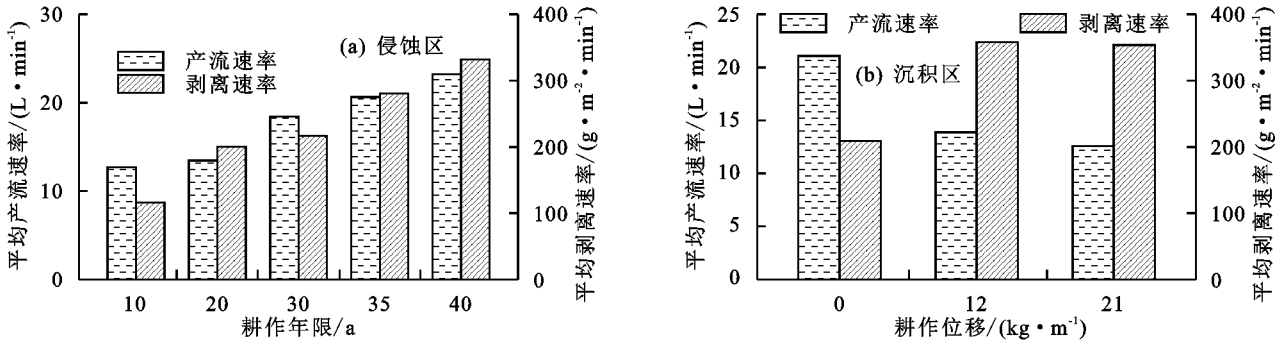


图 2 耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理和耕作沉积区不同耕作位移量处理下的平均产流速率和平均土壤剥离速率

2.2 耕作侵蚀作用下坡面水动力学特征

2.2.1 *上坡侵蚀区不同耕作侵蚀强度作用下坡面水动力学特征* 雷诺数 Re 能够表征水流紊动程度的高低。在上坡侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理的冲刷试验中,水流雷诺数 Re 介于 4 440～23 128,均大于 500,表明不同耕作侵蚀强度处理下产生的坡面水流均属紊流(图 3a)。相比于上坡部位,10,20,30,35,40 年耕作侵蚀强度处理中下坡部位的雷诺数 Re 分别增大了 36.8%,119.0%,142.5%,118.9%,385.0%,增幅表现出随耕作侵蚀强度增大而增大的趋势。此外,在相同坡位和整个坡面上,雷诺数 Re 均随耕作侵蚀强度的增大而增大(图 3a 和表 3),说明上坡部位土层在耕作侵蚀作用下变得浅薄后会对坡面水流紊动程度产生影响。

