

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.010

杨毅, 蒙仲举, 陈晓燕. 荒漠草原产流产沙过程及养分运移特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 45-54.

YANG Yi, MENG Zhongju, CHEN Xiaoyan. Process of runoff and sediment yield and nutrient transport characteristics in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 45-54.

荒漠草原产流产沙过程及养分运移特征

杨毅¹, 蒙仲举¹, 陈晓燕²

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区社会科学院, 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 荒漠草原夏季降雨强度大且集中性强, 水力侵蚀危害严重, 明确荒漠草原区产流产沙过程及养分运移规律对该地区开展水土保持工作有重要意义。[方法] 试验基于天然降雨观测和人工模拟降雨的方法, 研究荒漠草原区产流产沙过程及养分运移规律, 并通过对植被进行不同处理研究植被对产流产沙的影响。[结果] (1) 不同植被处理方式的水土保持效果不同。3 种不同处理方式中天然草地的水土保持效果最好, 减流率与减沙率分别为 11.37% 和 49.67%。(2) 产流产沙过程改变地表土壤物质组成, 使地表土壤粗粒化, 还对土壤养分产生影响。降雨后砂粒含量增加 5.97%~15.71%, 土壤速效 N、P 及有机质分别减少 40.84%, 27.08%, 33.49%。(3) 坡面产流产沙量随坡度和降雨强度的增加而增加, 幂函数能较好地拟合降雨历时与产流量和产沙量的关系。随降雨强度增加, 坡度为 5°~25°的峰值产流量平均增加 6.70 L; 降雨强度 0.6~2.0 mm/L 时, 产沙量增长速度加快的拐点出现在坡度 15°~20°。[结论] 研究结果可为荒漠草原区水土流失的综合防治提供理论参考, 有助于改善荒漠草原区生态环境, 有利于该地区开展水土保持工作。

关键词: 水力侵蚀; 荒漠草原; 养分运移; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0045-10

Process of Runoff and Sediment Yield and Nutrient Transport Characteristics in Desert Steppe

YANG Yi¹, MENG Zhongju¹, CHEN Xiaoyan²

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Academy of Social Science, Hohhot 010010, China)

Abstract: [Objective] The summer rainfall intensity in the desert steppe is strong and concentrated, and the harm of hydraulic erosion is serious. It is of great significance for soil and water conservation in this area to clarify the process of runoff and sediment yield, as well as the law of nutrient transport. [Methods] The experiment is based on natural rainfall observation data and artificial rainfall simulation methods, studying the runoff and sediment production processes, nutrient transport patterns in the desert steppe area, and investigating the impact of vegetation on runoff and sediment production through different vegetation treatments. [Results] (1) Different vegetation treatments had different effects on soil and water conservation. Among the three different treatments, the soil and water conservation effect of natural grassland the best, and the runoff reduction rate and sediment reduction rate were 11.37% and 49.67%, respectively. (2) The process of runoff and sediment production would change the material composition of surface soil, make the surface soil coarse-grained, and also affect soil nutrients. After rainfall, the sand content increased by 5.97%~15.71%, and the soil available N, P and organic matter decreased by 40.84%, 27.08%, 33.49%, respectively. (3) The runoff and sediment yield increased with the increase of slope and rainfall intensity, and the power function can better fit the relationship between rainfall duration and runoff and sediment yield.

收稿日期: 2024-01-01

修回日期: 2024-02-07

录用日期: 2024-02-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-19

资助项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目 (BR22-13-03); 国家自然科学基金项目 (42067015)

第一作者: 杨毅 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 17800602069@163.com

通信作者: 蒙仲举 (1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: mengzhongju@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

With the increase of rainfall intensity, the peak runoff yield increased by 6.70 L on average when the slope was 5°~25°. When the rainfall intensity is 0.6~2.0 mm/L, the inflection point of the sediment yield increase rate will appear between the slope of 15°~20°. [Conclusion] The research results can provide a theoretical reference for the comprehensive prevention and control of soil and water loss in desert steppe areas, which is helpful in improving the ecological environment of desert steppe regions and carrying out soil and water conservation efforts in this area.

Keywords: water erosion; desert steppe; nutrient transport; sediment yield

Received: 2024-01-01 Revised: 2024-02-07 Accepted: 2024-02-25 Online(www.cnki.net): 2024-04-19

水力侵蚀是世界上分布最广、危害也最为普遍的一种土壤侵蚀类型,侵蚀强度与地表径流形成过程密切相关^[1]。降雨是水力侵蚀发生的主要驱动力^[2],降雨形成地表径流,径流搬运土壤表层细粒物质和有机物,改变土壤结构,造成土壤肥力流失^[3-4],进而导致土地生产力的下降^[5]。国内外学者对降雨产流产沙过程进行了大量的研究,王升等^[6]在黄土地区通过径流小区放水试验研究发现,植被覆盖使产流时间滞后,并且随着植被覆盖的增加,径流量显著减少,产沙量也随之降低;而在南方红壤区,产沙量同径流量的相关性随着坡度增加而减小^[7];降雨的移动方向也影响坡面产流产沙过程,2种移动方向均显著提前产流开始时间,而降雨向上移动类型中峰值产沙量时间也提前,但降雨向下移动类型中并未达到峰值产沙量,其原因可能是由于降雨向下移动过程中所携带的泥沙堆积于下坡面增加表层土壤的抗蚀能力^[8]。侵蚀泥沙中养分含量(如氮、磷等)较降雨前表土的养分含量高,泥沙中养分含量随着降雨次数的增加呈现一定规律性的变化的现象称为泥沙富集效应^[9]。已有研究^[10]发现,侵蚀泥沙中氮浓度随时间而降低,并逐渐接近稳定值,同时有机氮是侵蚀泥沙中氮浓度的主要种类。

荒漠草原是荒漠和草原的过渡区,我国荒漠草原大部分位于集二线(集宁—二连浩特)以西,地形大多为起伏不平的丘陵和山地,夏季降雨强度大,集中性高,水流汇集于低洼处产生径流对地表造成侵蚀。此外,该区域风沙活动强烈,土壤风蚀严重致使土壤质地粗粒化易于流失,并且通过影响地表径流流速和路径间接影响地表侵蚀过程,加重荒漠草原区水土流失^[11]。

综上所述,国内外有关水力侵蚀下产流产沙及物质运移的研究大多集中于黄土带及山地丘陵的坡面上^[6,12-16],而水力侵蚀下荒漠草原区产流产沙鲜有报道。因此,进一步研究降雨影响下荒漠草原区产流产沙规律,对于深入认识荒漠草原区水蚀危害具有重要意义,为该区开展生态修复综合治理提供理论依据。鉴于此,本文选取希拉穆仁荒漠草原为研究区,基于

