

解冻期覆沙黄土坡面能量参数与径流产沙关系

王伟^{1,2}, 苏远逸^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 时鹏^{1,2}, 赵宾华^{1,2}, 薛少博^{1,2}, 杨光^{1,2}

(1.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;

2.省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学),西安 710048)

摘要:为探究春季解冻期覆沙黄土坡面能量参数动态响应时空演化过程,在相同放水流量(1 L/min)条件下,采用2个土壤处理(未冻坡面,冻结坡面)和4个覆沙厚度(0,1,2,3 cm)进行室内模拟冷冻和放水冲刷试验,系统分析了径流流速(V)、径流功率(W)、单位径流功率(P)和径流动能(E)在不同土壤处理和不同覆沙厚度条件下的时空演化过程。结果表明:(1)不同处理下的径流流速随产流时间的延长总体呈下降趋势,随着距坡顶距离的增大总体呈增大趋势。未冻坡面和冻结坡面径流流速的均值在0.23~0.35,0.18~0.35 m/s变化。径流深的时空变化规律与径流流速相反,未冻坡面和冻结坡面的值分别在0.36~1.32,0.46~2.89 mm变化。(2)未冻坡面和冻结坡面径流功率的变化范围分别为0.22~0.82,0.29~1.13 N/(m·s)。不同处理下的单位径流功率随产流时间的延长总体呈下降趋势,未冻坡面和冻结坡面的单位径流功率的均值分别在0.047~0.072,0.037~0.072 m/s变化。未冻坡面的径流动能随着覆沙厚度的增加而增大,冻结坡面的径流动能随着时间的延长总体呈先增大后减小的趋势。在空间上,未冻坡面和冻结坡面的能量参数和距坡顶距离均可用线性函数表示($R^2>0.71$)。(3)产流率与径流流速和能量参数之间呈显著的线性关系($p<0.01$),径流流速和单位径流功率可以对未冻坡面和冻结坡面在不同覆沙厚度条件下的产流过程进行描述。研究结果可为建立解冻期的覆沙黄土坡面侵蚀模型提供参考。

关键词:黄土;土壤侵蚀;放水冲刷;径流产沙;能量参数

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0056-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.01.008

Relationship Between Energy Parameters of Sand-Covered Loess Slope and Runoff and Sediment Yield During Thawing Period

WANG Wei^{1,2}, SU Yuanyi^{1,2}, LI Peng^{1,2}, SHI Peng^{1,2},

ZHAO Binhua^{1,2}, XUE Shaobo^{1,2}, YANG Guang^{1,2}

(1.Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of

Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial evolution process of energy parameters dynamic response of sand covered loess slope in spring thawing period, two soil treatments (unfrozen slope and frozen slope) and four sand cover thicknesses (0, 1, 2 and 3 cm) were used under the same discharge (1 L/min). The temporal and spatial evolution process of runoff velocity (V), stream power (W), unit stream power (P), and runoff kinetic energy (E) under different soil treatments and different thickness of sediment cover were systematically analyzed. The results showed that: (1) The runoff velocity under different treatments decreased with the extension of runoff generation time, and increased with the increase of distance from the top of slope. The average runoff velocity of unfrozen slope and frozen slope varied from 0.23 to 0.35 m/s and from 0.18 to 0.35 m/s, respectively. The temporal and spatial variation of runoff depth was opposite to that of runoff velocity. The values of unfrozen slope and frozen slope varied from 0.36 to 1.32 mm and 0.46 to 2.89 mm, respectively. (2) The variation range of stream power of unfrozen slope and frozen slope was 0.22 ~ 0.82 and 0.29 ~ 1.13 N/(m·s), respectively. The average value of unit stream power of unfrozen slope and frozen slope varied from 0.047 to 0.072 m/s and 0.037 to 0.072 m/s, respectively. The runoff kinetic energy

收稿日期:2020-07-26

资助项目:国家自然科学基金项目(51779204);陕西省创新人才推进计划项目科技(水土资源环境演变与调控)创新团队(2018TD-037);陕西省水土保持和移民工作中心城镇水土保持技术集成项目(104-441120034)

第一作者:王伟(1986—),男,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:360007519@qq.com

通信作者:李鹏(1974—),男,博士,教授,主要从事生态水文过程和土壤侵蚀研究。E-mail:lipeng74@163.com

of unfrozen slope increased with the increase of sediment thickness, and the runoff kinetic energy of frozen slope increased at first and then decreased with the extension of time. In space, the energy parameters of unfrozen slope and frozen slope could be expressed by linear function ($R^2 > 0.71$). (3) There was a significant linear relationship between runoff rate and runoff velocity and energy parameters ($p < 0.01$). Runoff velocity and unit stream power could describe the runoff generation process of unfrozen slope and frozen slope under different sediment thickness. The results of this study can provide reference for the establishment of erosion model of sand covered loess slope in thawing period.

Keywords: loess; soil erosion; meltwater flow; runoff and sediment yield; energy parameters

我国黄土高原地处中纬度地区,该地区夏秋季多雨,而冬春季干旱少雨^[1-3]。由于风力侵蚀作用的影响,片沙覆盖地貌在该地区分布广泛,形成风水侵蚀交错带^[4-6]。与此同时,黄土高原风水侵蚀交错带每年约有 1/3 的天数气温低于 0℃,该区域同样受到冻融侵蚀的影响^[7-9]。由此可见,黄土高原风水侵蚀交错带的侵蚀力是由水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀等多种侵蚀力在时空上交错重叠构成的,在多种侵蚀力叠加的作用下,该区域成为黄土高原土壤侵蚀最剧烈的地区之一^[10]。