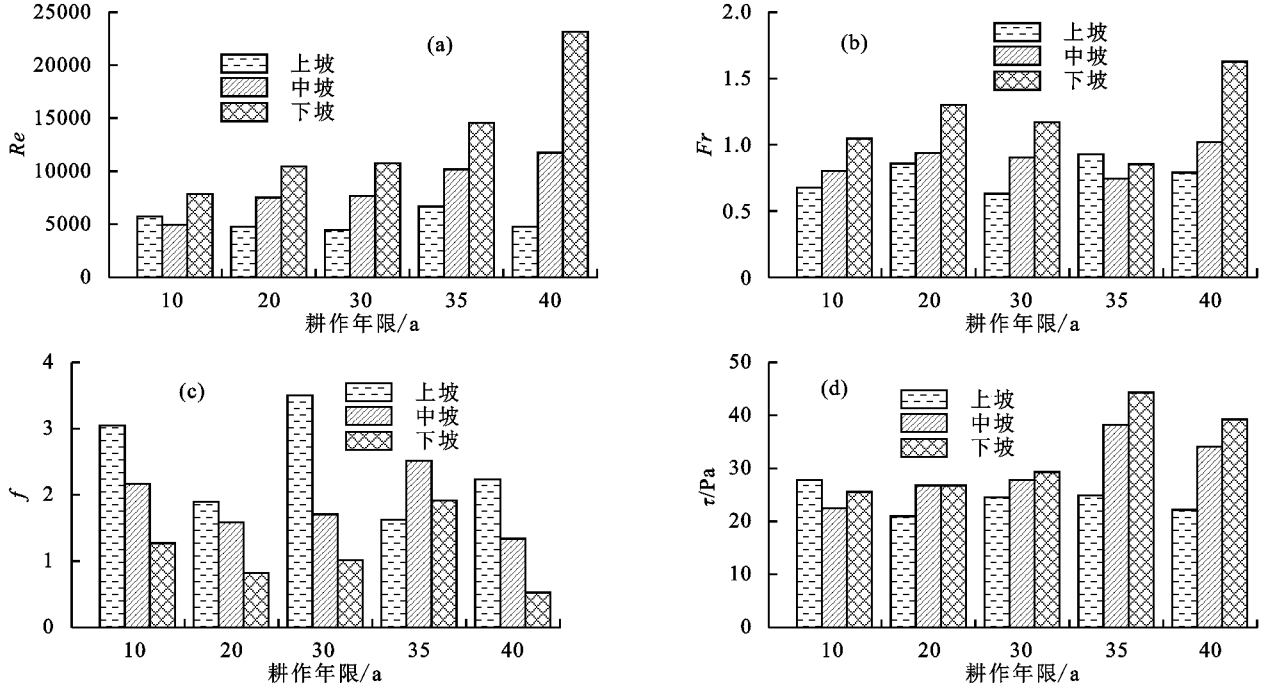


图 3 耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理下的坡面水动力参数

弗劳德数 Fr 是反映水流动态的指标,当 $Fr>1$ 时为急流,$Fr<1$ 时为缓流。本研究中,水流弗劳德数的变化范围在 0.63～1.63,就整个坡面的冲刷过程而言,耕作年限为 10～35 年的水流 Fr 均小于 1,属于缓流状态,耕作年限为 40 年时,坡面水流 Fr 大于 1,属于急流状态(图 3 和表 3)。Fr 在坡面的分布特征表现为沿坡面向下增大的现象,其数值在上坡和中坡部位均小于 1,水流表现为缓流状态,在下坡部位随着水流汇集和细沟的形成,Fr 增大,数值均大于 1,水流属急流状态。特别是在耕作年限为 40 年时,即上坡侵蚀区土层完全消失后,坡面下坡部位的 Fr 急剧增大,说明强烈的耕作侵蚀能够对坡面水流流态产生剧烈的影响。

坡面水流在顺坡向下流动的过程中势必会受到阻力的作用。坡面水流所受阻力主要来自 3 个方面:径流挟带的泥沙、沟槽形态以及坡面土壤颗粒的阻碍作用。对于不同耕作侵蚀强度的处理,水流阻力系数 f 在坡面上的分布总体表现为沿坡面向下递减。上坡部位水流阻力系数 f 的最小值出现在模拟的 35 年耕作侵蚀强度处理中,即上坡侵蚀区土层厚度为 5 cm,中坡和下坡部位水流阻力系数 f 的最小值均出现在 40 年耕作侵蚀强度处理中,即土层因耕作侵蚀完全消失(图 3c)。此外,从表 3 可以看出,整个坡面

上水流阻力系数 f 的最大值出现在 10 年耕作侵蚀强度处理中,最小值与最长的耕作年限 40 年相对应。坡面径流产生的剪切力是导致坡面土壤颗粒剥离、分散和输移的主要动力。坡面径流剪切力 τ 沿着坡面向下增大,并且呈现随耕作侵蚀强度增大而增大的趋势(图 3d 和表 3)。这些结果说明耕作侵蚀导致上坡部位土层浅薄后,通过削弱坡面土层蓄水能力,促进地表水流汇集,从而增大径流深度和减少来自土层表面颗粒的阻力,提升了坡面径流对土壤颗粒的剪切和搬运作用。

2.2.2　耕作沉积区不同耕作位移量处理下的坡面水动力学特征　本研究中,耕作沉积区不同耕作位移处理下的坡面不同部位的雷诺数 Re 介于 5 314～22 067,都远大于 500,说明整个坡面水流均以紊流为主。0,12,21 kg/m 耕作位移处理中下坡部位的雷诺数 Re 相比于上坡部位分别增大了 181.7%,177.9%,143.3%(图 4a),可以看出雷诺数 Re 沿坡面向下的增幅随着耕作位移量的增加而减小。此外,对于相同坡位和整个坡面而言,雷诺数 Re 总体上均表现出随细沟内耕作位移量的增大而减小的趋势(图 4a 和表 4),表明发生于耕作沉积区细沟内的耕作位移通过改变细沟形态能够对坡面水流紊动程度产生影响。

