

不同坡度下掺沙对黑土坡面径流侵蚀特征的影响

牟廷森, 沈海鸥, 李洪丽, 贺云锋

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 黑土区野外考察发现, 当地农民通过土壤掺沙的方法改良土壤质地, 以提高作物产量。鉴于此, 基于人工模拟降雨试验, 探究东北典型坡度(3° , 5° 和 7°)条件下掺沙比例(0, 10%, 20%和30%)对黑土坡面径流侵蚀特征的影响, 以期对东北农业生产和土壤侵蚀防治提供科学依据。结果表明: 掺沙比例对坡面径流特征的影响较坡度更加明显; 随着坡度的增加, 掺沙比例对径流特征的影响增大。随着掺沙比例的增加, 平均径流流速从 $5.2\sim 5.3$ cm/s减小到 $2.7\sim 3.4$ cm/s, 产流率和径流量逐渐减小, 掺沙30%时达到最小值。产沙率随掺沙比例和坡度的增大呈先增加再减小的变化。侵蚀量随掺沙比例增大变化显著, 呈先增加后减小的变化, 在掺沙10%和20%时较大。可见, 土壤掺沙($<20\%$)在减小坡面径流量的同时, 亦能增加坡面土壤侵蚀量。从水土保持角度分析, 掺沙处理不利于防治黑土坡面土壤流失, 但是综合考虑其生态经济效益, 适度掺沙能够作为一种黑土区坡耕地农业技术措施。

关键词: 坡度; 掺沙; 径流; 泥沙; 黑土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0043-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.007

Effects of Soil Mixed with Sand on Slope Erosion at the Mollisol Hill Slope

MOU Tingsen, SHEN Haiou, LI Hongli, HE Yunfeng

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: In order to increase crop yield, farmers usually improved soil texture by mixing soil with sand in the Chinese mollisol region. This study was conducted to analyze impacts of different proportions of soil mixed with sand (0, 10%, 20% and 30%) on slope erosion under three slope gradients (3° , 5° and 7°) based on simulated rainfall experiments. The results would provide scientific foundation for agricultural production and soil erosion control in this region. The results showed that the impacts of different proportions of soil and sand mixture on runoff were greater than those of slope gradients, which increased with the increase in slope gradient. As the proportion of sand mixed in the soil increased, the mean runoff velocities varied from $5.2\sim 5.3$ cm/s to $2.7\sim 3.4$ cm/s and runoff rates and total runoff also decreased with the minimum values occurred in the 30% treatments. Sediment rates first increased and then decreased with the increasing proportion of sand mixed in the soil and slope gradient. Similar trend was found in sediment yields and the 10% and 20% treatments had the greater values than others. It could be include that soil mixed with sand less than 20% could decrease the runoff but increase soil erosion. Therefore, the effects of soil mixed with sand cannot provide a comprise solution for preventing soil loss in Chinese mollisol region. However, a moderate proportion of sand mixed in the soil can be used as an altenative agriculture technical measure by considering its ecological and economic benefits.

Keywords: slope gradient; soil mixed with sand; runoff; sediment; mollisol

东北黑土区土壤侵蚀状况直接影响我国粮食安全 and 可持续发展。东北地区纬度较高, 比较寒冷, 有机质分解速度缓慢, 易于在地表积累后形成腐殖质。因此, 该地区土地肥沃, 有利于粮食作物生长^[1-2]。然而, 由于该地区降雨期集中、漫川漫岗地形等自然条

件及开垦利用不当等人为因素, 导致其土壤侵蚀严重, 水土流失面积占该区总面积的46%左右^[3], 使东北黑土区成为全国水土流失比较严重的地区之一^[4-5]。坡度作为影响坡面土壤侵蚀最重要的因子之一, 在一定坡度范围内, 一般表现为随坡度的增加, 径

收稿日期: 2019-12-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目(41601281)

第一作者: 牟廷森(1997—), 男, 硕士研究生, 四川绵阳人, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: Moutingsen@163.com

通信作者: 沈海鸥(1986—), 女, 博士, 吉林大安人, 讲师, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: shensusan@163.com

