

Sliding on sand-covered loess slopes is substantially influenced by soil saturation, which is controlled by sand thickness, rainfall intensity, and slope gradient.

Keywords: sand-covered slopes; sliding; wind-water complex erosion; slope erosion and sediment yield; loess plateau

黄土高原北部风蚀与水蚀交替出现,夏秋季节以水蚀为主,冬春季节则以风蚀为主。强风在冬春时节将大量沙尘搬运至黄土坡面、沟壑及河道,塑造出独特的沙土覆盖黄土坡面地貌^[1],该区域风沙覆盖黄土面积达 $1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[2]。黄土高原风水侵蚀交错带的沙土覆盖黄土坡面地貌,沙层覆盖在黄土上,呈斑状或带状分布,两者间存在明显界面^[3]。沙土与黄土在土壤容重、含水率、导水率、渗透率、颗粒组成和团聚体结构等方面差异大,形成独特的沙土二元结构坡面,在沙土二元结构坡面中,黄土层的持水能力远高于沙层,且饱和导水率远小于沙层^[4],形成水文性质迥异的复合结构,侵蚀过程与单一黄土坡面差异显著^[5]。因此覆沙黄土引起了诸多学者的关注。研究发现覆沙条件显著影响坡面侵蚀过程^[6],主要包括覆沙厚度、降雨强度、坡度、坡长、沙层粒径组成以及土壤物理特性等^[7]。坡面侵蚀是降雨作用下土壤流失的主要表现形式,其过程受坡面特性、降雨强度、覆沙条件等多种因素影响。覆沙厚度与坡长的协同作用会增强坡面产流产沙的变异性,其中覆沙厚度对产沙速率影响最大,长坡的产沙量通常高于短坡^[8]。坡面覆沙能够显著推迟初始产流时间,通过改变产流模式,从而促使界面流的形成,并降低沙层与土层间的摩擦力,进而引发滑片侵蚀。随着沙层厚度的增加,产流和土壤流失速率会加剧。覆沙的粒径组成也会影响产流产沙过程,延长初始产流时间并增加侵蚀量,野外人工模拟降雨试验,揭示了覆沙黄土坡面侵蚀滑移的过程为垂直渗流—坡面潜流—崩塌^[9]。此外,野外试验的覆沙黄土坡面上,地表产流量较小^[8],因此覆沙坡面侵蚀过程可能不由地表水力侵蚀决定,而是主要通过沙层滑移破坏显著影响整个侵蚀过程。许多滑坡相关的研究指出,滑移与土壤含水量的变化密切相关^[10]。

相关研究发现,土壤水分变化受到两方面因素的影响:如土壤水力性质和地形等内在因素,以及外在的动态因素(如降雨强度、历时等)。高强度降雨和长时间降雨会显著改变坡体内的水分分布^[11],并对不同深度产生不同程度的影响^[12]。较低坡位可能接收来自较高区域的侧向水流,并影响到局部的土壤水分^[13],这种影响可能改变不同位置的入渗过程,进而影响产流^[14]。此外,根据野外观测研究结果,水

分入渗可导致地下水位上升^[15],增加土体滑移的风险。

由于沙土与黄土的物理性质及水力特性存在明显差异,覆沙黄土的失稳滑动机制与单一黄土边坡显著不同,因此有必要深入研究降雨作用下覆沙黄土的滑移机理。尽管已有大量研究对单一土壤或岩石构成的滑坡进行深入探讨,但对于覆沙黄土坡面在降雨条件下的滑移侵蚀行为及其与坡内水分变化关系的观测研究仍相对匮乏。覆沙黄土坡面作为一种复合结构,其力学特性与单一物质斜坡的滑移存在显著差异^[16]。现有研究表明,沙土二元结构可能导致侵蚀量增加,但相关研究多集中于覆沙黄土坡面的侵蚀过程^[17],对沙层滑移过程的探讨仍不够深入,尤其是滑移发生的条件与机理研究较为匮乏,这可能制约对水蚀—风蚀交错带及风水复合侵蚀区产流产沙机制的深入理解。因此,系统研究覆沙黄土坡面的滑移机理及其防控技术具有重要的理论和应用价值。本文通过室内模拟降雨试验,设置不同覆沙厚度、降雨强度和坡度的组合条件,分析黄土坡面上覆沙厚度、降雨强度和坡度对沙土二元结构中产流产沙、水分变化及滑移的影响,旨在为风水复合侵蚀区的水土流失治理与预防提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置及材料