目前,针对黄土高原风水侵蚀交错带的侵蚀过程和侵蚀特征已有较为广泛的研究。张丽萍等^[11]在野外进行降雨试验,分析得出黄土坡面与覆沙坡面的产流产沙过程明显不同。汤珊珊等^[12]和 Xu 等^[13]通过室内模拟降雨试验研究了黄土高原覆沙坡面的产流产沙过程,覆沙坡面产流量随时间的变化表现为在一定范围内稳定的波动,且沙层越厚,波动越明显;覆沙坡面的产沙量在产沙初期随着时间延长而逐渐增加,覆沙厚度越大产沙量增加的速度越快,当产沙量达到峰值后逐渐减小,然后在一定范围内稳定波动。与此同时,该试验还定量研究了在不同雨强和不同覆沙厚度条件下,覆沙坡面的产沙量是黄土坡面的 1.9~19.0 倍。谢林好等^[14]进一步研究了沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响。李占斌等^[15]利用室内人工模拟降雨试验研究了冻融作用前后土壤物理性质、产流、产沙和颗粒分选过程研究表明,冻融作用过后土壤含水量增大,土壤容重降低,孔隙度增大,冻融坡面稳渗率为未冻融坡面 2 倍。任宗萍等^[16]通过放水冲刷试验研究表明,覆沙坡面在土壤冻结后的总产沙量是对照坡面的 1.97~10.94 倍。

土壤侵蚀动力学过程的描述主要有 2 类参数,分别是力学参数(水流剪切力、径流阻力和单位长度剪切力等)和能量参数(径流功率、单位径流功率和径流动能等)^[17-18]。张光辉等^[19]研究认为,控制土壤剥蚀速率的水动力学参数是能量而不是力。从物理学的角度来看,土壤侵蚀的实质是水流克服各种阻力做功的过程^[20]。在放水冲刷试验中,土壤侵蚀过程中的能量主要来自于径流从上向下流动所具有的势能。

在试验过程中径流分离并搬运土壤颗粒,径流在做功的同时不断消耗。

纵观近年来黄土高原风水侵蚀交错带的研究,针对侵蚀过程和侵蚀特征的研究都已较为成熟,而对该地区土壤侵蚀动力学机理的研究较少。深刻理解坡面径流侵蚀产沙对不同能量参数的响应特征是建立土壤侵蚀过程模型的重要基础。因此,本研究以覆沙黄土坡面为研究对象,通过室内模拟冷冻和放水冲刷试验,研究不同土壤处理和覆沙厚度对能量参数的影响,揭示能量参数的时空变化规律及其与坡面产流产沙之间的关系,为建立基于解冻期的覆沙黄土坡面侵蚀模型提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

本次试验土壤有 2 种,分别是黄土区的黄土和风沙区的风沙土。黄土取自陕北的王茂沟流域,风沙土取自内蒙古自治区的东柳沟流域。使用 Mastersizer 2000 测得土壤颗粒组成(表 1),根据 USDA(美国农业部)的土壤分类标准,黄土为粉砂质壤土。经测定土壤的干容重约为 1.3 g/cm³,有机质含量为 2.0 g/kg,土壤饱和含水量为 46.41%。

表 1 试验土壤颗粒组成 单位:%

试验土壤	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (>0.02 mm)
黄土	0.20	72.01	27.79
风沙土	0.72	14.38	84.90

测试装置由 2 部分组成:冷冻土壤系统冲刷试验系统。冻土系统采用西安理工大学的冻融试验系统。冻融实验室的内部尺寸:长 4.5 m×宽 2.5 m×高 2.5 m,温度变化范围为-40~30℃,精度为±1℃,温度均匀度≤±2.0℃。该系统具有制冷和加热功能,符合试验要求。冲刷试验装置由径流收集装置、土槽、水槽、稳流槽和水箱等部分组成。土槽的大小为长 2 m,宽 0.2 m,深 0.2 m。每隔 0.5 m 在土槽的侧面做 1 个标记,以测量不同断面的速度。在土槽的顶部连接 1 个长 2 m、宽 0.2 m、深 0.05 m 的水槽,使进入土槽的水流稳定且集中(图 1)。

1.2 试验设计与方法

冲刷试验于 2017 年 4 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行。冲刷试验由 2 个土壤处理(未冻坡面和冻结坡面)和 4 个覆沙厚度(0,1,2,3 cm)组合进行。根据黄土丘陵区解冻期的平均降水量(5.2~18.6 mm/h)^[21],设计放水流量为 1 L/min(相当于在长 2 m、宽 0.2 m 的条件下发生雨强为 15 mm/h 的降雨)。根据已有研究^[22],黄土丘陵区还存在大量坡度为 10°~15°的坡耕地,所以此研究设计坡度为 12°。将野外采回的土样称重并烘干,根据计算结果设定土壤前期含水量为 15%,土壤干容重为 1.30 g/cm³。试验设计见表 2。试验期间的降雨温度始终保持在 10℃左右,并保持相对恒定。每个试验重复 3 次,试验结果为 3 个重复的平均值。

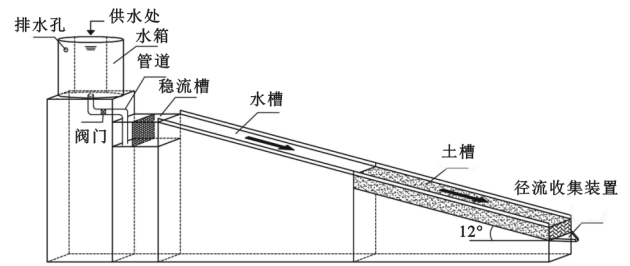


图 1 冲刷试验装置示意

表 2 冲刷试验设计

处理	编号	覆沙 厚度/cm	坡度/ (°)	初始土壤 含水量/%	流量/ (L·min ⁻¹)	产流 历时/min
未冻 坡面	U0	0	12	15	1	15
	U1	1	12	15	1	15
	U2	2	12	15	1	15
	U3	3	12	15	1	15
冻结 坡面	F0	0	12	15	1	15
	F1	1	12	15	1	15
	F2	2	12	15	1	15
	F3	3	12	15	1	15