流流速和输沙能力均增大,土壤侵蚀量也随之增大^[6-7]。土壤质地是影响坡面土壤侵蚀的又一重要因子。现有研究^[8-9]表明,土壤改良剂具有明显的调节土壤质地作用,改善土壤的通气透水性,提高保苗效果等,其中,土壤覆沙或掺沙属于典型的土壤物理改良措施^[10-12],已经逐渐受到学者和农民的关注,已有农民在生产实践中对黑土进行掺沙,以改良土壤性质提高作物产量。但是对掺沙后黑土坡面径流侵蚀变化规律尚不明确,特别是对不同坡度下掺沙对黑土坡面径流侵蚀特征的影响研究还比较缺乏。因此,本研究基于人工模拟降雨试验,通过对东北典型黑土进行掺沙处理,改变土壤质地,探究 3°、5°和 7°坡度下不同掺沙比例对黑土坡面径流侵蚀过程以及径流量、侵蚀量的影响,以期对东北黑土地地区的水土流失治理及农业生产实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 7—8 月在吉林农业大学水土保持科研基地人工模拟降雨大厅完成,所使用的降雨设备为下喷式人工模拟降雨系统,降雨覆盖面积为 6 m×3 m,降雨高度为 6 m,可使至少 95% 的雨滴达到终点速度,降雨均匀度>90%。试验所用土槽规格为:长 1.2 m,宽 0.5 m,深 0.25 m。坡度可调节范围为 0~30°。试验土槽底部有 9 排 3 列均匀的排水孔,共 27 个,其孔径为 1 cm,用于保证试验过程中下渗水分顺利排出^[13]。试验土壤属于东北典型黑土,于 2018 年 6 月取自吉林省榆树市,其土地利用类型为耕地,主要种植作物为玉米,采样时耕层土壤容重平均为 1.20 g/cm³。试验土壤机械组成为黏粒 3.1%,粉粒 88.4%,砂粒 8.5%。为了尽量保持土壤的自然状态,试验所用土样不过筛不研磨,仅除去杂质(植物根系、砾石等)。试验细沙为河沙,用直径为 0.5 mm 的筛网过筛,筛出粒径<0.5 mm 细沙备用。

1.2 试验设计

根据东北黑土区地形特点,将试验坡度设计为 3°、5°和 7°^[14]。试验材料采用准备好的黑土与细沙按照质量比 0:100,10:90,20:80 和 30:70 充分混合,即掺沙比例分别为 0,10%,20%和 30%^[15]。长春国家基准气候站 1983—2012 年的暴雨资料^[16]显示,10 年一遇的降雨量接近 50 mm/h,据此,设计降雨强度为 50 mm/h,降雨历时为 60 min。每个试验处理重复 3 次。

1.3 试验方法

首先,用纱布填充试验土槽底部的排水孔以防止细沙下漏,并在最下层填 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;同时,为了保证

装填样品的均匀性,将细沙层之上分为 4 层(每层厚度为 5 cm),分别装填试验土壤与细沙的混合样品,目标容重为 1.20 g/cm³,根据土槽体积及试验样品含水量可计算得到每层装填样品质量。土槽装填完毕后,自沉降 48 h。

采用 30 mm/h 降雨强度对自沉降后的土槽进行预降雨,至坡面刚刚产流为止,目的是保证试验前期土壤条件的一致性,各试验处理前期土壤质量含水率为(21.7±1.0)%。预降雨结束后,用塑料布将试验土槽表面覆盖,静置 24 h 待开展正式模拟降雨试验。

试验过程中,首先对降雨强度进行率定,以确保模拟降雨强度的准确性和均匀性,当实测降雨强度与目标降雨强度的差值<5%时方可揭开塑料布进行正式降雨试验。坡面开始产流后,记录初始产流时间,接取径流泥沙样品,取样间隔为 1~4 min。此外,每隔 5 min 用高锰酸钾染色剂示踪法测定坡面径流流速,测量流速区间为 100 cm,从距离土槽顶部 10 cm 处开始,至距离土槽底部 10 cm 处结束,测尺长度为 50 cm。