研究区域的土壤样本采集自黄土高原北部典型风沙地貌区陕西神木六道沟流域($38^{\circ}46'—38^{\circ}51'N$, $110^{\circ}21'—110^{\circ}23'E$)。该区域处于水蚀与风蚀作用交替地带,存在大量片沙覆盖黄土坡面。受季风气候驱动,当地土壤侵蚀呈现显著季节性规律,冬春两季盛行风力侵蚀,夏季(6—9月)降水集中引发强烈水力侵蚀。

本研究采用室内降雨大厅模拟降雨试验的方法,试验于2023年7—9月和2024年5—9月在中国科学院水土保持与生态环境研究中心人工模拟降雨大厅内进行,雨强可调控范围为 $30\sim 150 \text{ mm/h}$ ^[18]。试验在 $2.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的可移动钢制土槽上进行(图1),分布在土槽的侧面坡顶、坡中和坡底处距离顶部20,30 cm处分别插入土壤水分传感器,测量土壤水分变化,土槽下端为产流收集装置。

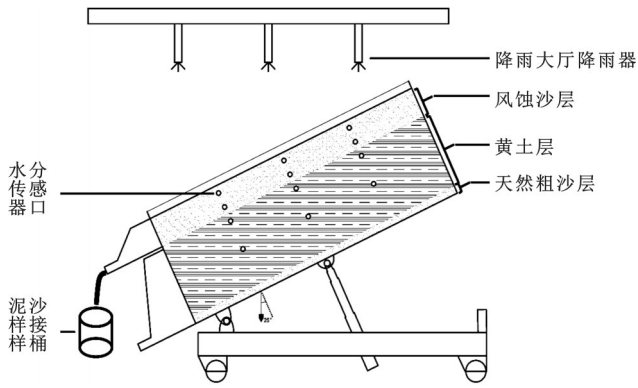


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

1.2 试验设计与方法

试验选用沙厚、雨强、坡度3个影响因子,设计2个沙厚(20, 10 cm), 2个(60, 90 mm/h)雨强, 2个(25°, 15°)坡度, 进行组合试验。经组合设计出6组试验。试验设计见表1。

表1 模拟降雨试验设计

Table 1 Simulation rainfall experiment design

序号	覆沙厚度/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	试验时间	降雨历时/min
1	20	60	25	20240814	169
2	10	60	25	20240903	137
3	20	90	25	20230917	123
4	10	90	25	20231010	102
5	20	60	15	20240507	224
6	10	60	15	20240822	146

1.3 试验过程

试验用沙和黄土来自神木市六道沟流域的不同采样点,黄土采于山坡断层侧中间土层,质地致密、坚实,沙采于当地松散堆积沙。取回的黄土经空旷处晾晒,通过晒土、筛土,用1 cm筛分离出石块、根系等杂物,再将风干后的黄土过5 mm筛,剔除根系杂物,测定其黏粒(<0.001 mm)、粉粒(0.005~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)含量。装填产流槽前,用酒精燃烧法测定原始含水量,按目标含水量5%~15%计算所需水量。若降雨试验结束,黄土还要考虑下次降雨试验的重复利用,则晒土后需用石碾碾碎,保证土壤粒径范围一致,防止因粒径差异导致结果偏差,其对土壤渗透性、抗侵蚀性等性质影响直接,碾、筛后土壤更细腻,接近原状土晒干直接过筛的状态,便于在产流槽中均匀铺设,实现试验条件标准化。

试验前,在空土槽底部均匀铺设一层5 cm厚的天然粗沙,模拟自由排水^[19],并覆盖纱布,随后在纱布上分5次填装试验黄土样品,每次装一层,每层

10 cm,装填每层土时,对表土进行适当压实并表面抓毛糙化处理,以消除土层间的垂直层理,减少土层间不连续性,保证土壤容重均匀并防止分层^[20],使土层透水状况和水分状态更符合自然状态下土壤的状况。在装填试验土样后,沙土被覆盖于表层,随后进行均匀洒水并覆盖遮雨布,静置24 h,以保证土壤的前期体积含水量处于5%~10%的范围内。黄土和沙层的土壤容重分别保持在约1.6 g/cm³和1.4 g/cm³左右。每场试验自降雨开始后开始计时。

试验中记录初始产流时间、产流结束时间、产流量、产沙量、含沙量及土壤水分。降雨开始后,观察土槽坡面,当出口处出现稳定水流时,记录初始产流时间。随后,每隔2 min用集流桶收集一次泥沙样品,并在初始产流40 min后结束试验。

试验结束后,将每个集流桶(含水和泥沙)的总质量记录下来,泥沙样品静置24 h后取一定量至钢碗中,放入105 °C烘箱烘干24 h。烘干后用电子秤称量钢碗中的泥沙质量,通过集流桶中泥沙质量与钢碗中泥沙质量的比值,计算含沙量和含水量,进而计算瞬时产沙率、瞬时产流率、累积产沙量、累积产流量。