在试验前,先将土壤样品风干并通过 10 mm×10 mm 的筛子除去植物根等杂质。随后取样测得土壤含水量,采用晒干和喷壶洒水的方式使水含量达到约 15%,并用塑料膜覆盖静置 24 h,使土壤水分均匀分布。在填土前,在土槽的底部放置 1 层纱布,在纱布上铺上 5 cm 厚的沙子,确保试验土壤的透水性接近天然状态。根据设计的土壤干容重(1.30 g/cm³)计算得出需要的用土量,采用分层装填方法。在土槽内一次装满 5 cm 厚的土壤,然后在下层铺设之前先将表层土壤浅锄变得粗糙,以确保 2 层土壤紧密结合。为了避免土槽侧壁对侵蚀过程的影响,装填土壤的时候保证中间低,两侧高。装完土后,根据试验设计要求覆盖不同厚度的沙子。并在沙子表面喷洒一定量的水,使风沙土中的水分接近自然状态。根据试验设计进行试验,将需要冷冻的土槽放入-20℃的冻土装置中进行冷冻。冷冻 24 h

后,取出土槽并放置在冲刷试验装置上进行试验。在试验之前率定冲刷流量,当连续 3 次冲刷流量与设计流量之间的误差<5%时,可以进行的冲刷测试。在试验过程中,由于室温高于冻融试验系统的温度,所以冲刷试验过程也是解冻的过程。当径流收集装置开始产流时,记录初始流动时间并观察试验过程。在土槽侧面每隔 0.5 m 做 1 个标记,将土槽平均分成 4 个断面,从入水口到出水口依次为 S1、S2、S3、S4 断面。在试验过程中,使用染色剂示踪法(KMnO₄)测量不同断面的流速。将径流通过的距离除以时间计算得出观测流速,然后乘以 0.65 的系数得出平均流速^[21]。1 min 收集 1 次径流泥沙样品,将部分样品收集在广口瓶中,剩余的浑水收集在塑料桶中得出总径流量。将广口瓶中的泥沙沉淀并分离出来,在 105℃下烘干 12 h,随后称重换算得出产沙量,用总径流量减去产沙量得出径流量。每次冲刷试验在坡面开始产流后持续 15 min。

1.3 数据处理与分析

在本研究中选取径流流速(V)、径流动能(E)、径流功率(W)、单位径流功率(P)为研究对象^[18], CV 为变异系数^[23],表达数据的离散程度。该试验属于坡面薄层水流,由于下垫面随着径流冲刷不断变化,导致径流深不宜测量,因此假定水流在平整的下垫面上均匀流动。各参数的计算公式为:

$$V=0.65 * V_m, CV=(SD/Mean) \times 100\%,$$
$$W=\tau V, \tau=\gamma h S, h=\frac{q}{Vbt}, P=VS, E=\frac{\gamma q V^2}{2g}$$

式中: V 为平均流速(m/s); V_m 为观测流速(m/s); SD 为标准差,Mean 为平均值; W 为径流功率(N/(m·s)); τ 为径流剪切力(Pa); γ 为水流容重(kg/m³); h 为过水断面平均水深(m); q 为 t 时间内的径流总量(m³); b 为过水断面宽度(m); S 为水力坡度(m/m),可用坡度的正弦值近似代替; P 为单位水流功率(m/s); E 为径流能量(J); g 为重力加速度,取 9.8 m/s²。

应用 Photoshop CS4 绘制了冲刷试验系统,用 Origin 8.5 软件进行回归分析并绘图,采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 径流流速和径流深的时空变化特征

图 2 为未冻坡面和冻结坡面的径流流速在不同覆沙厚度条件下的时空变化情况。随着冲刷试验过程中不断发生的细沟间侵蚀和细沟侵蚀,在整个试验过程中,径流流速具有一定的时空分布规律。由图 2 可知,不同处理下的径流流速随产流时间的延长总体呈下降的趋势。对于未冻坡面,在试验过程中径流流速在 0.23~0.35 m/s 变化,径流流速的 CV 值为

5.66%~8.66%,其波动范围较小,坡面覆沙后径流流速的均值是 U_0 的 0.99~1.14 倍。对于冻结坡面,在试验过程中径流流速为 0.18~0.35 m/s,径流流速的 CV 值为 11.61%~19.34%,其波动范围较大,并且冻结坡面的 CV 值随着覆沙厚度的增大而减小。在相同覆沙厚度条件下,冻结坡面径流流速的均值分别是未冻坡面的 85.92% (F_0/U_0), 96.13% (F_1/U_1), 84.84% (F_2/U_2) 和 88.47% (F_3/U_3)。未冻坡面和冻结坡面的平均流速总体上随着覆沙厚度的增大而增大,在相同覆沙厚度条件下,未冻坡面的平均

流速大于冻结坡面。不同处理下的径流流速总体上随着距坡顶距离的增大而增大。对于未冻坡面,不同覆沙厚度下径流流速从 S_1 到 S_4 断面的增幅分别为 22.85% (U_0), 37.9% (U_1), 59.72% (U_2) 和 70.35% (U_3), 径流流速的增幅随着覆沙厚度增大逐渐增大。对于冻结坡面,不同覆沙厚度下径流流速从 S_1 到 S_4 断面的增幅分别为 71.92% (F_0), 104.26% (F_1), 52.67% (F_2) 和 35.31% (F_3), 径流流速的增幅随着覆沙厚度增大呈先增大后减小的趋势。在相同断面和覆沙厚度条件下,未冻坡面的平均径流流速大于冻结坡面。