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,并将其放入设置恒温为 105 ℃的烘箱中烘干,称取其质量,用以计算产流率、产沙率及径流量和侵蚀量^[17]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理与分析:采用 Excel 2007 计算径流量,侵蚀量并绘制产流率,产沙率图;采用 SPSS 19.0 软件中方差分析和多重比较(LSD),进行不同坡度和掺沙比例下径流量和侵蚀量显著性水平检验($p<0.05$);由于直接测定的坡面径流流速为坡面优势径流流速,且流态属于紊流或过渡流,故将实测流速乘以修正系数 0.75^[18],作为坡面径流平均流速。

2 结果与分析

2.1 不同坡度下掺沙比例对坡面径流侵蚀过程的影响

图 1 为不同坡度和掺沙比例下产流率随降雨历时的变化。在 3°坡面,掺沙比例为 0,10%和 20%时,从产流开始到降雨结束,其产流率比较稳定,分别为 46.2~49.2,41.8~44.8,43.7~46.4 L/(m²·h);而掺沙比例为 30%时,从 7 min 左右开始产流,产流率呈现逐渐增长,并在 40 min 左右达到相对稳定的变化趋势,其稳定数值(32.0 L/(m²·h))明显小于其他掺沙处理;在 5°坡面,掺沙 0 和 10%处理的产流率大小与变化趋势相似,其随降雨历时的变化比较稳定(50.0 L/(m²·h));掺沙 20%与 30%处理的产流率变化趋势相似,其随降雨历时的变化呈现缓慢增长,至 35 min 左右达到相对稳定的变化,而产流率大小在降雨前期差异较小,至降雨后期,掺沙 20%处理的

产流率($34.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)明显大于掺沙 30%处理的产流率($27.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$);在 7° 坡面,掺沙 0、10%和 20%处理的产流率变化趋势比较稳定,其值分别稳定为 $35.0, 40.0, 45.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,即在一定条件下,随着掺沙比例的增加,其稳定产流率逐渐增加;但对于掺沙 30%处理,其产流率最低,在降雨 8 min 左右开始产流,其后呈缓慢增长趋势,至 45 min 达到相对稳定状态,其稳定值约为 $28.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。分析原因是掺沙能够增加土壤孔隙度,在坡面较为平缓时,掺沙有助于增加土壤入渗率,影响坡面径流流动过程和径流流速,进而减少坡面产流率^[12];但随着坡度的增大,径流沿着斜坡走向的作用力逐渐增大,且坡面物质的稳定性逐渐降低^[19],掺沙反而为径流的顺畅流动创造了有利条件,使得产流率随掺沙比例的增加而增大,至掺沙达到 30%时,这种坡度的影响被减弱,原因是该掺沙条件下,其土壤入渗率大幅增加,从而造成产流率明显降低。