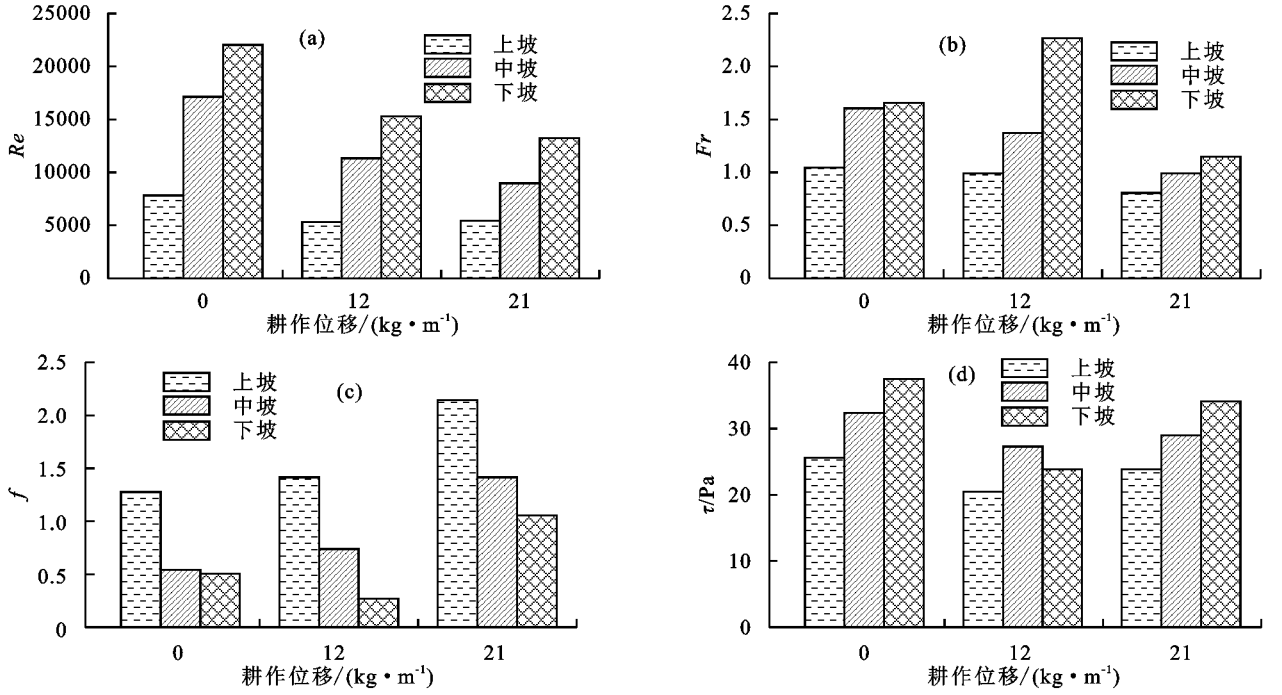


图 4　上坡侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理下的坡面水动力参数

表 3　耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理下的坡面水动力参数

模拟的耕作年限/a	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 f	剪切力 τ/Pa
10	5852	0.80	2.19	25.24
20	6874	0.98	1.44	24.45
30	6862	0.85	1.91	26.81
35	9522	0.83	2.04	34.10
40	10375	1.07	1.21	30.35

由图 4b 可知,在不同耕作位移处理中,弗劳德数 Fr 均沿着坡面向下增大。在 0 kg/m 的耕作位移处理中,坡面水流自坡面上坡部位至下坡部位均属急流状态,随着细沟内耕作位移量的增大,12,21 kg/m 耕作位移处理的坡面上坡部位水流逐渐转变为缓流。此外,在相同的坡位,Fr 总体上呈现随耕作位移量的增大而减小的趋势。就整个坡面而言,0,12 kg/m 耕作位移处理中水流均属急流状态,21 kg/m 的耕作位移处理中水流属缓流状态(表 4),这些结果说明发生于坡面下坡部位细沟内的耕作位移会对坡面水流动态产生影响。