天然降雨观测数据,结合人工模拟降雨试验,研究该地区降雨前后颗粒变化及产流产沙过程,分析降雨过程中坡度和降雨强度对产流产沙的影响,比较降雨前后土壤颗粒变化等,深入了解荒漠草原区降雨条件下产流产沙规律,为该区开展水土保持工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站(以下简称为“研究站”),该站坐落于内蒙古自治区包头市达尔罕茂名安联合旗(以下简称“达茂旗”),地理位置(41°12′—41°31′N, 111°00′—111°20′E)。达茂旗位于阴山山脉北侧,平均海拔 1 642.6 m,地势南高北低,向北倾斜,坡度平均为 4.8°。气候属中温带半干旱大陆性季风气候,春秋季节干旱多风,夏季降水充沛,冬季寒冷干燥。多年平均降水量为 285 mm,年平均蒸发量达到降水量的 8 倍。年平均风速 5.2 m/s,冬季和春季多以北风和西北风为主,年平均大风日数为 63 天。年平均气温 2.5℃,年平均日照率 72%,有利于牧草生长。希拉穆仁草原属典型的荒漠草原,主要植物种类有冰草(*Agropyron cristatum*)、克氏针茅(*Stipa capillata*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、羊草(*Leymus chinensis*)等旱生草本植物。土壤以栗钙土和棕钙土为主,地表普遍沙化,腐殖质层薄,有机质含量低。试验前期对研究区内土壤机械组成调查结果见表 1。

表 1 研究区土壤机械组成

Table 1 Soil mechanical composition in the study area					
土层 深度/cm	各粒级含量/%				
	砂粒	粗粉粒	中粉粒	细粉粒	黏粒
0—5	75.60	6.40	5.20	4.00	8.80
5—10	76.60	8.00	4.20	3.60	7.60
10—20	83.00	3.60	2.20	2.40	8.80
20—30	71.60	6.40	5.40	6.40	10.20
0—30	76.70	6.10	4.25	4.10	8.85

1.2 试验设计与方法

本次试验均在干燥、无风的环境下进行,尽量减少天气对试验的影响。模拟试验径流小区建立于与研究区植被类型相似、植被覆盖度相近且无人为干扰区域,径流小区建设过程中所使用的土壤是由小区下方土壤分层取出后并分层回填至设计坡度,尽量保证与真实草地一致。而天然降雨观测试验选取研究区内具有代表性样地,径流小区建立过程中对原地扰动尽量小。为保证人工模拟降雨过程中降雨均匀性和平均雨强,在径流小区周围均匀布置6个雨量桶进行标定。

冲刷试验在研究站内封禁草场进行,在坡度、土壤和物种组成等相似的地段设置径流冲刷小区,不同小区处理为:(I)对照(严重退化的裸露地表斑块,代表无植被覆盖草地);(II)刈割处理(天然草地沿地面剪除地上植被,代表低植被覆盖度草地);(III)留茬处理(天然草地剪除高于5 cm的植被茎、叶,留茬高度为5 cm,代表中等植被覆盖度草地);(IV)天然草地(维持原状天然草地,代表高植被覆盖度草地)。径流冲刷小区参照前人标准,规格为4.0 m×0.5 m,由前期试验确定冲刷流量为4,6,8 L/min 3个梯度,小区下端连接体积为20 L塑料桶收集径流,并记录径流时间,采用烘干法测定产沙量。

人工模拟降雨试验在研究站内进行,研究不同降雨强度和坡度对产流产沙的影响。根据对研究区降雨资料和试验前期的侵蚀性降雨观测,设置5个梯度的人工降雨强度,即0.6,0.9,1.2,1.5,2.0 mm/min。还设计有5°,10°,15°,20°,25°共计5个坡度径流小区,径流小区规格为5.0 m×2.0 m,径流小区边界由铁板密封,铁板10 cm埋入土壤,20 cm出露地表,下边坡修筑集水槽,集水槽下设置直径30 cm、高40 cm的径流桶,保证小区内径流全部汇入径流桶内。每个坡度径流场4座。

天然降雨观测试验在研究站周边的典型坡面(4.2°)进行,径流小区由水泥砖块建成,规格为10.0 m×3.0 m,墙壁厚25 cm并高出地面200 cm,小区顶部为防止雨水流入而采用内部高于外部的设计,小区最低处设出水口且连接UGT自动泥沙收集仪用来收集泥沙。降雨前后分别在小区上、中、下部采集表层0—10 cm土壤用于测定其粒径组成,每部位3次重复。径流产生后分时段采集径流样品,静置后倒掉上清液,将泥沙风干后称取重量,并对其进行颗粒组成、全效N、P含量和速效N、P含量及有机质含量测定。

1.3 观测指标测定

1.3.1 产流量及产沙量测定 降雨过程中,从产流

开始每5 min测1次径流桶水深得到产流量,并在集水槽出口处用1 000 mL径流瓶取含沙水样,静置后记录上清液体积,去除上清液后风干称取泥沙重量,计算径流产沙量。

1.3.2 减流率与减沙率的计算 以天然观测试验所得的产流量和产沙量数据计算减流率与减沙率,计算公式为:

$$\text{减流率}(\%) = \frac{Q_{\text{对照}} - Q_i}{Q_{\text{对照}}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{对照}}$ 和 Q_i 分别为对照和各覆盖措施的产流量(L)。

$$\text{减沙率}(\%) = \frac{S_{\text{对照}} - S_i}{S_{\text{对照}}} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{对照}}$ 和 S_i 分别为对照和各覆盖措施的产沙量(g/L)。

1.4 数据处理

采用Excel 2019软件进行数据处理,Origin 2022软件进行绘图制作与函数拟合。

2 结果与分析

2.1 植被处理方式对产流产沙的影响

由图1~图3可知,整体上,不同处理方式下的产流量随时间变化呈现相同的上升趋势,而产沙量随时间变化呈现减少趋势,但减少趋势略有不同。各冲刷流量,I型的产沙量均高于其他处理方式,而且相同处理方式下,产沙量在0~10 min时显著下降而后趋于平缓。3种处理方式下,IV型和III型处理样地对产沙量的减少效果较II型处理样地产沙量的减少效果好,II型处理样地产沙量较对照产沙量略有减少。可能是因为径流产生后所携带的泥沙颗粒大多为较细的粉粒和黏粒,而径流产生的10 min内将坡面上的绝大多数细颗粒冲刷掉,10 min后坡面上剩余的颗粒大多较粗,径流所产生的冲刷不足以将其冲刷,所以10 min后的产沙量趋于平缓。

由表2可知,相同流量下不同植被处理方式的减流率均表现为IV型>II型>III型。而不同植被处理方式的减沙率规律则较为复杂,各流量下减流率表现最为良好的均是IV型,其余植被处理方式在不同流量下的减沙率各有优势。其原因可能是天然草地植被良好,植被可以缓解降雨能量,从而减少雨滴击溅而对地表的冲刷,并且还增加地表粗糙度而减少地表径流,所以减流率表现以小区中地表植被状况而决定,因此III型小区减沙率地上5 cm的植被处理优于II型小区的贴地表处理,但III型小区的减流率较小。