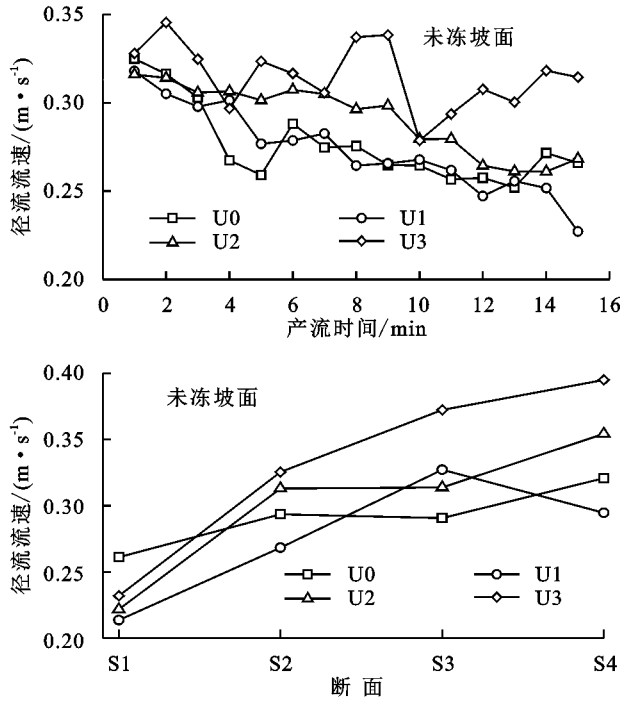


图2 径流流速的时空变化特征

由图3可知,不同处理下的径流深随产流时间的延长总体呈增大的趋势。在相同覆沙厚度条件下,冻结坡面的平均径流深分别是未冻坡面的 4.52 (F_0/U_0), 1.49 (F_1/U_1), 1.44 (F_2/U_2), 1.13 (F_3/U_3) 倍。对于未冻坡面,径流深随时间的延长在 0.36~1.32 mm 变化, U_0 的径流深增幅较小,仅增大了 23.14%。对于冻结坡面,径流深随时间的延长在 0.46~2.89 mm 变化, F_0 在 0~5 min 迅速增加,随后增速减小直到试验结束。未冻坡面的平均径流深总体上随着覆沙厚度的增大而增大,而冻结坡面的变化规律与之相反。由图3可知,不同处理下的径流深总体上随着距坡顶距离的增大而减小。在相同断面和覆沙厚度条件下,未冻坡面的平均径流深均小于冻结坡面(F_2 的 S_1 断面除外)。对于未冻坡面,不同覆沙厚度下径流深从 S_1 到 S_4 断面的降幅分别为 102.4% (U_0), 163.48% (U_1), 309.47% (U_2) 和 114.64% (U_3)。对于冻结坡面,不同覆沙厚度下径流流速从 S_1 到 S_4 断面的降幅分别为 124.65% (F_0), 153.68% (F_1), 66.96% (F_2) 和 106.36% (F_3)。

结合图2与图3发现,未冻坡面和冻结坡面的径流流速在产流 6 min 后, U_0 与 U_1 的径流流速无显著差异,而 U_0 与 U_1 、 U_2 和 U_3 的径流深均表现出显著差异; F_0 和 F_2 的径流流速无显著差异,而 F_0 与 F_1 、 F_2 和 F_3 的径流深均表现出显著差异,径流流速和径流深的时空变化规律表现出不同步性。

2.2 能量参数的时空变化特征

在土壤侵蚀过程中,由于坡面覆沙和土壤冻结的影响,导致径流沿坡面向下所具有的能量发生改变。然而由于覆沙厚度和土壤处理的不同,对能量消耗的影响也不同。径流功率表达了水流在一定高度下顺坡流动时具有的势能,它是作用于单位面积的水流所消耗的功率。单位水流功率是作用于表面的单位重量水体消耗的功率,表达了单位重量水体具有的势能随时间的变化率。径流动能表达了径流侵蚀力的大小。因此,本研究选择径流功率、单位径流功率和径流动能 3 个能量参数^[24],分析其时空变化特征。

2.2.1 时间变化特征 在整个试验过程中,未冻坡

面和冻结坡面径流功率的变化范围分别为 0.22~0.82, 0.29~1.13 N/(m·s)。对于未冻坡面,U0 的径流功率随时间的变化相对稳定,范围为 0.22~0.28 N/(m·s)。U1、U2 和 U3 的径流动能随时间的变化呈现出不同的变化规律。U1 的径流功率在 0~10 min 先减小后增大,随后保持相对稳定直到试验结束。U2 的径流动能在 0~3 min 内迅速增大,随后基本保持不变。U3 的径流功率随时间的延长呈增大的趋势,并且在试验中后期剧烈波动。随着覆沙厚度的增加,径流功率的平均值增大,不同覆沙厚度下径流功率的平均值大小依次为 $U_0 < U_1 < U_2 < U_3$ 。对于冻结坡面,F1、F2 和 F3 的径流功率随时间的变化趋势基本相同,其均值随径流时

间的延长而缓慢增加。而 F0 从 0~5 min 迅速增加,在 5~9 min 缓慢增加,随后径流功率呈波动下降的趋势直到试验结束。由图 4 可知,不同处理下的单位径流功率随产流时间的变化趋势与径流流速的变化趋势大致相同,单位径流功率随产流时间的延长总体呈下降趋势。未冻坡面和冻结坡面单位径流功率的均值分别在 0.047~0.072,0.037~0.072 m/s 变化。对于未冻坡面,随着覆沙厚度的增加,径流动能的平均值增大,并且径流动能随着时间的延长波动越剧烈,不同覆沙厚度下径流动能的平均值大小依次为 $U_0 < U_1 < U_2 < U_3$ 。对于冻结坡面,径流动能随着时间的延长总体呈先增大后减小的趋势。