1.4 数据分析

产流发生前的阶段呈现典型非饱和水分运移特征,土壤孔隙系统具有较高的初始吸水能力,可有效容纳外部水分输入。此时降雨强度未超过土壤入渗容量,水分主要通过基质势梯度驱动下的非饱和流向下迁移,入渗过程完全受控于土壤物理特性与初始含水状态。室内人工降雨试验,采用单位面积坡面接收对应总降雨量去除产水量,计算入渗量,求取土壤水蓄量变化率,具体公式如下:

$$Q_z = I \times t \times \cos\alpha \quad (1)$$

$$Q_r = Q_z - Q_j \quad (2)$$

$$i = \frac{dQ_r}{dt} \quad (3)$$

$$i_s = \frac{dQ_s}{dt} \quad (4)$$

$$i_r = \frac{dQ_w}{dt} \quad (5)$$

式中: Q_z 为单位面积总降雨量(L/m²); I 为降雨强度(mm/h); t 为降雨历时(min); α 为降雨产流槽坡度; Q_r 为单位面积入渗量(L/m²); Q_j 为单位面积产流量(L/m²); i 为土壤水蓄量变化率(mm/min); i_s 为单位面积瞬时产沙率[kg/(m²·min)]; Q_s 为单位面积产沙量(kg/m²); i_r 为单位面积瞬时产流率[L/(m²·min)]; Q_w 为单位面积累积产流体积(L/m²)。土壤水蓄量变化率 i 指单位面积土柱中总蓄水量的时间变化率,在

未产流之前即为入渗率,在产流后水流中可能包含侧向地下出流, i 综合入参与侧向出流(包括滑移带走的孔隙水分)的影响。有滑移发生时, i 的变化与一般入渗率过程有较大不同,更能代表系统水文状态变化。

2 结果与分析

2.1 覆沙黄土坡面产流和滑移时间

覆沙黄土坡面产流初始时间与滑移发生时间见表 2。研究结果表明,覆沙坡面滑移发生的时间紧随产流发生的时间,中间间隔常常仅数分钟,说明系统

满足产流条件后很快就满足滑移条件,两个状态间差别较小。

比较第 1 和第 2 场、第 3 和第 4 场、第 5 和第 6 场的试验结果可知,厚覆沙条件下产流与滑移的发生时间均晚于薄覆沙条件,说明增加覆沙厚度将延迟产流产沙过程。比较第 1 和第 3 场、第 2 和第 4 场的试验结果可知,降雨强度增加使产流、产沙的发生时间均提前;比较第 1 和第 5 场、第 2 和第 6 场的试验结果可知,坡度增加也使得产流、产沙发生的时间均提前,说明增加降雨强度和坡度都有加速产流产沙过程发生的作用。

表 2 覆沙黄土坡面产流初始时间与滑移发生时间

Table 2 Initial time of runoff generation and slip occurrence time on sand-covered slopes

单位:mm

序号	产流初始时间	滑移发生时间	序号	产流初始时间	滑移发生时间
1	139	140	4	62	66
2	97	101	5	184	190
3	83	88	6	106	117

2.2 产流产沙过程

2.2.1 累积产流量与产沙量

各试验场次的累积产流量、产沙量过程如图 2 所示,瞬时产流率、产沙率过程见图 3。由图 2 可知,比较第 1 和第 2 场、第 3 和第 4 场、第 5 和第 6 场的试验结果,在相同雨强、坡度下,不同覆沙厚度的产流量和产沙量较为接近。这表明随着沙层厚度增加,虽然产流和产沙时间均有所延迟,但累积产流量和产沙量均未发生显著改变。比较第 1 和第 3 场、第 2 和第 4 场试验的结果可知,在相同覆沙厚度和坡度条件下,降雨强度的增加导致土层坡面产流量和产沙量均增大,表明提高单位时间供水量,产流更容易发生,而产流增加也提高了启动和输运泥沙的能量。

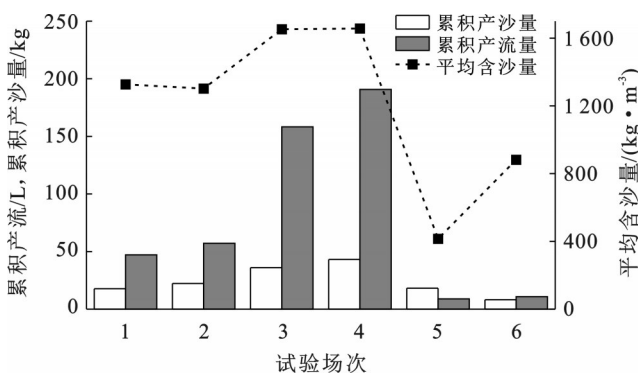


图 2 各场试验覆沙黄土坡面累积产流量、产沙量和平均含沙量

Fig.2 Cumulative runoff volume, sediment yield, and average sediment concentration of sand-covered loess slope surface in each experimental session