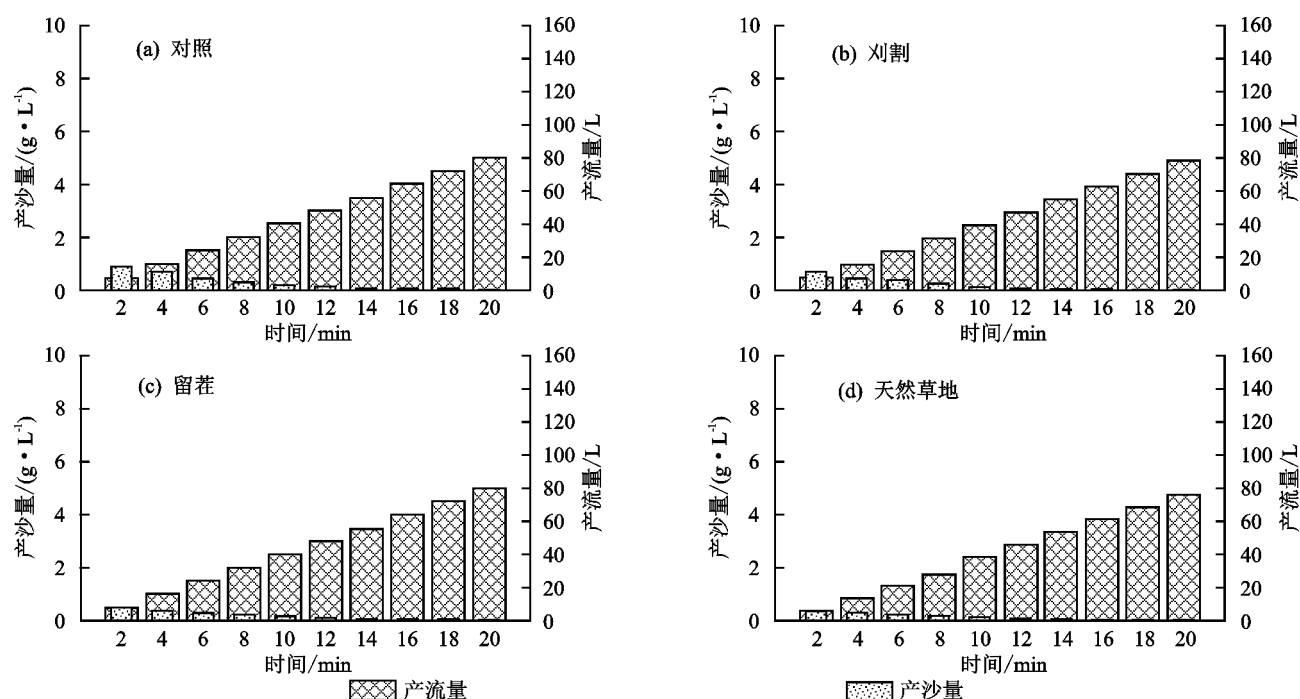


图 1 4 L/min 流量冲刷产流量与产沙量

Fig. 1 4 L/min flow erosion runoff and sediment yield

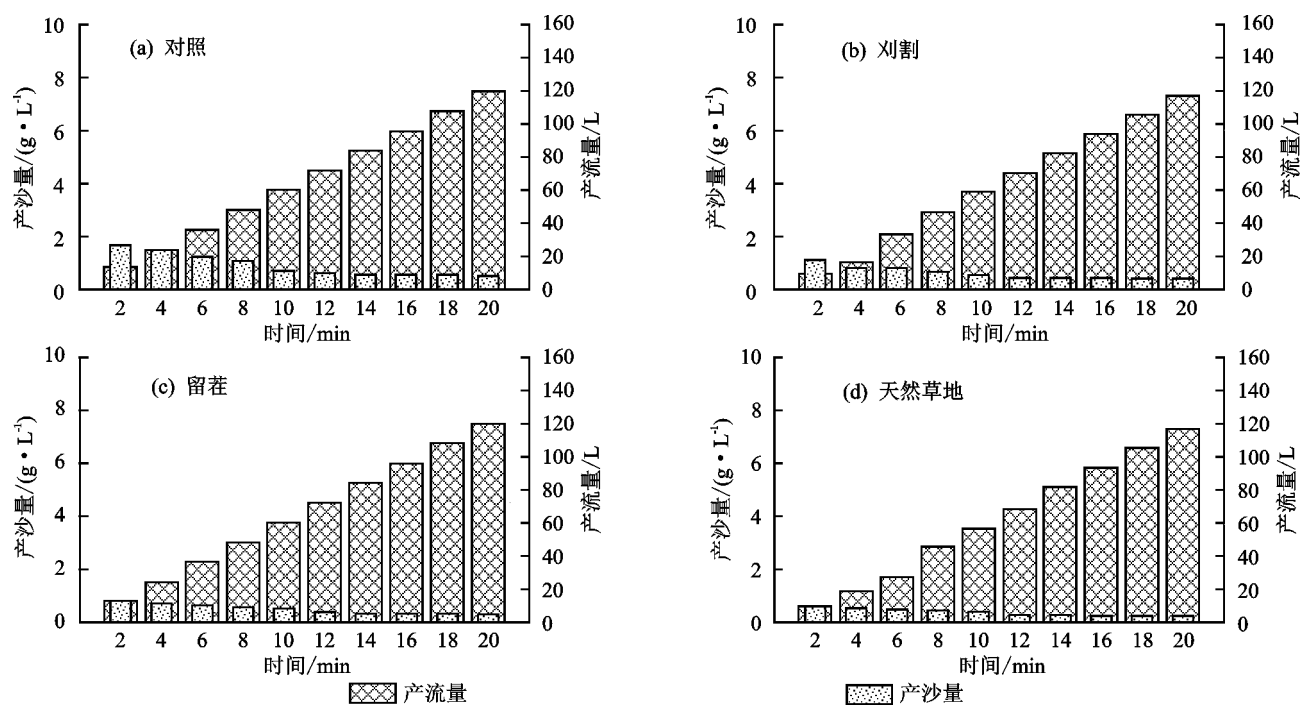


图 2 6 L/min 流量冲刷产流量与产沙量

Fig. 2 6 L/min flow erosion runoff and sediment yield

2.2 天然降雨过程中溶质运移分析

2.2.1 径流含沙颗粒组成变化 由图 4 可知,土壤颗粒在水流的携带下沿坡面向下移动,水流改变土壤颗粒的组成及其分布,表现为砂粒含量和粉粒含量增加而黏粒含量下降。降雨前砂粒百分比含量表现为上部(55.8%)>中部(54.5%)>下部(51.7%),降雨后各部位砂粒含量增加,且表现为中部(68.5%)>上