由图 4c 可知,在相同的耕作位移处理下,阻力系数 f 最大值均出现在坡面上坡部位,最小值均出现在坡面下坡部位,表明水流在沿坡面向下流动的过程中受到的阻力逐渐减小。在相同的坡位,随着细沟内土壤耕作位移量的增大,阻力系数 f 总体上表现为增大的现象。在整个坡面中,相比于 0 kg/m 耕作位移处理的坡面阻力系数 f,12,21 kg/m 处理的坡面阻力系数 f 分别增大了 15.7%和 118.6%(表 4),说明发生于坡面下坡部位细沟内的耕作位移会改变水流受到的阻力。

径流剪切力在坡面上的分布表现出与阻力系数相反的现象,即径流剪切力 τ 沿坡面向下增大。此外,在相同坡位和整个坡面上,径流剪切力 τ 的最大值均出现在 0 kg/m 的耕作位移处理中,最小值均出现在 12 kg/m 的耕作位移处理中,这个结果可能受到坡面径流挟沙量和细沟发育的共同影响。

2.3 坡面产流产沙与水动力参数之间的相关性

从表 5 可以看出,在耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理中,坡面平均土壤剥离速率和平均产流速率之间显著相关($P<0.05$),说明坡面径流是引起土壤剥离和搬运的主要媒介。坡面平均产流速率和平均土壤剥离速率均与耕作年限呈显著相关($P<0.05$),即耕作侵蚀强度越大,土层越薄,越能够加剧坡面水土流失。坡面平均产流速率和平均土壤剥离速率与水动力参数间的关系均表现为:与雷诺数 Re($P<0.05$)、弗劳德数 Fr($P>0.05$)和剪切力 τ($P>0.05$)呈正相关,与阻力系数 f($P>0.05$)呈负相关。其中坡面平均产流速率和平均土壤剥离速率均与雷诺数 Re 显著相关($P<0.05$),表明在坡面上坡部位发生耕作侵蚀情形下,雷诺数 Re 在预测坡面产流和土壤侵蚀方面具有较好的作用。

由表 6 可知,在耕作沉积区不同耕作位移处理中,坡面平均土壤剥离速率与平均产流速率间呈负相关($P>0.05$),而与耕作位移量呈正相关($P>0.05$)。此外,坡面平均产流速率和平均土壤剥离速率与 4 个水动力参数间的关系表现完全相反,即平均产流速率与雷诺数 Re($P<0.05$)、弗劳德数 Fr($P>0.05$)和剪切力 τ($P>0.05$)呈正相关,与阻力系数 f 呈负相关($P>0.05$);而平均土壤剥离速率与雷诺数 Re($P>0.05$)、弗劳德数 Fr($P>0.05$)和剪切力 τ($P>0.05$)呈负相关,与阻力系数 f 呈正相关($P>0.05$)。这些结果表明,在坡耕地以水蚀沟为代表的收敛地形中发生耕作位移的情形下,水动力参数对坡面产流速率和土壤剥离速率的指示规律并不一致,可能与因耕作位移进入水蚀沟内的土壤颗粒一方面通过改变水蚀沟的形态特征影响坡面水文过程,另一方面与其耕作后结构松散,易被侵蚀搬运,加剧坡面土壤侵蚀有关。雷诺数 Re 与平均产流速率和平均土壤剥离速率之间的相关系数最高,且与平均产流速率显著相关($P<0.05$),表明在坡面收敛地形中发生耕作位移情形下雷诺数 Re 在预测坡面产流和土壤侵蚀方面具有较好的作用。

表 4 耕作沉积区不同耕作位移量处理的坡面水动力参数

模拟的耕作位移/(kg·m^{-1})	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 f	剪切力 τ/Pa
0	13853	1.40	0.70	30.69
12	9503	1.41	0.81	23.87
21	8177	0.96	1.53	27.97