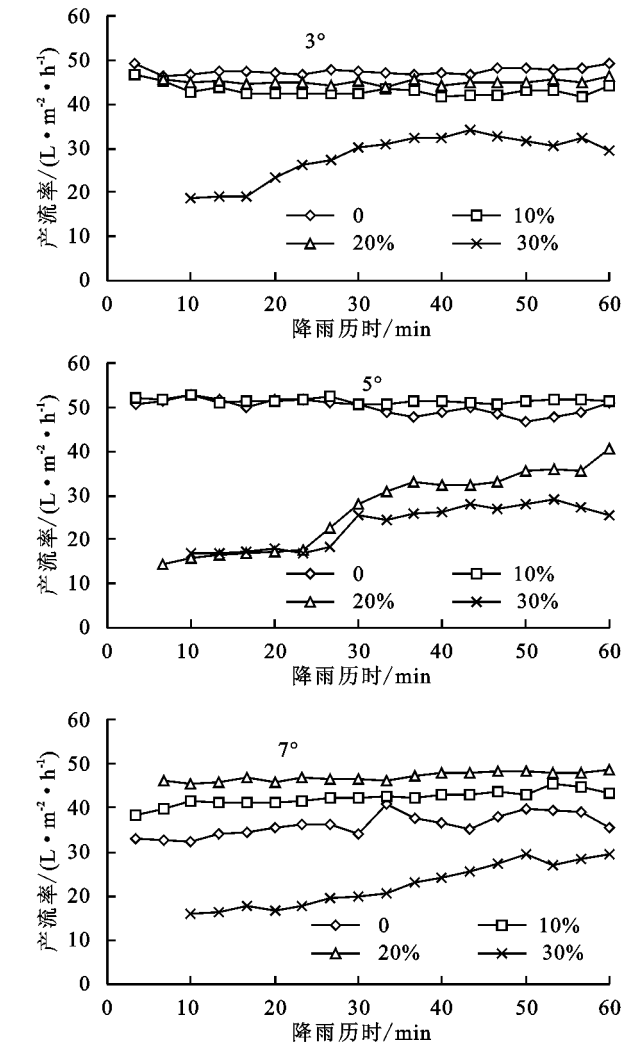


图1 不同坡度及掺沙比例条件下产流率随降雨历时的变化

试验条件下,随着掺沙比例的增加,其坡面产流时间延长,且坡面平均径流流速从 $5.2\sim 5.3\text{ cm/s}$ 减小到 $2.7\sim 3.4\text{ cm/s}$ (图 2)。在同一掺沙比例条件下,3 个坡度

处理的坡面径流流速差异相对较小。可见,试验条件下,掺沙比例对坡面径流特征的影响较坡度更加明显。随着坡度的增加,掺沙比例对产流率的影响逐步呈现明显差异,即坡度越大,不同掺沙比例处理间径流率随时间变化趋势的差异越大(图 1)。已有研究^[20]表明,随坡度的增加,坡面初始产流时间逐渐缩短^[21],产流率逐渐减小或者变化不明显。本研究初始产流时间及产流率随降雨历时的变化趋势亦受坡度的影响,且不同掺沙比例试验处理受坡度的影响程度不同。

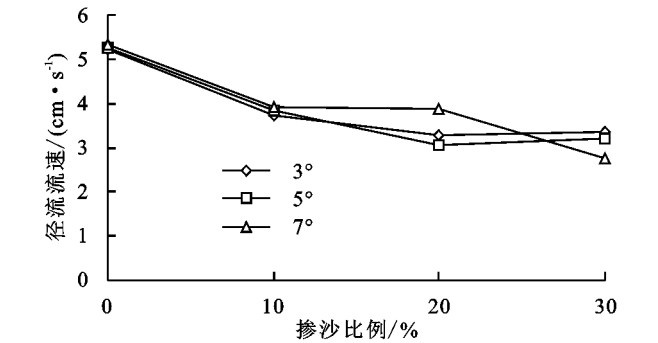


图2 不同坡度和掺沙比例处理的坡面平均径流流速

由图 3 可知,掺沙比例为 0 时, 3° 坡面产沙率相对稳定,主要在 $40\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动; 5° 坡面产沙率随降雨历时的变化比较稳定,但与 3° 坡面相比有较大增长,在 $290\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动; 7° 坡面从产沙开始呈缓慢增长趋势,至 50 min 左右达到相对稳定状态,产沙率变化于 $26\sim 70\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。掺沙 10%时, $3^\circ, 5^\circ$ 和 7° 坡面的产沙率变化趋势均相对比较稳定,分别在 $55, 400, 200\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动。掺沙 20%时, 3° 坡面产沙率在 30 min 前呈增长趋势,至 30 min 达到相对稳定,并在 $80\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动; 5° 和 7° 坡面产沙率相对稳定,在 $120\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动。掺沙 30%时,3 个坡度下产沙率均比较小,其值均在 $1.0\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右波动。综上所述,4 种掺沙比例中,掺沙 10%和 20%处理的产沙率较大,掺沙 30%处理的产沙率最小;其中, 3° 和 7° 坡面掺沙 0 处理的产沙率也比较小,而 5° 坡面掺沙 0 处理的产沙率介于掺沙 10%和 20%处理之间。分析原因为掺沙能够改变土壤质地,从而影响土壤孔隙度和产流率^[12];当土壤不掺沙(0)时,试验土壤含有较多的粉粒和黏粒,其在降雨条件下遇水黏结^[22],造成产沙率相对较小。但是,由于试验土壤透气透水性差,直接影响坡面植被生长,为改变这一不利状况,通过土壤掺沙方法可有效调节土壤颗粒组成,改变土壤孔隙及土壤容重等。试验条件下, 5° 坡面掺沙 20%处理由于受坡度条件和掺沙处理的共同影响,造成产流率相对较小(图 1),产沙率甚至低于掺沙 0 处理;除此之外,掺沙 10%和 20%处理的产沙率相对较高。可见,