部(64.5%)>下部(54.8%);降雨后黏粒含量出现负增长,坡面下部黏粒含量降雨后较降雨前减少 29.37%,其余部位均出现不同程度的下降。其原因可能是由于黏粒粒径较小,降雨产生径流后径流蕴含的能量仅可携带走黏粒,而不足以携带粒径较大的粉粒和砂粒,因此造成降雨后黏粒减少,砂粒和粉粒含量增加的现象。

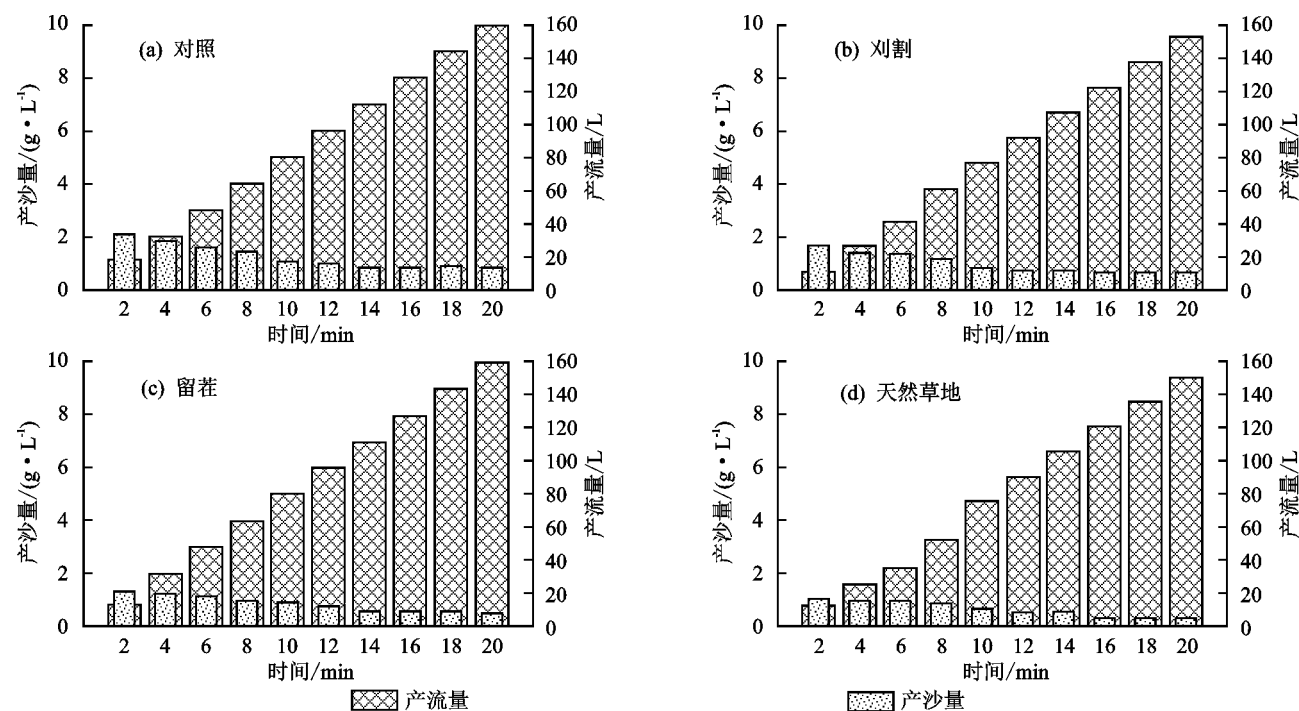


图 3 8 L/min 流量冲刷产流量与产沙量

Fig. 3 Runoff and sediment yield of 8 L/min flow

表 2 不同植被处理方式下减流率与减沙率

Table 2 Runoff reduction rate and sediment reduction rate under different vegetation treatments

流量/ (L · min ⁻¹)	减流率/%			减沙率/%		
	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型
4	2.38	0.50	10.17	25.96	22.92	42.17
6	8.35	0.30	10.43	29.86	43.41	58.26
8	9.97	3.34	13.51	21.82	33.32	48.59

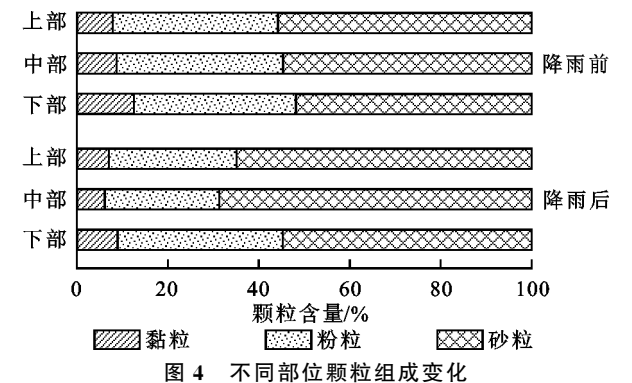


图 4 不同部位颗粒组成变化

Fig. 4 Changes of particle composition in different parts

2.2.2 土壤养分变化 由表 3 可知,降雨后土壤养分含量较降雨前均有所降低。通过对比可以发现,速效 N、P 含量流失幅度较全效 N、P 流失幅度大,主要原因可能是速效养分具有水溶性,可以快速从土壤胶体中被交换出来溶解在水中随水流而转移,而全效养分则为土壤中各种形态元素含量之和,可被水流所转移的仅是一小部分速效养分,因此全效 N、P 含量降低幅度较速效 N、P 含量降低幅度小。土壤有机质的

最主要来源为各种植物残体,降雨产流过程中易被水流所冲刷而转移,因此土壤有机质含量的降低幅度较全效 N、P 含量降低幅度大。土壤养分的变化可以与径流含沙颗粒组成的变化相互印证,径流泥沙中细颗粒通常先被侵蚀,而营养物质主要吸附在小颗粒上或包含在小颗粒中^[17-18],并随细颗粒的转移而转移,降低表层的土壤养分。

表 3 降雨前后土壤养分变化

Table 3 Changes of soil nutrients before and after rainfall

项目	全效 N/ (g · kg ⁻¹)	全效 P/ (g · kg ⁻¹)	速效 N/ (mg · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
降雨前含量	1.67	2.87	65.43	5.28	41.54
降雨后含量	1.42	2.36	38.71	3.85	27.63
降幅/%	14.97	17.77	40.84	27.08	33.49