3 讨 论

3.1 坡面水力侵蚀与上坡侵蚀区不同耕作侵蚀强度的关系

坡耕地坡面上坡部位土块受锄耕和重力双重作用向下坡方向迁移,导致上坡部位土层厚度浅薄化是耕作侵蚀的典型特征之一。众多研究[31-33]表明,土层厚度是蓄积和调节降雨水分迁移的关键因子,深刻影响坡面的径流速率和入渗特性,因而在坡面水文过程和土壤侵蚀中发挥着重要的作用。Fu 等[34]指出在三峡库区坡地土壤的蓄水能力随着土层厚度的增大而增强。Zhang 等[35]指出我国西南地区紫色土坡耕地上坡部位遭受强烈的耕作侵蚀土层变薄后,土壤的稳定入渗速率和蓄水能力均显著低于中下坡部位。本研究中地表产流速率、土壤剥离速率和土壤厚度的关系与 Wang 等[20]在重庆忠县采用降雨模拟试验得到的结果相似,却与 Fu 等[34]的研究得到的结果完全相反。这主要是因为在 Fu 等[34]的研究中土层厚度越薄的小区土层表面覆盖的砾石含量越多,对地表土壤起到了保护作用,反之,土层厚度越大的小区表层砾石含量越少,土壤颗粒易受雨水击溅剥离和搬运流失,土层厚度和砾石含量共同影响着坡面径流和土壤侵蚀。而本研究和 Wang 等[20]的研究中均只考虑了土层厚度这一土壤性质。

表 5 耕作侵蚀区不同耕作强度处理下坡面产流速率、土壤剥离速率和水动力参数之间的相关性

指标	平均产流速率	平均剥离速率	耕作年限	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 f	剪切力 τ
产流速率	1.00	0.94*	0.97**	0.91*	0.41	−0.39	0.81
平均剥离速率		1.00	0.97*	0.96*	0.62	−0.61	0.75
耕作年限			1.00	0.90*	0.48	−0.48	0.77
雷诺数 Re				1.00	0.53	−0.50	0.84
弗劳德数 Fr					1.00	−0.99**	−0.01
阻力系数 f						1.00	0.03
剪切力 τ							1.00

注:** 表示在 0.01 水平上显著相关;* 表示在 0.05 水平上显著相关。下同。

随着耕作侵蚀强度的增大,土层厚度越薄,上坡部位土层的蓄水能力下降,导致更多的水流向下坡方向汇集。径流流速和深度是影响径流水动力参数的 2 个重要性质。Foster 等[36]和 Govers[37]指出径流流速与放水流量之间具有幂函数关系,径流流速呈现随放水流量的增加而增大的趋势。土层厚度与蓄水能

力间的关系清楚的解释了本研究中坡面中坡、下坡部位以及整个坡面的雷诺数和剪切力均随耕作年限的增加而增大的现象,即耕作年限越长,上坡部位土层厚度越薄,蓄水能力越弱,导致更多的水流向中坡和下坡部位汇集,提升坡面径流速度和径流深度,加剧坡面水流紊动程度和对土壤颗粒的剪切作用。因此,耕作侵蚀通过使上坡部位土块发生向下坡方向的位移,导致土层浅薄化,削弱坡面土层蓄水能力,促进坡面水流汇集以及对土壤颗粒的剪切和搬运作用,从而加剧了由水力作用引发的土壤侵蚀。

表 6　耕作沉积区不同耕作位移处理下坡面产流速率、土壤剥离速率和水动力参数之间的相关性

指标	平均产流速率	平均剥离速率	耕作位移	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	阻力系数 f	剪切力 τ
平均产流速率	1.00	−0.99	−0.96	0.99*	0.62	−0.62	0.71
平均剥离速率		1.00	0.89	−0.97	−0.48	0.48	−0.82
耕作位移			1.00	−0.98	−0.82	0.82	−0.47
雷诺数 Re				1.00	0.68	−0.68	0.65
弗劳德数 Fr					1.00	−1.00**	−0.12
阻力系数 f						1.00	0.12
剪切力 τ							1.00

3.2　坡面水力侵蚀与下坡沉积区不同耕作位移的关系

搬运中上坡部位的土壤对分布于下坡部位的细沟进行填充是干热河谷区农民维持坡耕地耕作和农业可持续生产的重要农业措施。此外,坡耕地耕作过程中,土壤团块受锄耕和重力的双重作用下,会迁移至细沟、冲沟以及凹坡部位等收敛地形中,从而改变细沟的形态特征和坡面微地貌。细沟的形态特征已被证明是影响细沟内、细沟间以及细沟上部坡面水动力学特性的重要因素[38-39]。本研究通过模拟发生于下坡细沟内不同的耕作位移量,改变了作为细沟形态特征重要参数的细沟深度[38]。已有研究[39]表明,细沟深度较大时,细沟间和细沟上部的径流更倾向于向细沟内汇集,从而导致细沟内水流速度和和深度增大。表征径流流态的雷诺数、弗劳德数和作为水力学参数的阻力系数与径流剪切力都和径流流速、径流深度有关。Bryan 等[40]通过降雨模拟试验指出细沟内发生溯源侵蚀过程中,细沟内的雷诺数、弗劳德数和径流剪切力均呈现增大趋势。