该处理下土壤颗粒更容易随径流流失,但是这一土壤条件更有利于植物生长^[23];值得注意的是,随着掺沙比例逐渐增加,达到 30%左右时,其土壤孔隙度进一步提高,土壤入渗率大幅增加,地表径流明显减少,从而造成产沙率降低。

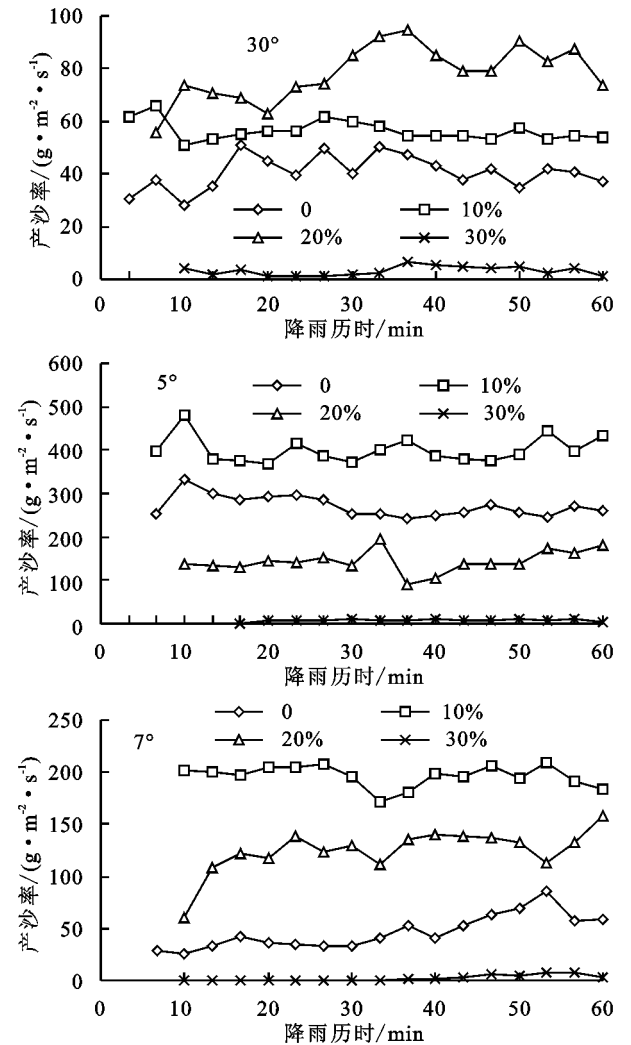


图 3 不同坡度及掺沙比例条件下产沙率随降雨历时的变化

综上可知,土壤掺沙处理和坡度因子均对黑土坡面产流率大小和变化趋势产生影响,其中前者的影响较后者更加明显。此外,在一定掺沙比例范围内(<20%),土壤掺沙处理能够增加坡面产沙率,促进坡面植被生长;但是超出这一掺沙比例,其坡面产沙率相对较小,且松散的掺沙土壤不利于保水保肥,反而不利于植被生长发育。因此,在水土保持实践工作中,应根据具体坡度,评价坡耕地黑土掺沙处理的可行性。