2.3 降雨强度和坡度对产流产沙的影响

2.3.1 降雨强度对产流产沙的影响 为了探究降雨强度与产流量及产沙量的规律,运用数理统计中的非线性回归方法对模拟降雨观测的产流量和产沙量与降雨历时进行函数拟合,结果见图 5、图 6,函数关系式为:

$$Y_1 = aX^b \tag{3}$$

$$Y_2 = aX^b \tag{4}$$

式中:Y₁为产流量(L);Y₂为产沙量(g/L);X 为时间(min);a、b 为常数。

由图 5 和图 6 可知,降雨过程中,产流量和产沙量均随降雨强度的增加而增加。5 种不同坡度下的产流量与产沙量与降雨强度均表现为幂函数关系,相

关系数大于 0.75,说明该方法对产流量和产沙量有较好的拟合效果。

通过对幂函数($y=ax^b$)特征的分析,本次拟合曲线均为 $a>0, 0<b<1$ 的上凸曲线,该类曲线 y 随 x (时间)的增大而增大。产流量和产沙量的方程系数 a 的大小随降雨强度的增加而增大,而系数 b

没有明显的变化特征。并且较高强度的降雨使径流提前形成,坡度为 5° 和 10° 时,降雨强度 $0.6\sim 1.5$ mm/min 用时 5 min 均无产流,但增加到 2.0 mm/min 时产生径流,原因可能是因为坡度较小时,降雨强度增加使地表汇流过程缩短,从而使径流产生时间提前。

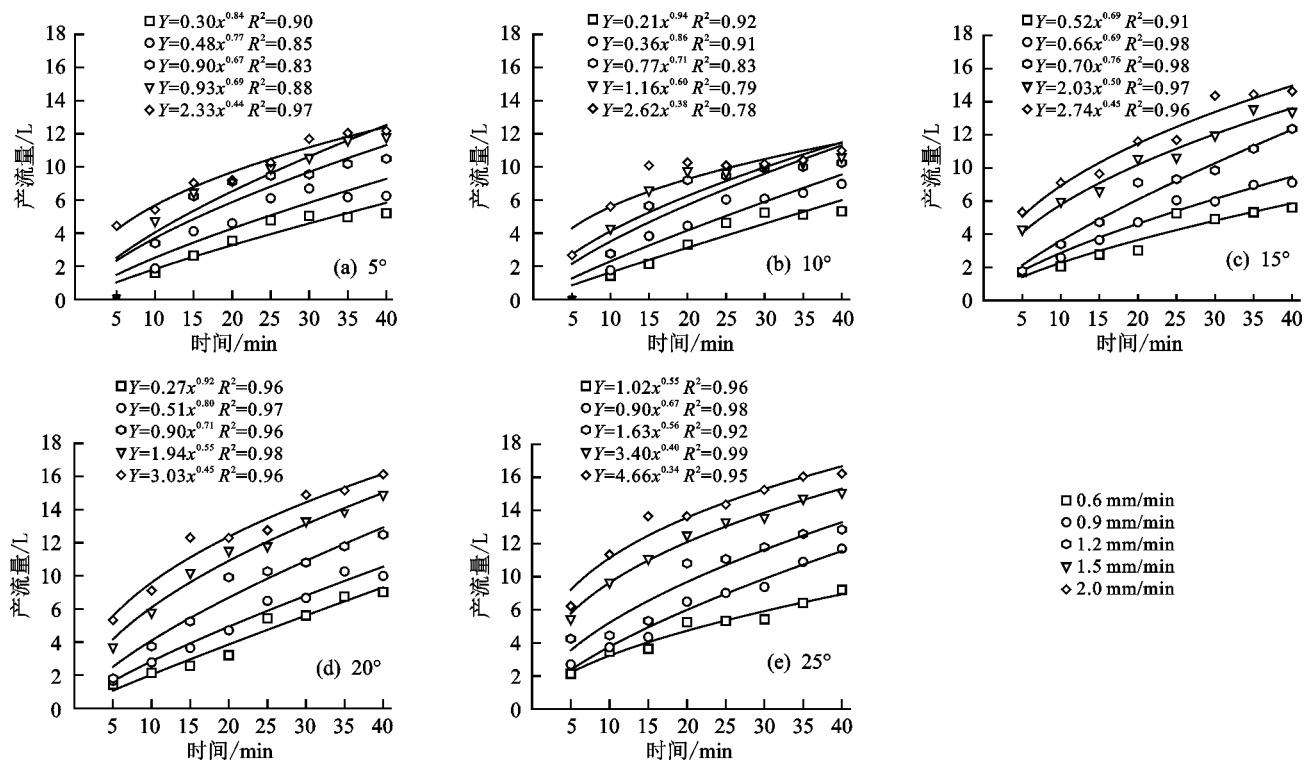


图 5 不同降雨强度产流量随时间的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of runoff yield with time under different rainfall intensities

2.3.2 坡度对产流产沙的影响 由图 7 可知,40 min 相同降雨强度下,产流量随坡度的增加而增加,但不同降雨强度下坡度对产流量的影响有所变化。较大的坡度使产流发生时间提前,降雨强度为 $0.6, 0.9, 1.2, 1.5$ mm/min 时,当坡度 $>10^\circ$ 时,产流开始时间较坡度为 5° 和 10° 提前 5 min;而降雨强度为 2.0 mm/min 时坡度对产流开始时间无影响。降雨强度 $0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0$ mm/min 时,峰值产流量随坡度增加而增加, 25° 最大产流量分别是 5° 时最大产流量的 1.35, 1.39, 1.31, 1.52, 1.58 倍。各降雨强度下,坡度为 15° 时产流量较 10° 时平均增加 14.40%,而坡面为 10° 时产流量较 5° 仅平均增加 3.71%,可能是因为坡度为 5° 和 10° 时该坡度不足以使径流流速足够大,坡面产流较少,而坡面达到 15° 及以上时,坡面径流流速加大,从而使坡面产流量有较大提高。

由图 8 可知,40 min 相同降雨强度下,产沙量随坡度增加而增加,增长速度呈现出“缓慢—快速”的特点。由降雨强度 $0.6, 0.9, 1.2, 1.5$ mm/min 时, 5° 坡面和 10° 坡面在 5 min 时均未出现产沙,而坡度增加

到 $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 时 5 min 开始产沙。降雨强度为 $0.6, 0.9, 1.2, 1.5$ mm/min 时,出现 10° 坡面较 5° 坡面在相同时间下的产沙量有所增加, 15° 坡面较 10° 坡面产沙量出现负增长,由 15° 坡面增加到 20° 坡面时产沙量的增长速度大幅加快。而降雨强度为 2.0 mm/min 时则在相同时间下产沙量均随坡度增加而增加。综上,相同降雨强度下产沙量随坡度的变化在 $15^\circ\sim 20^\circ$ 出现拐点使得产沙量的增长速度加快。

3 讨论

研究表明,坡面产流量和产沙量与随降雨强度和坡度均呈现正相关,而不同植被处理方式下天然草地的减流率和减沙率最优,分别为 11.37% 和 49.67%。这与郭星星等^[19]在裸露铁尾矿砂坡面下及朱永杰等^[20]在狗牙根草地坡面所得出的降雨强度对产流产沙的影响结论一致,也与孙佳美等^[21]所得出的降雨强度和坡度增大坡面径流和产沙量的结论一致;不同植被盖度增大降雨截留使产流量增加,也减少地面受到的破坏,使径流产沙量下降的结论^[22]与本研究结果一致。