本研究中存在耕作沉积区细沟内土壤耕作位移量越大,坡面产流速率越小的现象,这是因为细沟内发生耕作位移后,抑制了细沟间和上坡部位径流和泥沙向细沟内汇集的趋势,从而促使径流能够流经更多的小区坡面。除了部分径流被填入细沟内的土壤蓄存外,更多的径流在向下坡方向流动过程中发生垂直入渗,减少了产流量。但该结果与 Wang 等[20]的研究结果相反,这可能是因为 Wang 等[20]的研究采用降雨模拟试验,雨滴通过击溅作用破碎团聚体后形成的细小颗粒会堵塞表层土壤颗粒间的孔隙,形成结皮,从而削弱了地表水分入渗能力,而本研究采用放水冲刷的试验方法,表土层并未形成结皮,水分入渗进入土层较多。此外,尽管通过农业耕作填充细沟可以维持农业生产,但是填充于细沟内的土壤团块经过耕作破碎作用,结构遭受破坏并且变得较为松散,抗蚀性严重减弱,极易被水流冲刷带走。0 kg/m 耕作位移处理的径流小区内,径流剥离的土壤颗粒主要来自细沟间侵蚀、溯源侵蚀和细沟沟壁崩塌,12,21 kg/m 耕作位移处理的径流小区内,径流剥离的土壤颗粒除了上述 3 个来源外,还有因耕作位移进入细沟内的土壤颗粒。长远来看,当坡面径流冲刷时间足够长,因耕作位移进入细沟的土壤颗粒将被完全带走,同时伴随细沟侵蚀,会加剧坡面土壤流失。

4　结 论

(1)模拟耕作侵蚀导致侵蚀区土层浅薄和作为侵蚀物源的传输纽带 2 种耕作侵蚀形式均能够加剧由水力导致的坡面土壤剥离速率,产流速率表现为在耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理中随着耕作侵蚀强度的增大而增大,而在耕作沉积区不同耕作位移处理中,则呈减小趋势。

(2)放水冲刷试验中,2 种耕作侵蚀形式作用下坡面水流流态均为紊流。在耕作侵蚀区不同耕作侵蚀强度处理中,坡面水流主要表现为缓流,阻力系数总体随耕作侵蚀强度的增大而减小,径流剪切力则呈增大趋势。在耕作沉积区不同耕作位移处理中,0.12 kg/m 耕作位移处理下坡面水流属急流,21 kg/m 耕作位移处理下则转为缓流,阻力系数呈现随耕作位移量的增大而增大的趋势,径流剪切力则呈减小趋势。

(3)相比于弗劳德数、阻力系数和剪切力,雷诺数可以更好地描述耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀状态,其中在耕作导致侵蚀区土层浅薄的耕作侵蚀形式中与坡面产流速率和土壤剥离速率均具有正相关关系,在耕作侵蚀作为侵蚀物源传输纽带的耕作侵蚀形式中与坡面产流速率具有正相关关系,与土壤剥离速率具有负相关关系。

可见,耕作侵蚀作用下坡面产流、土壤剥离以及

水动力学特性均会发生改变,且不同耕作侵蚀形式对坡面水力侵蚀的作用机制不一样。上述研究结果为进一步研究干热河谷区坡耕地水土流失机制提供了重要的理论依据。

参考文献:

[1] 聂小军,张建辉,刘刚才,等.金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J].生态环境,2008,17(4):1636-1640.

[2] 黄成敏,何毓蓉,张丹,等.金沙江干热河谷典型区(云南省)土壤退化机理研究Ⅱ土壤水分与土壤退化[J].长江流域资源与环境,2001,10(6):95-101.

[3] 钟祥浩.干热河谷区生态系统退化及恢复与重建途径[J].长江流域资源与环境,2000,9(3):109-116.

[4] 第宝锋,崔鹏,黄胜,等.近 50 年金沙江干热河谷区泥沙变化及影响因素分析:以云南省元谋县为例[J].中国水土保持科学,2006,4(5):23-27,37.