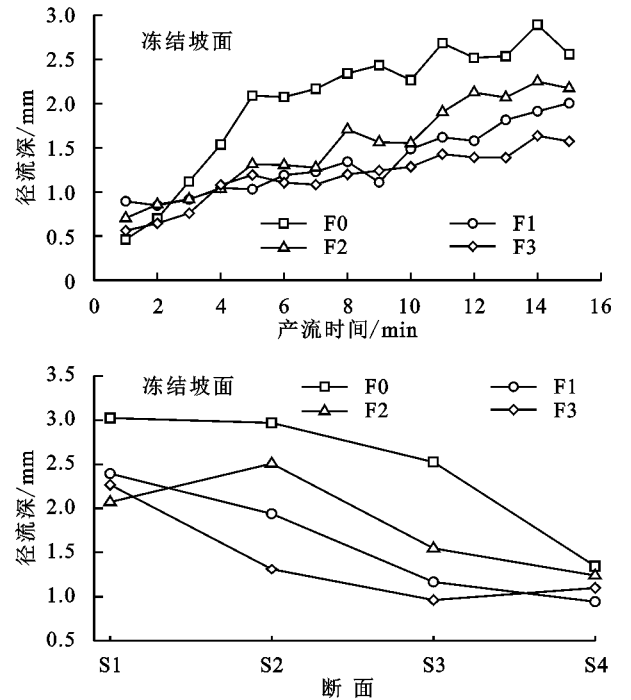
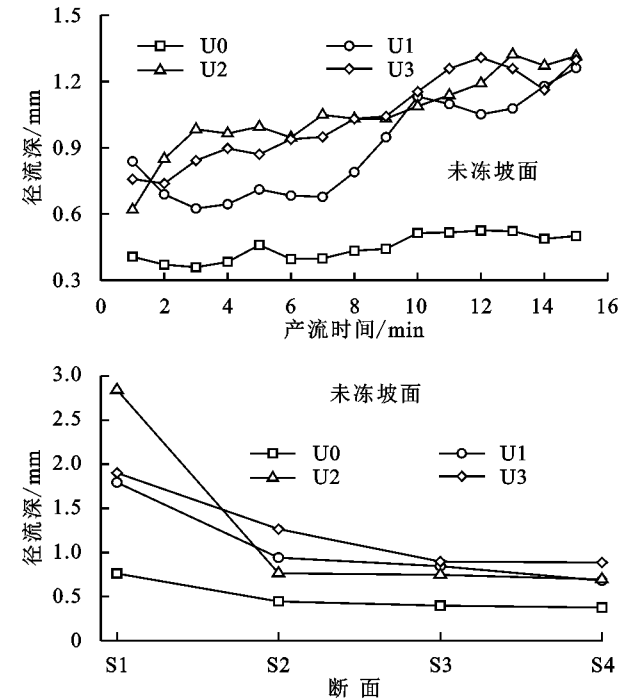


图 3 径流深的时空变化特征

2.2.2 空间变化特征 在空间上,未冻坡面和冻结坡面的能量参数和距坡顶距离均可用线性函数(表 3)表示。径流功率和距坡顶距离呈负相关关系(未冻坡面: $R^2=0.71, p>0.05$;冻结坡面: $R^2=0.97, p<0.05$)。对于未冻坡面,径流功率在距坡顶 0.5 m 处最大。随着距坡顶的距离增加,径流功率逐渐减小。在相同断面,覆沙坡面的径流功率均大于裸坡坡面。对于冻结坡面,在相同断面,裸坡坡面的径流功率均大于覆沙坡面。单位径流功率和距坡顶距离呈正相关关系(未冻坡面: $R^2=0.89, p>0.05$;冻结坡面: $R^2=0.95, p<0.05$),未冻坡面冻结坡面的单位径流功率均随着距坡顶距离的增大而不断增大。径流动能和距坡顶距离呈正相关关系(未冻坡面: $R^2=0.93, p>0.05$;冻结坡面: $R^2=0.95, p<0.05$),且拟合系数均达到了 0.9 以上。拟合方程表明在一定范围内,未冻坡面冻结坡面的径流动能随着距坡顶距离的增大

而不断增大,结合试验现象可以看出,坡面底部的侵蚀现象较为严重。

2.3 坡面侵蚀与径流流速和能量参数量化

表 4 显示了不同处理下产流率(r)与径流流速和能量参数的相关性。由方程可知,径流流速和能量参数在一定程度上可以用来描述该试验条件下的产流过程,产流率与径流流速和能量参数之间呈显著的线性关系($p<0.01$)。对于未冻坡面,就线性方程拟合效果来看,拟合系数的大小按照径流流速=单位径流功率>径流动能>径流功率的顺序排列,并且产流率与径流流速和单位径流功率的拟合系数均达到 70% 以上。对于冻结坡面,产流率与径流流速和能量参数的拟合系数总体上随着覆沙厚度的增大而增大,就线性方程拟合效果来看,拟合系数的大小按照径流功率>径流流速=单位径流功率>径流动能的顺序排列,其中产流率与径流功率、径流流速和单位径流功