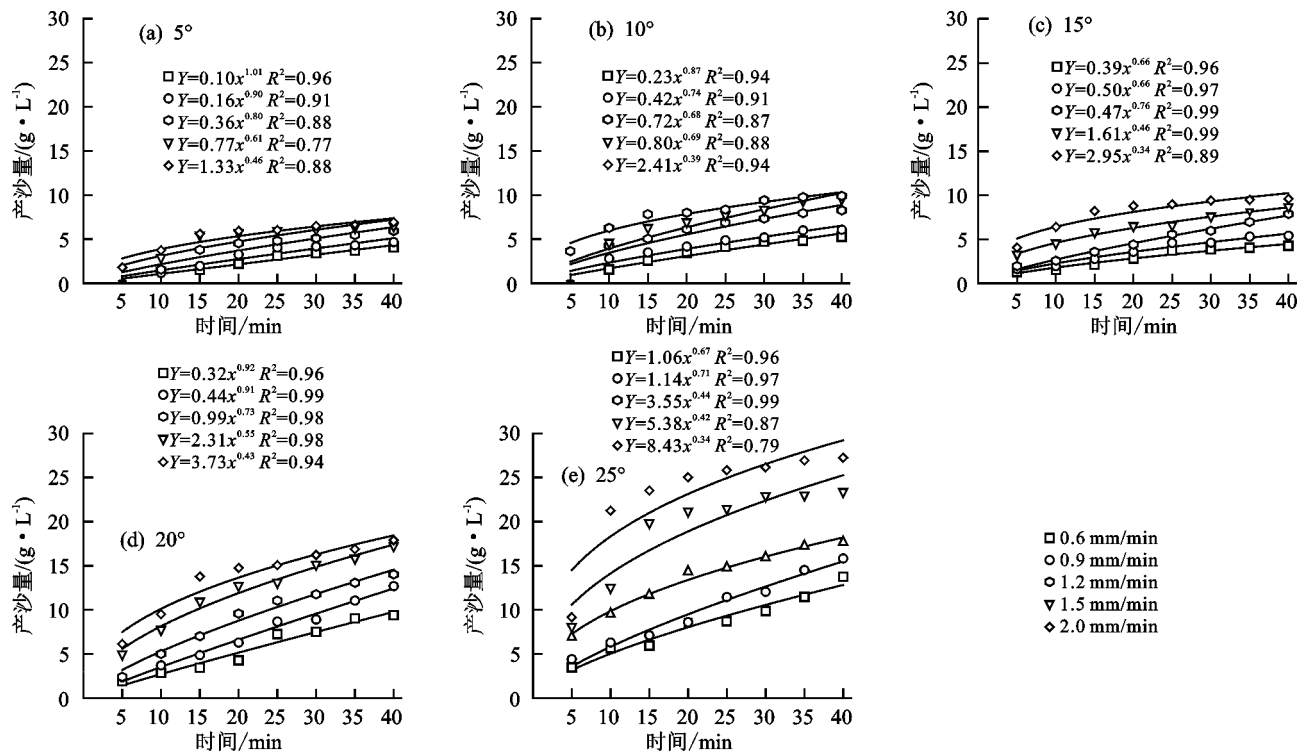


图6 不同降雨强度产沙量随时间的变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of sediment yield with time under different rainfall intensities

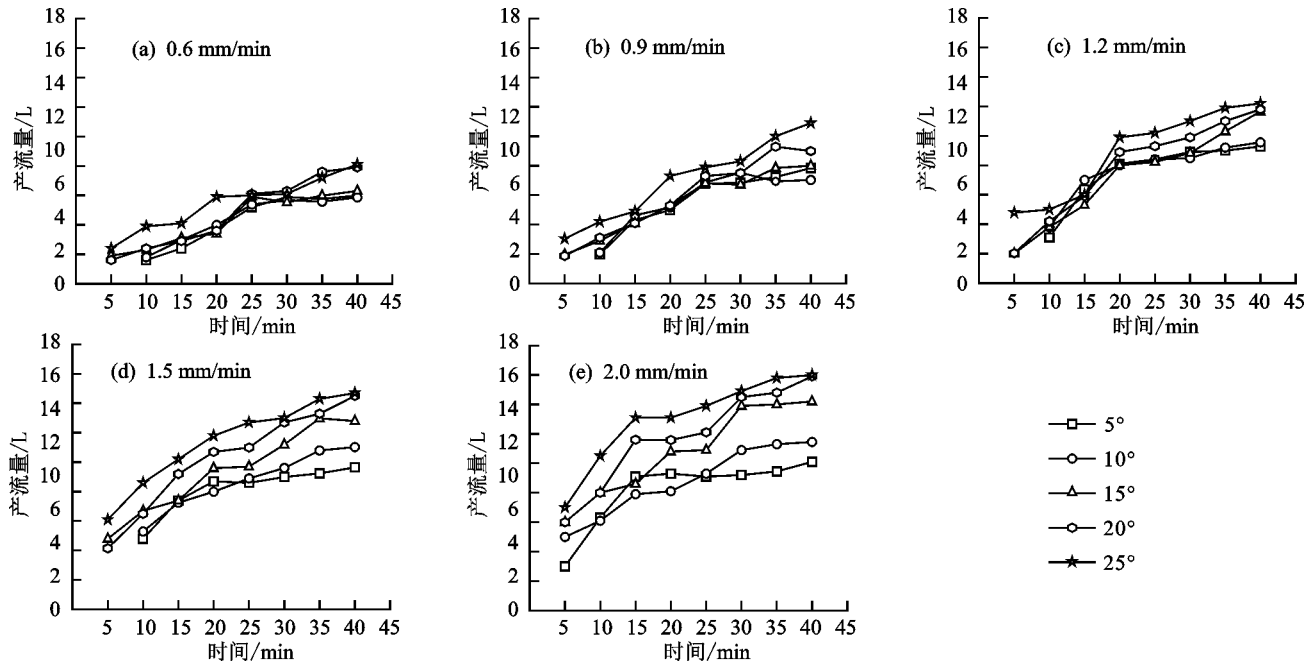


图7 不同坡度产流量随时间的变化特征

Fig. 7 Variation characteristics of runoff yield with time on different slopes

降雨条件下侵蚀泥沙颗粒中细颗粒含量较高^[23], 降雨后速效养分损失的比例比全效养分损失的比例高^[24], 该结论与本试验中所得出的降雨产流产沙过程造成表层土壤的粗粒化及土壤养分的流失, 其中坡面中部粗粒化明显, 降雨后砂粒含量达到68.5%, 并且速效 N、P 和有机质的下降幅度高于有效 N、P 的结论具有一致性。降雨侵蚀泥沙颗粒中黏粒占大多数, 而黏