[5] 陈奇伯,王克勤,李金洪,等.元谋干热河谷坡耕地土壤侵蚀造成的土地退化[J].山地学报,2004,22(5):528-532.

[6] Su Z A, Xiong D H, Dong Y F, et al. Hydraulic properties of concentrated flow of a bank gully in the dry-hot valley region of Southwest China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(10):1351-1363.

[7] 何毓蓉,沈南,王艳强,等.金沙江干热河谷元谋强侵蚀区土壤裂隙形成与侵蚀机制[J].水土保持学报,2008,22(1):33-36,42.

[8] 杨鸿琨,苏正安,朱大鹏,等.干热河谷区冲沟地貌演化动力机制及其生态治理模式[J].中国水土保持,2019(3):41-45,75.

[9] Jia L Z, Zhang J H, Zhang Z H, et al. Assessment of gravelly soil redistribution caused by a two-tooth harrow in mountainous landscapes of the Yunnan-Guizhou Plateau, China [J].Soil and Tillage Research,2017,168:11-19.

[10] Zhang J H, Jia L Z, Zhang Z H, et al. Effect of the soil-implement contact area on soil translocation under hoeing tillage [J].Soil and Tillage Research,2018,183:42-50.

[11] Xu H C, Jia L Z, Zhang J H, et al. Combined effects of tillage direction and slope gradient on soil translocation by hoeing [J].Catena,2019,175:421-429.

[12] Van Oost K, Govers G, de Alba S, et al. Tillage erosion: A review of controlling factors and implications for soil quality [J].2006,30(4):443-466.

[13] 许海超,张建辉,戴佳栋,等.耕作侵蚀研究回顾和展望[J].地球科学进展,2019,34(12):1288-1300

[14] 贾立志.横断山区耕作侵蚀强度分级及主要影响因子临界值确定[D].北京:中国科学院大学,2017.

[15] Lobb D A, Kachanoski R G, Miller M H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer [J]. Canadian Journal of Soil Science,1995,75(2):211-218.

[16] Van Oost K, Van Muysen W, Govers G, et al. From water to tillage erosion dominated landform evolution [J].Geomorphology,2005,72(1):193-203.

[17] Zhang J H, Ni S J, Su Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape [J]. European Journal of Soil Science,2012,63(2):165-176.

[18] Quine T A, Walling D E, Chakela Q K, et al. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements [J].Catena,1999,36:115-142.

[19] Li S, Lobb D A, Lindstrom M J, et al. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using Cs technique and soil erosion models [J]. Catena,2007,70:493-505.

[20] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H, et al.Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape [J].Science of the Total Environment,2016,551/552:522-532.

[21] 张泽洪.干热河谷区坡面水蚀与耕作侵蚀的交互作用机制[D].北京:中国科学院大学,2017.

[22] An J, Zheng F L, Lu j, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions [J].Soil Science,2012,177(8):517-526.

[23] 张光辉,卫海燕,刘宝元.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1):58-61.

[24] 田凯,李小青,鲁帆,等.坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J].中国水土保持,2010(4):44-47.

[25] Jia L Z, Zhang J H, Wang Y, et al. Effect of tillage erosion on the distribution of $CaCO_3$, phosphorus and the ratio of $CaCO_3$/available phosphorus in the slope landscape [J].Soil Research,2017,55(7):630-639.

[26] Li F C, Zhang J H, Su Z A. Changes in SOC and nutrients under intensive tillage in two types of slope landscapes [J].Journal of Mountain Science,2012,9:67-76.

[27] 王勇.耕作侵蚀对紫色土坡耕地水蚀的作用机制[D].北京:中国科学院大学,2015.

[28] 李艳梅,王克勤,崔吉林,等.云南干热河谷不同坡面整地方式强化降雨入渗的效益[J].中国水土保持,2008(11): 25-29.

[29] 杨丹,熊东红,刘守江,等.土壤理化及力学性质对干热河谷台地边坡沟蚀发育的影响[J].农业工程学报,2018,34(4):170-176.

[30] Ran H, Deng Q C, Zhang B, et al. Morphology and influencing factors of rills in the steep slope in Yuanmou Dry-Hot Valley (SW China) [J].Catena,2018,165:54-62.