图 2 表明,所有场次试验的平均含沙量都在 400 kg/m^3 以上。按照 400 kg/m^3 作为高含沙水流量浓度的标准,所有试验均产生高含沙水流。其中,在坡度 25° 以上的试验中,平均含沙量达到 $1300 \sim 1600 \text{ kg/m}^3$,远超一般高含沙水流含沙量。这表明覆沙坡面在发生滑移的情况下,径流的含沙量一般都极高,显示滑移侵蚀过程的水沙比例特征。

2.2.2 产流率和产沙率

在不同条件下,覆沙黄土坡面的产流率和产沙率随产流历时的变化呈现出较复杂的规律性。对比第 1 场与第 3 场、第 2 场与第 4 场的试验结果(图 3),在相同的坡度和覆沙厚度条件下,产流率和产沙率均表现为随雨强的增大而增大的趋势,尤其是峰值产流率和产沙率,差异较为明显,表明覆沙黄土坡面的产流产沙率对降雨强度的变化较为敏感。比较第 1 和第 5 场、第 2 和第 6 场试验的结果可知,不同坡度下产流率与产沙率相差较大,表明坡度对覆沙坡面产流产沙过程有显著影响。

比较第 1 和第 2 场、第 5 和第 6 场试验的结果可知,在 60 mm/min 雨强下,虽然发生产流的时间不同,但产流、产沙的速度较为接近。然而,对于更为极端的雨强 90 mm/min (试验 3,4),厚覆沙的第 3 场中产流、产沙曲线峰值更明显,产流、产沙率峰值远大于第 4 场。结果表明,覆沙厚度的影响较为复杂,在一般降雨条件下,不同覆沙厚度的影响区别可能不明显,但在极端强降雨条件下,厚覆沙坡面的产

流、产沙过程可能延迟,但更快速,变化更剧烈。由于产沙过程由滑移主导,试验结果揭示厚覆沙坡面

在陡坡和强降雨条件下可导致更晚发生,但更快速,规模更大的滑移侵蚀。

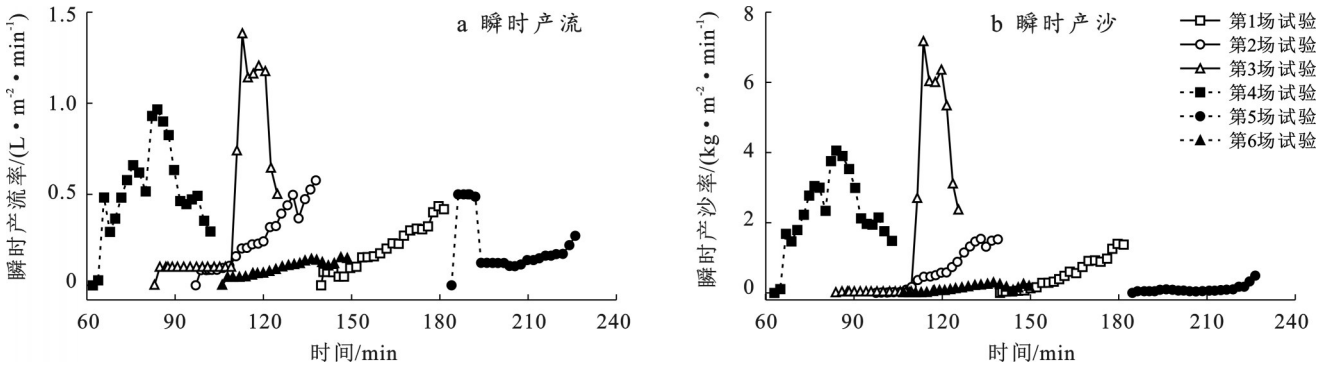


图3 覆沙黄土坡面瞬时产流、产沙率变化过程

Fig.3 Instantaneous runoff production rate and sediment yield rate on sand-covered slopes

2.3 土壤水蓄量变化

土壤水蓄量变化率是在单位时间内土壤水分的流入与流出量的净变化率,是沙土-黄土二元结构土壤剖面中总体水文变化的重要表征。在降雨稳定供水条件下的入渗,产流之前,所有的降雨都会渗入坡面,蓄量变化率恒等于降雨强度,因此只计算产流后的蓄水量变化率。根据公式(3)计算得到各试验场次的土壤水蓄量变化率*i*(图4)。