率的平均拟合系数在 60%左右,而产流率与径流动

能的平均拟合系数只有 50%。

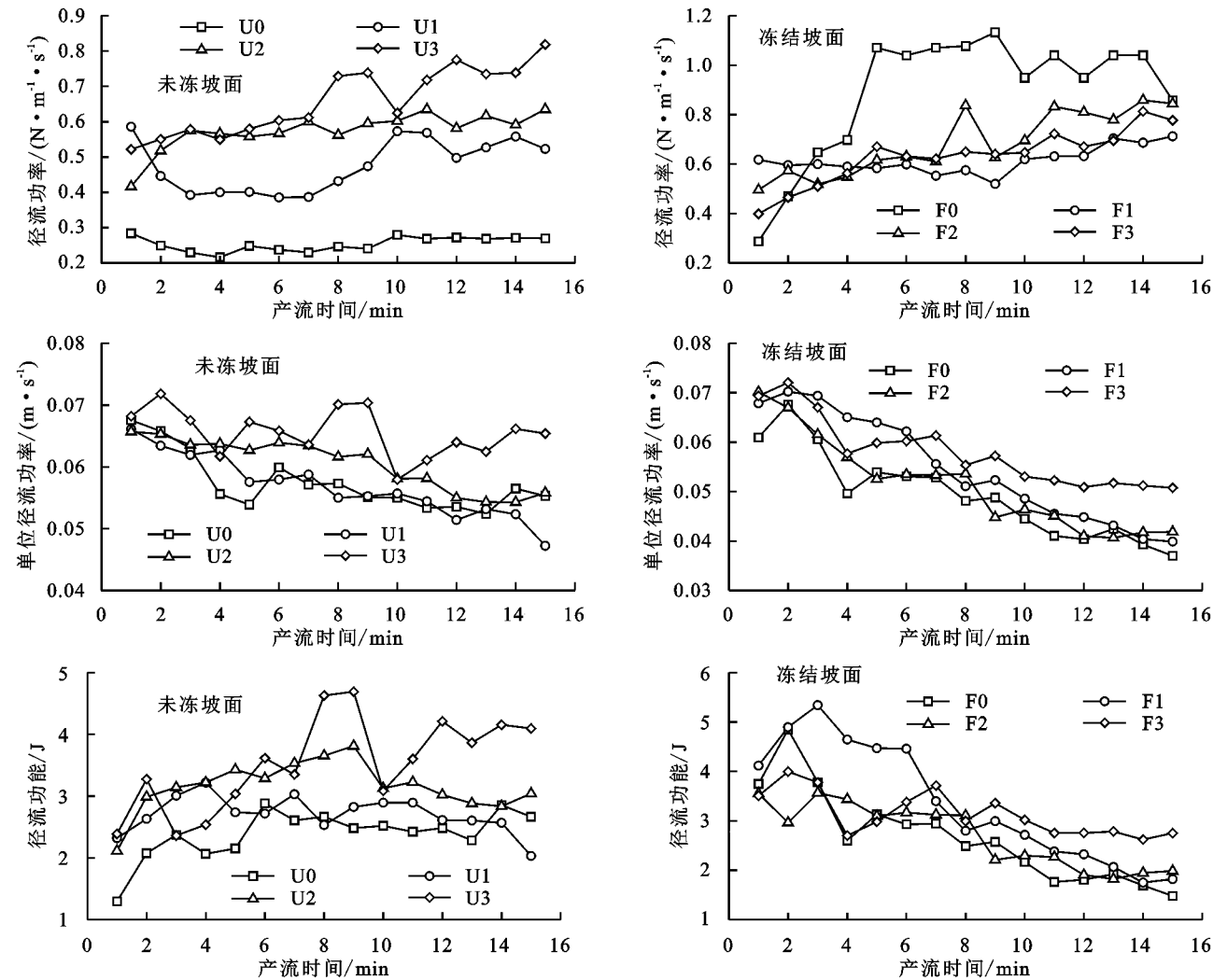


图 4 能量参数随产流时间的变化特征

表 3 能量参数距坡顶距离的变化

能量参数	试验编号	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	拟合公式
W/ (N·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	U0	0.39	0.27	0.24	0.25	$W_U = -0.22D + 0.86$ $R^2 = 0.71, p > 0.05$
	U1	0.76	0.51	0.58	0.41	
	U2	1.29	0.48	0.48	0.51	
	U3	0.89	0.84	0.70	0.74	
	F0	1.12	1.12	1.23	0.87	$W_F = -0.14D + 1.03$ $R^2 = 0.97, p < 0.05$
	F1	0.84	0.79	0.66	0.67	
	F2	0.76	1.05	0.82	0.67	
	F3	1.07	0.63	0.63	0.71	
P/ (m·s ⁻¹)	U0	0.05	0.06	0.06	0.07	$P_U = 0.01D + 0.04$ $R^2 = 0.89, p > 0.05$
	U1	0.04	0.06	0.07	0.06	
	U2	0.05	0.07	0.07	0.07	
	U3	0.05	0.07	0.08	0.08	
	F0	0.04	0.04	0.05	0.07	$P_F = 0.02D + 0.03$ $R^2 = 0.95, p < 0.05$
	F1	0.04	0.04	0.06	0.08	
	F2	0.04	0.05	0.06	0.06	
	F3	0.05	0.05	0.07	0.07	
E/J	U0	2.19	2.77	2.71	3.31	$E_U = 1.33D + 1.3$ $R^2 = 0.93, p < 0.05$
	U1	1.47	2.31	3.44	2.79	
	U2	1.58	3.15	3.16	4.03	
	U3	1.73	3.40	4.45	5.01	
	F0	1.17	1.28	2.09	3.46	$E_F = 1.53D + 0.35$ $R^2 = 0.95, p < 0.05$
	F1	1.03	1.45	3.13	4.30	
	F2	1.11	1.54	2.62	2.59	
	F3	1.81	1.96	3.44	3.32	

表 4 产流率(r ,mL/s)与径流流速和能量参数的关系

试验 编号	径流流速	能量参数		
	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$W/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	$P/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	E/J
U0	$r=-7.16V+2.71$	$r=2.12W-0.4$	$r=-34.43P+2.71$	$r=0.369E-0.44$
	$R^2=0.758, p<0.01$	$R^2=0.445, p<0.01$	$R^2=0.758, p<0.01$	$R^2=0.688, p<0.01$
U1	$r=-5.41V+2.3$	$r=1.65W-0.08$	$r=-26.04P+2.3$	$r=0.24E+0.03$
	$R^2=0.827, p<0.01$	$R^2=0.516, p<0.01$	$R^2=0.827, p<0.01$	$R^2=0.552, p<0.01$
U2	$r=-5.79V+2.43$	$r=1.89W-0.17$	$r=-27.86P+2.43$	$r=0.31E-0.15$
	$R^2=0.738, p<0.01$	$R^2=0.526, p<0.01$	$R^2=0.738, p<0.01$	$R^2=0.587, p<0.01$
U3	$r=-7.21V+2.8$	$r=2.76W-0.64$	$r=-34.68P+2.8$	$r=0.34E-0.29$
	$R^2=0.719, p<0.01$	$R^2=0.707, p<0.01$	$R^2=0.719, p<0.01$	$R^2=0.547, p<0.01$
F0	$r=-0.39V+1.02$	$r=0.14W+0.82$	$r=-1.88P+1.02$	$r=-0.02E+0.98$
	$R^2=0.493, p<0.01$	$R^2=0.457, p<0.01$	$R^2=0.493, p<0.01$	$R^2=0.447, p<0.01$
F1	$r=-0.93V+1.18$	$r=0.37W+0.69$	$r=-4.48P+1.18$	$r=-0.04E+1.07$
	$R^2=0.432, p<0.01$	$R^2=0.5, p<0.01$	$R^2=0.432, p<0.01$	$R^2=0.354, p<0.01$
F2	$r=-2.43V+1.52$	$r=0.96W+0.22$	$r=-11.68P+1.52$	$r=-0.12E+1.25$
	$R^2=0.645, p<0.01$	$R^2=0.752, p<0.01$	$R^2=0.645, p<0.01$	$R^2=0.481, p<0.01$
F3	$r=-2.15V+1.37$	$r=0.74W+0.3$	$r=-10.33P+1.37$	$r=-0.12E+1.17$
	$R^2=0.823, p<0.01$	$R^2=0.726, p<0.01$	$R^2=0.823, p<0.01$	$R^2=0.731, p<0.01$