[31] Buttle J M, Creed I F, Pomeroy J W. Advances in Canadian forset hydrology,1995－1998 [J].Hydrological Processes,2000,14(9):1551-1578.

(下转第 131 页)

因子贡献率分析[J].水科学进展,2015,26(6):769-778.
[4] 侯素珍,王平,楚卫斌.黄河上游水沙变化及成因分析[J].泥沙研究,2012(4):46-52.
[5] 时芳欣,郜国明,王远见,等.基于不协调度的黄河下游水沙变化分析[J].人民黄河,2020,42(5):52-55,61.
[6] 冉大川,姚文艺,焦鹏,等.黄河上游头道拐站年径流输沙系列突变点识别与综合诊断[J].干旱区研究,2014,31(5):928-936.
[7] 李超,全栋,张岩,等.黄河(内蒙古段)水沙运动过程特征及演变趋势[J].水土保持学报,2020,34(1):41-46,53.
[8] 冉立山,王随继,范小黎,等.黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J].地理学报,2009,64(5):531-540.
[9] 马超,崔冉昕.基于变化范围法的黄河头道拐站水沙变化分析[J].水力发电学报,2018,37(5):58-68.
[10] 李畅游,李超,史小红,等.黄河内蒙古段河冰生消演变特性及数值模拟技术[M].北京:科学出版社,2018.
[11] 魏晓婷,黄生志,黄强,等.定量分解气候变化与人类活动对季节径流变异的贡献率[J].水土保持学报,2019,33(6):182-189.
[12] 肖毅,杨胜发,邵学军.三峡水库水沙条件时序变化趋势研究[J].泥沙研究,2017,42(6):22-27.
[13] 陈康,苏佳林,王延贵,等.黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J].泥沙研究,2019,44(6):19-26.
[14] 李国英.黄河中下游水沙的时空调度理论与实践[J].水利学报,2004,35(8):1-7.
[15] 全栋,李畅游,李超,等.冰封期黄河悬移质泥沙分布特性研究[J].泥沙研究,2018,43(2):21-26.
[16] 宋本辉,李畅游,李超,等.黄河内蒙古段冰封期泥沙输移特性与规律研究[J].泥沙研究,2015,40(1):36-41.
[17] 彭文昌,李永山.黄河内蒙古段异源水沙输移特性[J].中国沙漠,2016,36(3):805-813.
[18] 杨根生,拓万全,戴丰年,等.风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J].中国沙漠,2003,23(2):54-61.
[19] 田世民,郭建英,尚红霞,等.乌兰布和沙漠风沙入黄量研究[J].人民黄河,2017,39(2):65-70.
[20] 许炯心.黄河内蒙古段支流"十大孔兑"侵蚀产沙的时空变化及其成因[J].中国沙漠,2014,34(6):1641-1649.
[21] 刘通,黄河清,邵明安,等.气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):17-22.
[22] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.
[23] 姚海芳,师长兴,顾畛逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(3):472-479.
[24] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950－2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3): 331-354.
[25] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
[26] Shi C X, Dian Z, You L Y. Changes in sediment yield of the Yellow River basin of China during the Holocene[J]. Geomorphology, 2002, 46(3): 267-283.
[27] 朱吉生,李纪人,黄诗峰,等.近 30 年十大孔兑流域植被覆盖度空间变化的遥感调查与分析[J].中国水土保持,2015(7):68-70.

(上接第 124 页)

[32] Buttle J M, Dillon P J, Eerkes G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: An example from the Canadian Shield [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1/4): 161-177.
[33] Meerveld T V, Weiler M. Hillslope dynamics modeled with increasing complexity [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(1/2): 24-40.
[34] Fu Z Y, Li Z X, Cai C F, et al. Soil thickness effect on hydrological and erosion characteristics under sloping lands: A hydropedological perspective [J]. Geoderma, 2011, 167/168: 41-53.
[35] Zhang J H, Jia L Z, Wang Y, et al. Tillage erosion effect on soil hydrological properties in a hilly landscape [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(9): 1-9.
[36] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(3): 790-796.
[37] Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(5): 515-528.
[38] Qin C, Zheng F L, Zhang X J, et al. A simulation of rill bed incision processes in upland concentrated flows [J]. Catena, 2018, 165: 310-319.
[39] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.
[40] Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiment on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(3): 211-231.