粒中所携带走的养分一同流失。降雨侵蚀中坡面中部粗粒化明显, 可能是坡面上部仅受到降雨侵蚀, 而坡面中部不仅受到降雨侵蚀还受到径流的侵蚀, 使得中部坡面粗粒化更加严重。

降雨强度和坡度均影响产流开始时间, 并且坡面产流量和产沙量与降雨强度和坡度均呈现正相关关系, 这表明产流量与产沙量随着降雨强度和坡度的增

加而增加。其中,已有研究^[25]得出土壤粗糙度可能是使径流开始时间推迟的主要因素,坡度较小时坡面成为储存雨水的临时场所,还在坡面上形成一条曲折的路径而导致径流开始时间延后。苏远逸等^[26]研究证明,不同坡度下产流产沙量均呈现线型增长,而本研究中则是幂函数对产流量和产沙量的拟合效果良好,降雨强度和坡度对产流产沙过程均有显著的相关关系^[27],可见 2 个因子均影响坡面产流产沙过程。这主要是因为表土具有一定的蓄水功能,在降雨强度较低或坡度较缓时雨水对表土的剥离效果较弱,产生径流后水流流速慢,携带沙粒的能力弱;而降雨强度较高或坡度较陡时,雨水短时间内将表土剥离致使粗颗粒出露地表,水流也拥有更大的能量在短时间内携带走大量地表颗粒,而坡度对产流产沙的影响也可以用径流的形成来解释。有研究^[28]证明,径流流速随坡度增加而加快,并且减少

径流的入渗,径流流速加快造成产沙量的增加,在本研究的降雨强度范围内(0.6~2.0 mm/min)产沙量增长速度加快的拐点在 15°~20°,与以往的临界坡度不同,本研究并未出现超过某一坡度时产沙量下降的现象,这可能是由于研究区不同所导致,因此有对不同下垫面情况下的典型坡面进行产流产沙试验的必要性,还需要增加坡度和细化降雨强度来确定临界降雨强度的值。

本研究在希拉穆仁草原典型坡面开展野外人工模拟试验,实验场内维持野外土壤的结构、植物根系等,对荒漠草原典型坡面的还原度较高,由于其处于封禁草场,受人为活动的影响较小,因此模拟试验的代表性较好。此外,本试验中仅考虑降雨强度和坡度对产流和产沙的影响,没有考虑土壤初始含水率和土壤入渗等对坡面产流量和产沙量的影响,这也是下一步需要重点开展的研究工作。

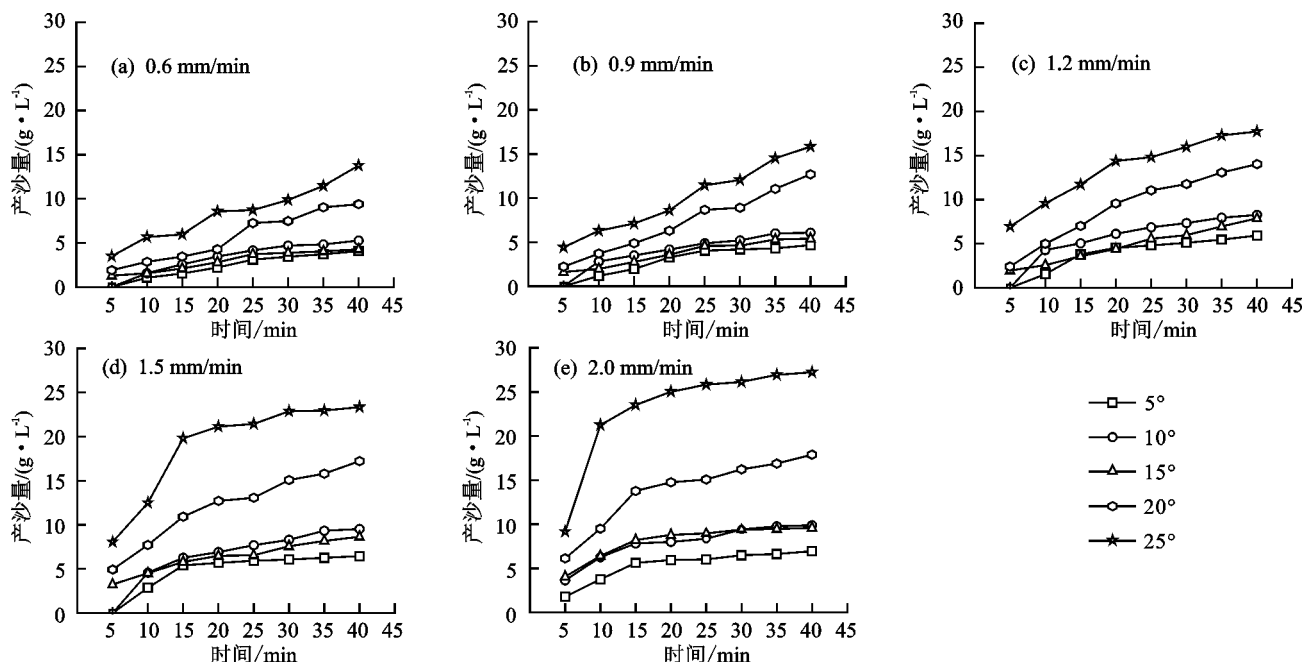


图 8 不同坡度产沙量随时间的变化特征

Fig. 8 Variation characteristics of sediment yield with time on different slopes

4 结论

(1) 植被处理方式减少降雨所产生的径流量,从而间接减少径流中的产沙量,不同植被处理方式对减流减沙率的影响不同。对产流量的减少率表现为Ⅳ型(11.37%)>Ⅱ型(6.9%)>Ⅲ型(1.38%),而对减少产沙量Ⅳ型最优,为 49.67%。

(2) 降雨产生的径流可以将地表物质携带走,还改变土壤养分含量。降雨后黏粒含量减少,砂粒和粉粒含量增加,土壤速效 N、P 及有机质分别减少 40.84%, 27.08%, 33.49%。

(3) 降雨强度和坡度与产流产沙量均呈现正相关关系,降雨历时与产流产沙表现为 $y = ax^b$ 的函数关

系,拟合度均大于 0.75,并且方程系数 a 随降雨强度的增加而增大;降雨强度在 0.6~2.0mm/min 时使产沙量增长速度加快的拐点出现在坡度为 15°~20°。

参考文献:

- [1] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012.
WU F Q, ZHANG H J. Soil erosion [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 夏卫兵.土壤侵蚀降雨物理学简论[J].中国水土保持科学,2013,11(2):104-107.
XIA W B. Discussion on soil erosion rainfall physics[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 104-107.