图 5 为产沙率与径流流速和能量参数相关关系的散点图,就产沙率与径流流速和能量参数的相关性而言,虽然产沙率与径流流速和能量参数存在一定的关系,但是没有明显的规律。因此,从产流量来说,径

流流速和能量参数中的单位径流功率可以对未冻坡面和冻结坡面在不同覆沙厚度条件下的产流过程进行描述;从产沙的角度来看,在本试验条件下尚无可靠的参数可以用来描述产沙过程。

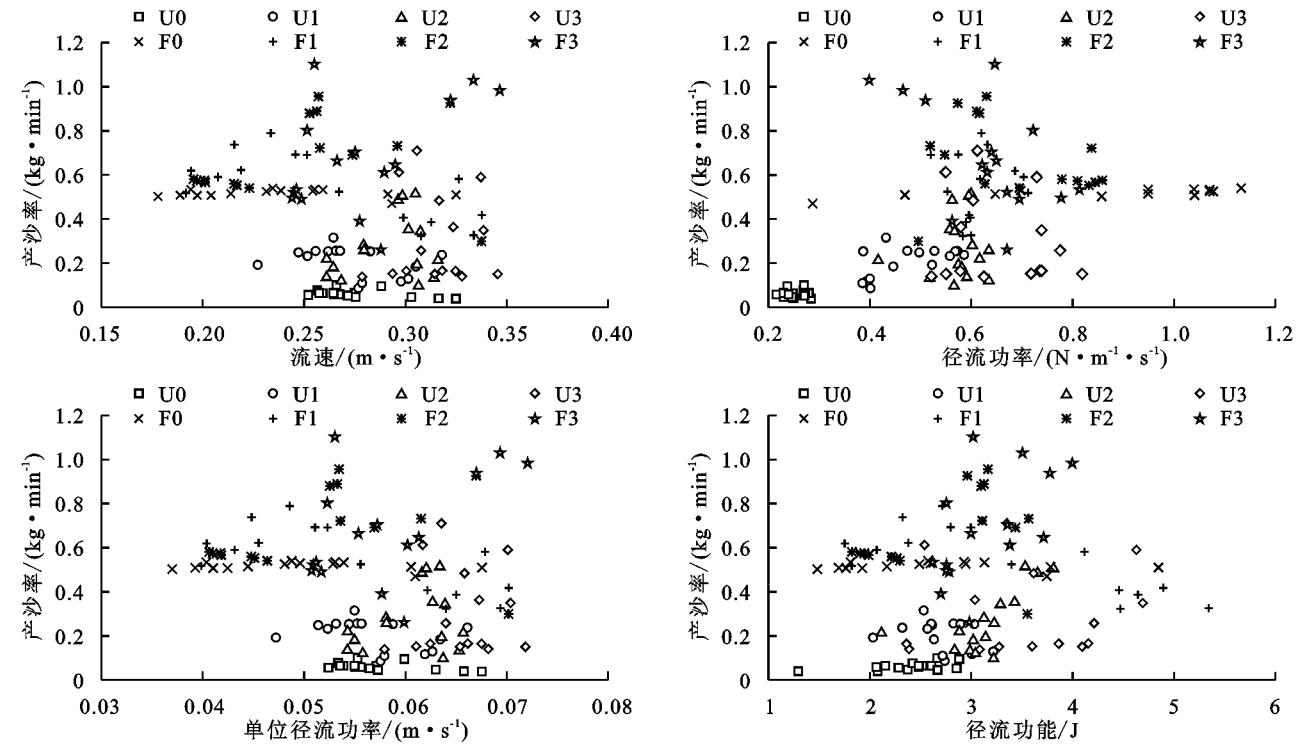


图 5 产沙率与径流流速和能量参数相关关系

3 讨论

全球气候变化造成季节性冻融地区局部冻土区提前消融,从而改变该区的侵蚀情况^[25-26]。因此,在过去的几十年中,气候变暖引起的土壤侵蚀在寒冷地

区引起了强烈关注。黄土高原风水侵蚀交错带在春季解冻期的土壤侵蚀,通常是水蚀、风蚀和冻融侵蚀共同作用的结果。然而,由联合作用引起的土壤侵蚀问题远不止单一作用侵蚀本身的危害^[27-30]。不同的

侵蚀类型叠加会导致土壤侵蚀状况发生巨大改变。

径流流速是最重要的坡面水蚀因子之一,并且可以通过试验直接获得数据^[31]。在试验初期,侵蚀主要以细沟间侵蚀为主,坡面比较光滑,径流阻力小,泥沙输移消耗的径流动能较小,因此流速较大。随着试验的进行,坡面开始产生跌坎,跌坎使径流阻力增大,细沟的出现导致坡面侵蚀以细沟侵蚀为主,水流集中在细沟里,水深增大,径流的搬运能力增大,产生沟道下切、沟壁坍塌等剧烈的侵蚀过程,沟头发生严重的溯源侵蚀,泥沙输移消耗的径流动能增大,导致流速减小。流速越大径流的搬运能力越强,坡面的侵蚀程度更加严重^[32]。因此,为了有效降低坡面侵蚀程度,控制坡长非常重要。在特定情况下,应采取预防措施以减轻径流冲刷造成的危害。在坡面上布设拦截沟和梯田可以大大减少坡面长度,从而降低侵蚀带来的危害。

径流是侵蚀现象的驱动力和载体,泥沙颗粒的运动同样也受到径流的影响,因此能量参数的变化可以揭示坡面侵蚀的一些变化规律^[33]。在本研究中,下垫面条件是影响能量参数变化的主要因素。受坡面覆沙和土壤冻结的影响,沙层和土壤表层孔隙中的水分凝结成“冰盖”阻碍径流下渗,坡面入渗能力降低,坡面径流量较大,侵蚀力较强,冻结坡面迅速形成窄而深的细沟,水流迅速下切并且汇集导致能量参数特征发生改变^[34-35]。在本试验条件下,从能量参数的角度分别讨论了未冻坡面和冻结坡面的侵蚀过程。从等式中可以看出,在不同的土壤处理条件下,能量参数的有效性不同,径流流速和单位径流功率可以较好地反映未冻坡面和冻结坡面的产流过程。然而,一些看似有效的能量参数不能说明未冻坡面和冻结坡面的侵蚀产沙过程。尽管存在这些不足,本研究结果仍可为建立基于解冻期的覆沙黄土坡面侵蚀模型提供参考。