2.2 不同坡度下掺沙比例对坡面径流量及侵蚀量的影响

由表 1 可知,3°坡面,掺沙 0、10%与 20%处理的径流量差异较小,而掺沙 30%处理的径流量减少 50%,与其他处理的径流量差异显著;5°坡面,掺沙 0 与 10%处理的径流量相近,其值是掺沙 20%和 30%处理径流量的 2.5 倍;7°坡面,随着掺沙比例由 0 增

加为 20%,其坡面径流量呈梯度增长,而掺沙 30%处理的径流量是掺沙 20%处理径流量的 42.8%;在此坡度下,掺沙 0 与掺沙 10%、20%和 30%处理间径流量皆差异明显,掺沙 10%与 20%处理间径流量没有显著性差异,掺沙 30%与掺沙 10%和 20%处理间径流量差异显著。掺沙 0、10%和 30%时,3 种坡度下径流量没有明显差异,而掺沙 20%时,5°坡面径流量与 3°和 7°坡面处理的径流量差异显著。分析原因为掺沙能改变土壤入渗状况,宋日权等^[24]研究表明,当掺沙比例>25%时,可造成土壤入渗率随土壤孔隙度的大幅增加而增大,进而减少地表径流。本研究中,当掺沙比例达到 30%时,其土壤入渗率最大,因此产流率最小,相应的径流量最低。综上可见,试验条件下,掺沙比例对坡面径流量的影响较坡度的影响更加明显。

对于 3°坡面,随着掺沙比例由 0 增长为 20%,侵蚀量逐渐增大;但是在掺沙 30%时,其侵蚀量显著减小,掺沙 0、10%和 20%处理的侵蚀量是掺沙 30%处理的 15~25 倍;在此坡度下,仅掺沙 20%与 30%处理的侵蚀量有显著性差异(表 1)。对于 5°坡面,掺沙 0 和 10%处理的侵蚀量较大,且前者占后者的 83.8%;而掺沙 10%处理的侵蚀量是掺沙 20%处理的 2.7 倍,是掺沙 30%处理的 51 倍;在此坡度下,不同掺沙比例侵蚀量差异显著。对于 7°坡面,掺沙 10%处理的侵蚀量最大,是掺沙 0 处理的 4 倍,是掺沙 20%处理的 1.7 倍,是掺沙 30%处理的 130 倍,在此坡度下,掺沙 30%处理的侵蚀量与前 3 种掺沙比例处理有显著性差异。已有研究^[25]表明,随着坡度的增大,侵蚀模数呈现先增加后减少的趋势,本研究在掺沙 0、10%和 30%时,5°坡面处理的侵蚀量最大;在掺沙 20%时,7°坡面处理的侵蚀量最大,与之结果相符。在 4 种掺沙比例中,掺沙 10%和 20%处理的侵蚀量比掺沙 0 和 30%处理的侵蚀量大,且掺沙 30%时侵蚀量最低,原因在于掺沙能够改变土壤颗粒组成,提高砂粒占比,降低土壤中黏粒和粉粒的含量从而改变土壤质地。黏粒与粉粒是土壤中粒径较小的颗粒,其表面积大,是决定土壤吸附性能大小的主要原因;而砂粒表面积小,是决定土壤通气性和持水保水能力的关键^[26]。因此,掺沙可造成土壤黏滞性降低^[27]。当掺沙比例较低时(10%~20%),土壤孔隙度增加、土粒较松动,使得土壤更容易随坡面径流而流失;当掺沙比例较高时(30%),土壤中大孔隙增多,从而造成土壤入渗率大幅增加^[11,28],坡面径流量减少,侵蚀量亦随之减少,且试验过程中坡面并未发生明显沉积,表明该结果与径流的输沙能力的关系不明显,反而受土壤入渗能力影响较大。结果表明,在一定掺沙比例范