- [3] 胡宏祥,洪天求,马友华,等.土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究[J].水土保持学报,2007,21(1):26-29.
HU H X, HONG T Q, MA Y H, et al. Study on soil and sediment particle size distribution and nutrient loss [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (1):26-29.
- [4] 李光录,吴发启,庞小明,等.泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J].水科学进展,2008,19(6):868-874.
LI G L, WU F Q, PANG X M, et al. Relationship between sediment transport with surface rainfall and runoff energies on sloping[J]. Advances in Water Science, 2008,19(6):868-874.
- [5] 陈奇伯,齐实,孙立达,等.半干旱黄土丘陵区坡耕地径流损失对土地生产力影响研究[J].水土保持通报,2001,21(5):6-9.
CHEN Q B, QI S, SUN L D, et al. Impacts of runoff on land productivity of sloping field in semi-arid hilly and Gully Region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(5):6-9.
- [6] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
WANG S, WANG Q J, DONG W C, et al. Runoff and sediment generations and nutrient losses under different vegetation coverage in loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4):23-27.
- [7] ZHU X C, LIANG Y, QU L L, et al. Characteristics of runoff and sediment yield for two typical erodible soils in Southern China [J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(5):653-661.
- [8] 史致男.不同降雨特性对坡面产流产沙过程的影响[D].杭州:浙江大学,2014.
SHI Z N. Impacts of different rainfall characteristics on both runoff and erosion processes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [9] 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.
GUO X S, SONG F P, GAO Y, et al. Characteristics of lost sediment and its nutrient enriched effect on three types soil slope under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3):23-28.
- [10] ZHANG G H, LIU G B, WANG G L. Effects of *Caragana korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss[J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3):245-257.
- [11] 杨会民,王静爱,邹学勇,等.风水复合侵蚀研究进展与展望[J].中国沙漠,2016,36(4):962-971.
YANG H M, WANG J A, ZOU X Y, et al. Progress and prospect of research on wind-water complex erosion [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4):962-971.
- [12] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].应用生态学报,2005,16(9):1613-1617.
ZHANG X M, YU X X, WU S H, et al. Effects of forest vegetation on runoff and sediment production on sloping lands of loess area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9):1613-1617.
- [13] BETTONI M, MAERKER M, BOSINO A, et al. Land use effects on surface runoff and soil erosion in a southern Alpine valley[J]. Geoderma, 2023, 435: e116505.
- [14] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: e126714.
- [15] 李红,任兵,周明华,等.山地丘陵区小流域次降雨产流产沙过程研究[J].中国水土保持,2020(3):40-43.
LI H, REN B, ZHOU M H, et al. The process of runoff and sediment production of precipitation of small watersheds in hilly area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(3):40-43.
- [16] 彭浩,李忠武,刘春,等.湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及水保措施的综合响应特征[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.
PENG H, LI Z W, LIU C, et al. Comprehensive response characteristics of runoff and sediment rainfall, soil type and water conservation measures in hilly area of central Hunan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2):60-67.
- [17] ZHANG G H. Characteristics of runoff nutrient loss and particle size distribution of eroded sediment under varied rainfall intensities[C]//Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology. Advances in Engineering Research. January 23-24, 2016. Hangzhou, China. Paris, France: Atlantis Press, 2016:587-595.
- [18] GHADIRI H, ROSE C W. Sorbed chemical transport in overland flow: I. A nutrient and pesticide enrichment mechanism[J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(3):628-633.
- [19] 郭星星,吕春娟,陈丹,等.降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):23-29.
GUO X X, LÜ C J, CHEN D, et al. Effects of rainfall intensities and slope gradients on runoff and sediment yield on bare iron tailings sand slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2):23-29.
- [20] 朱永杰,毕华兴,霍云梅,等.坡度与降雨强度对狗牙根草地产流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):20-25.
ZHU Y J, BI H X, HUO Y M, et al. Effects of slope

- and rainfall intensity on runoff of *Cynodon dactylon* lawn[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6): 20-25.
- [21] 孙佳美, 余新晓, 李瀚之, 等. 模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 341-350.
- SUN J M, YU X X, LI H Z, et al. Runoff and sediment yield process and characteristics research on litter slopes in simulated rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3): 341-350.
- [22] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- ZHANG X S, XUE T Z, MA C, et al. Impacts of rainfall intensity and grass coverage on runoff and sediment yield on typical sloping land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 66-70.
- [23] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47.
- TANG S S, LI P, REN Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 39-47.
- [24] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74, 101.
- FU T, NI J P, WEI C F, et al. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2003, 9(1): 71-74, 101.
- [25] DOS REIS CASTRO N M, AUZET A V, CHEVALIER P, et al. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(11): 1621-1628.
- [26] 苏远逸, 李鹏, 任宗萍, 等. 坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 118-122.
- SU Y Y, LI P, REN Z P, et al. Effect of slope gradient on the process of runoff and sediment yield and water-sediment relation on the loess slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 118-122.
- [27] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 545-557.
- YAN Y J, DAI Q H, FU W B, et al. Simulation study on bare subsoil runoff and sediment yield on Karst slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 545-557.
- [28] FANG H Y, SUN L Y, TANG Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(11): 2649-2658.
- GAO H Y, YAN D R, ZHANG S N, et al. Characteristics of soil enzyme activities and humus composition in mossy crust in the northern edge of Hobq Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(3): 162-168.
- [29] 余春娅, 张恒彬, 赵鑫, 等. 贵州喀斯特石漠化地区苔藓结皮对土壤酶活性及碳氮磷含量的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1137-1147.
- YU C Y, ZHANG H B, ZHAO X, et al. Effects of moss crusts on soil enzyme activities and contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a Karst rocky desertification area of Guizhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1137-1147.
- [30] BEGUIN P. Molecular biology of cellulose degradation[J]. Annual Review of Microbiology, 1990, 44: 219-248.
- [31] ŠTURSOVÁ M, ŠNAJDR J, KOUKOL O, et al. Long-term decomposition of litter in the montane forest and the definition of fungal traits in the successional space[J]. Fungal Ecology, 2020, 46: e100913.
- [32] KORANDA M, KAISER C, FUCHSLUEGER L, et al. Fungal and bacterial utilization of organic substrates depends on substrate complexity and N availability[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, 87(1): 142-152.
- (上接第 44 页)
- [25] 樊瑾, 李诗瑶, 余海龙, 等. 毛乌素沙地不同类型生物结皮与下层土壤酶活性及土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 109-120.
- FAN J, LI S Y, YU H L, et al. Soil enzyme activity and carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics under different types of biocrusts and subsoil in Mu Us Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 109-120.
- [26] XU H K, ZHANG Y J, SHAO X Q, et al. Soil nitrogen and climate drive the positive effect of biological soil crusts on soil organic carbon sequestration in drylands: A meta-analysis[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 803: e150030.
- [27] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105-109.
- CAO H, SUN H, YANG H, et al. A review soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2003, 9(1): 105-109.
- [28] 高海燕, 闫德仁, 张胜男, 等. 库布齐沙漠北缘苔藓结皮土壤酶活性及腐殖质组成特征[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(3): 162-168.