4 结论

(1)不同处理下的径流流速随产流时间的延长总体呈下降的趋势,随着距坡顶距离的增大总体呈增大的趋势,未冻坡面和冻结坡面的径流流速分别在 0.23~0.35,0.18~0.35 m/s 变化。不同处理下的径流深随产流时间的延长总体呈增大的趋势,随着距坡顶距离的增大总体呈减小的趋势,未冻坡面和冻结坡面的径流深分别在 0.36~1.32,0.46~2.89 mm 变化。径流流速和径流深的时空变化规律表现出不同步性。

(2)未冻坡面和冻结坡面径流功率的变化范围分别在 0.22~0.82,0.29~1.13 N/(m·s)。不同处理下的单位径流功率随产流时间的变化趋势与径流流速的变化趋势大致相同,单位径流功率随产流时间的延长总体呈下降趋势。未冻坡面的径流动能随着覆

沙厚度的增加而增大,冻结坡面的径流动能随着时间的延长总体呈先增大后减小的趋势。在空间上,未冻坡面和冻结坡面的能量参数和距坡顶距离均可用线性函数表示($R^2>0.71$)。

(3)径流流速和能量参数在一定程度上可以用来描述该试验条件下的产流过程,产流率与径流流速和能量参数之间呈显著的线性关系($p<0.01$)。未冻坡面产流率与径流流速和单位径流功率的拟合系数均达到 70%以上,冻结坡面产流率与径流功率、径流流速和单位径流功率的平均拟合系数在 60%左右。

参考文献:

- [1] 孙宝洋,李占斌,张洋,等.黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J].农业工程学报,2016,32(17):112-119.
- [2] Zhao B H, Li Z B, Li P, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors under the condition of ecological construction in a hilly-gully watershed of the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2017,296:10-17.
- [3] Zhang Y, Li P, Liu X J, et al. Effects of farmland conversion on the stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates on the Loess Plateau of China [J].Geoderma,2019,351:188-196.
- [4] 张翔,李鹏,张洋,等.东柳沟沉积泥沙粒径空间分布与特征[J].水土保持学报,2015,29(1):75-79.
- [5] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall [J].Journal of Hydrology,2017,549:244-251.
- [6] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology,2017,553:447-456.
- [7] 张辉,李鹏,鲁克新,等.冻融作用对坡面侵蚀及泥沙颗粒分选的影响[J].土壤学报,2017,54(4):836-843.
- [8] Wang T, Li P, Li Z B, et al. The effects of freeze-thaw process on soil water migration in dam and slope farmland on the Loess Plateau, China [J].Science of the Total Environment,2019,666:721-730.
- [9] Wang T, Li P, Ren Z P, et al. Effects of freeze-thaw on soil erosion processes and sediment selectivity under simulated rainfall [J].Journal of Arid Land,2017,9(2):234-243.
- [10] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报,2016,32(20):161-170.
- [11] 张丽萍,唐克丽,张平仓.片沙覆盖的黄土丘陵区土壤水蚀过程研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):3-5.

- [12] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):25-28.
- [13] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [14] 谢林妤,白玉洁,张凤宝,等.沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J].土壤学报,2017,54(1):60-72.
- [15] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):56-60.
- [16] 任宗萍,苏远逸,李鹏,等.覆沙坡面径流冲刷试验研究[J].水土保持学报,2018,32(3):29-35,41.
- [17] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [18] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap [J]. *Catena*, 2015, 128: 108-121.
- [19] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
- [20] 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.
- [21] Wang T, Li P, Liu Y, et al. Experimental investigation of freeze-thaw meltwater compound erosion and runoff energy consumption on loessal slopes [J]. *Catena*, 2020, 185: e104310.
- [22] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J].农业工程学报,2018,34(6):160-167.
- [23] 汤珊珊,李占斌,鲁克新,等.覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系[J].农业工程学报,2017,33(20):136-143.
- [24] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能
- 量调控及水沙响应关系的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):32-39.
- [25] Dagesse D F. Freezing-induced bulk soil volume changes [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(3): 389-401.
- [26] Sahin U, Anapali O. Short communication: The effect of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability in different salinity and sodicity conditions [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2007, 5(3): 431-434.
- [27] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. The effect of soil water content and erodibility on losses of available nitrogen and phosphorus in simulated freeze-thaw conditions [J]. *Catena*, 2018, 166: 21-33.
- [28] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J].水土保持通报,2004,24(6):1-5.
- [29] 王飞,范昊明,郭成久,等.我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J].生态环境,2008,17(1):173-177.
- [30] 张瑞芳,王瑄,范昊明,等.我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J].中国水土保持科学,2009,7(2):24-28.
- [31] 张霞,李鹏,李占斌,等.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J].水土保持学报,2018,32(6):16-21.
- [32] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.
- [33] 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.
- [34] 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: 38-44.
- [35] Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Slope erosion and hydraulics during thawing of the sand-covered Loess plateau [J]. *Water*, 2020, 12: e2461.

(上接第 55 页)

- [13] 杨超,苏正安,马菁,等.不同近地表水文条件下矿山弃土对土壤细沟可蚀性的影响:以攀枝花盐边县龙麟矿山为例[J].水土保持学报,2016,30(6):67-72.
- [14] Quinton J N, Catt J A. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England [J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(3): 343-349.
- [15] Huang C H, Laflen J M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 408-416.
- [16] 郑粉莉,唐克丽,张成娥.降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J].人民黄河,1995,17(7):22-24.
- [17] Liu G, Zheng F L, Lu J, et al. Interactive effects of raindrop impact and groundwater seepage on soil erosion [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: e124066.
- [18] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 150-158.
- [19] Zhang X C, Wang Z L. Interrill soil erosion processes on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 48: 652-664.
- [20] Munkholm L J, Kay B D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 702-709.