围内(<20%),土壤掺沙处理能够增加坡面侵蚀量;但是超出这一掺沙比例,其坡面侵蚀量明显减小。综上所述,土壤掺沙在减小坡面径流量的同时,亦能增加坡面土壤侵蚀量。

表 1 不同坡度和掺沙比例的径流量和侵蚀量

坡度/ (°)	0		10%		20%		30%	
	径流量/L	侵蚀量/g	径流量/L	侵蚀量/g	径流量/L	侵蚀量/g	径流量/L	侵蚀量/g
3	22.7Aa	19.5Bab	20.4Aa	21.8Cab	21.1Aa	34.6Aa	12.0Ab	1.3Ab
5	23.7Aa	100.9Aa	23.9Aa	120.4Aa	9.4Bb	44.4Ab	8.6Ab	2.4Ac
7	16.9Ab	23.2Ba	20.0Aa	92.9Ba	22.2Aa	56.9Aa	9.5Ac	0.8Ab

注:同列不同大写字母表示不同坡度下各指标在 $p<0.05$ 水平上差异显著;同行不同小写字母为不同掺沙比例下各指标在 $p<0.05$ 水平上差异显著。

综上所述,掺沙比例对黑土坡面径流侵蚀特征影响显著,但是这种影响在不同坡度下的具体表现呈现一定差异。从水土保持角度分析,土壤掺沙不利于防治黑土坡面表土流失;但是综合考虑其生态经济效益,适度掺沙(<20%)能够作为一种农业技术措施。

3 结论

(1)随着掺沙比例的增加,坡面产流时间延长,平均径流流速从 5.2~5.3 cm/s 减小到 2.7~3.4 cm/s,产流率和径流量逐渐减小。当掺沙比例达到 30%时,该处理产流率最小,相应的径流量最低(8.6~12.0 L)。此外,掺沙比例对坡面径流特征的影响较坡度更加明显;随着坡度的增加,掺沙比例对坡面产流率和径流量的影响逐渐增强。

(2)试验条件下,掺沙 10%和 20%处理的产沙率及侵蚀量相对较高。可见,在一定掺沙比例范围内(<20%),土壤掺沙处理能够导致坡面产沙率和侵蚀量增加;但是超出这一掺沙比例,其坡面产沙率和侵蚀量明显减小。从水土保持角度分析,土壤掺沙不利于防治黑土坡面土壤流失;但是适度掺沙(<20%)能够促进粮食生产,建议在生产实践中结合具体的坡度条件和土壤特征应用这一土壤改良方法。

参考文献:

[1] 韩晓增,邹文秀.我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.

[2] 李平,郎漫.开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率的影响[J].土壤学报,2019,10(30):1-9.

[3] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019,35(14):133-140.

[4] Gu Z J, Xie Y, Gao Y, et al. Quantitative assessment of soil productivity and predicted impacts of water erosion in the black soil region of northeastern China[J].Science of the Total Environment,2018,637/638:706-716.

[5] Fang H Y, Sun L Y, Qi D L, et al. Using ¹³⁷Cs technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, North-east China[J].Geomorphology,2012,169:142-150.

[6] 师宏强,刘刚,谷举,等.不同坡度坡面径流输沙能力对

集中流流量变化的响应[J].水土保持学报,2018,32(1):25-31.

[7] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,15(3):57-63.

[8] 米俊珍,刘景辉,杨彦明,等.沙质土壤改良剂对旱作谷子苗期生长及土壤保水性能的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(2):92-96.

[9] 王睿彤,孙景宽,陆兆华.土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响[J].生态学报,2017,37(2):425-431.

[10] Ma Y J, Li X Y. Water accumulation in soil by gravel and sand mulches: Influence of textural composition and thickness of mulch layers[J].Journal of Arid Environments,2011,75:432-437.

[11] 马征,张柏松,徐长英,等.改良剂对粘质潮土团聚体特征及分形维数的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):337-341.

[12] 马彦霞,王晓巍,张玉鑫,等.河西绿洲区菜田掺沙对土壤理化性状和甘蓝生长的影响[J].核农学报,2017,31(11):2265-2272.

[13] 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.

[14] 沈海鸥,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):123-126.

[15] 李文斌,李新平,李海洋,等.不同掺沙比例对烟区黏质土壤微生态特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):85-90,96.

[16] 刘志生,张莉,杨志东,等.长春市新一代暴雨强度公式的推求研究[J].中国给水排水,2014,30(9):147-150.

[17] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.

[18] 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.

[19] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J].Catena,2001,46:103-123.

土壤养分及微生物特征[J].西南农业学报,2018,31(6):1227-1233.

[7] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35,81.

[8] 何秀,文小琴,舒英格,等.喀斯特石漠化区土地利用方式对土壤质量性状的影响[J].江苏农业科学,2017,45(9):234-238.

[9] 彭文君,舒英格.喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程[J].生态学报,2018,38(3):852-865.

[10] 彭文君,舒英格.基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J].水土保持研究,2018,25(1):342-348,355.

[11] Yuan G, Lavkulich L M. Sorption behavior of copper, zinc, and cadmium in response to simulated changes in soil properties[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,1997,10(6):985-992.

[12] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. Solubility, sorption and desorption of native and added cadmium in relation to properties of soils in New Zealand[J].European Journal of Soil Science,2008,14(1):68-78.

[13] Wei X H, Liu S J, Müller K, et al. Urbanization-induced acid rain causes leaching loss of calcium from limestone-derived soil in South China [J]. Journal of Soils and Sediments,2019,19(11).

[14] 倪大伟,王妍,刘云根,等.典型岩溶小流域不同土地利用类型土壤钙分布及形态特征[J].西南林业大学学报(自然科学版),2018,38(2):83-88.

[15] 胡乐宁,苏以荣,何寻阳,等.西南喀斯特石灰土中钙的形态与含量及其对土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2012,45(10):1946-1953.

[16] Yang H, Liang J H, Chen J R, et al. Soil calcium speciation at different geomorphological positions in the Yajikarst experimental site in Guilin, China[J].Journal of Resources and Ecology,2015,6(4):224-229.

[17] 陈同庆,魏兴琥,关共凑,等.粤北岩溶区不同土地利用方式对土壤钙离子的影响[J].热带地理,2014,34(3):337-343.

[18] 史迎春,舒英格.喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析:以贵州晴隆县为例[J].林业资源管理,2017,38(1):135-143,152.

[19] 余海,王世杰.土壤中钙形态的连续浸提方法[J].岩矿测试,2007(6):436-440.

[20] 李天杰,赵烨,张科利,等.土壤地理学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2004.

[21] 徐畅,高明.土壤中镁的化学行为及生物有效性研究进展[J].微量元素与健康研究,2007,24(5):51-54.

[22] 黄芬,胡刚,涂春燕,等.岩溶区不同土地利用类型土壤钙形态分布特征[J].南方农业学报,2015,46(9):1574-1578.

[23] 尹锴,崔胜辉,赵千钧,等.基于冗余分析的城市森林林下层植物多样性预测[J].生态学报,2009,29(11):6085-6094.

[24] 李强,李忠义,靳振江,等.基于典范对应分析的铅锌矿尾砂坝坍塌污染土壤特征研究[J].地质论评,2014,60(2):443-448.

[25] 李红林,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J].土壤学报,2015,52(6):1345-1355.

[26] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.

(上接第 47 页)

[20] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67,72.

[21] 王杰,王妍,许晓梁,等.坡度对坡面降雨产流规律的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):372-376.

[22] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):11-17.

[23] 李云飞,张立新,廖超英,等.粘土掺砂对烤烟氮、钾含量和光合特性及产量的影响[J].西北农业学报,2013,22(2):85-89.

[24] 宋日权,褚贵新,冶军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(增刊 1):109-114.

[25] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.

[26] 毛伟兵,王景元,孙玉霞,等.入田泥沙对黄河三角洲地区土壤物理性状的影响:以小开河引黄灌区为例[J].生态环境学报,2010,19(1):212-217.

[27] 李文斌,李新平,李海洋,等.不同掺沙比例对烟区黏质土壤微生态特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):85-90,96.

[28] 宋日权,褚贵新,张瑞喜.绿洲农田表层掺砂、覆砂对土壤水分入渗的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2010,28(3):360-365.