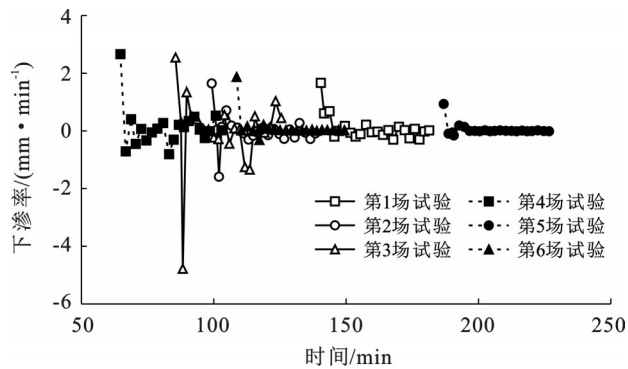


图4 土壤水蓄量变化率变化过程

Fig.4 Change process of variation rate of soil water storage

由图4可知,第1场、第2场、第5场和第6场的*i*分别稳定在 $-0.30\sim 0.20$, $-0.30\sim 0.27$, $-0.01\sim 0.02$, $-0.02\sim 0.02$ mm/min;第3场、第4场的*i*则始终在很大的波动范围内震荡。*i*变化大致可以分为2个阶段,前期波动变化较大,后期波动变化较为稳定。在后期,第1场和第2场试验,*i*总体在0值附近按照 ± 0.50 mm/min内震荡。第3场和第4场,整个产流过程*i*极不稳定,震荡幅度甚至超过1.00 mm/min。第5场与第6场*i*值在整个6组试验中最为稳定,在产流初期之后几乎没有震荡。

通过比较分析各组实验*i*的波动幅度可知,*i*受到覆沙厚度、降雨强度和坡度的影响。对比第1场和第

2场、第3场和第4场、第5场和第6场的*i*变化,覆沙层越厚,*i*的波动幅度越大,也更早发生。对比第1场和第3场、第2场和第4场*i*的变化,表明降雨强度越大,波动幅度越大、越早。*i*的震荡幅度第3场大于第1场,第4场大于第2场。*i*随时间曲线的震荡幅度甚至能够超过5 mm/min,说明*i*主要受到降雨强度的影响。对比第1场和第5场、第2场和第6场*i*的变化,表明坡度越大,波动幅度越大、越早。*i*的震荡幅度第1场大于第5场,第2场大于第6场。

第2场和第3场的人渗率出现极端负值,由公式(2)结合试验可知,当 $Q_i > Q_e$ 时发生滑移,大片的沙块瞬间流失,带走沙块中大量的孔隙水,造成*i*出现极端负值的特殊情况。

2.4 覆沙层破坏滑移

本试验中,覆沙黄土坡面的初始产流时间分别在开始降雨后139,97,83,62,184,106 min。覆沙黄土坡面发生滑移的时间分别在开始降雨后140,101,88,66,190,117 min。覆沙黄土坡面的滑移现象均出现在初始产流之后(图5)。通过对第1场与第2场、第3场与第4场、第5场与第6场试验结果的对比分析,可以发现,在降雨强度和坡度相同的条件下,厚覆沙黄土坡面发生滑移的时间明显晚于薄覆沙黄土坡面,延迟时间为22~73 min。这一结果表明,坡面覆沙能够显著推迟滑移的发生时间。对比第1和第3场、第2和第4场试验的结果可知,在相同覆沙厚度、坡度下坡面出现滑移的时间均呈现:雨弱小>雨强大的规律,厚覆沙黄土坡面出现滑移的时间较薄覆沙黄土坡面延迟45~52 min,说明坡面覆沙的滑移受到降雨强度的增大而提前。

由图2可知,通过第1和第2场、第3和第4试验、第5和第6场试验的结果可知,在不同沙厚条件下,虽然发生滑移的时间不同,但累积产沙量基本一致。



图5 各试验场次的滑移实际状况

Fig.5 Actual sliding conditions of each experimental session

2.5 覆沙黄土坡面土壤水分饱和度变化

饱和度是指土壤水的容积与土壤孔隙总有效容积的比值,可以反映土壤水分在土壤孔隙中填充的状况,常用于土壤水分运动的研究。

由图6、图7可知,降雨从沙层表面逐渐入渗,随后进入黄土层。沙层和黄土层饱和度随降雨时间的增加而逐渐增大。根据沙层饱和度的变化大致可以分为前中后3个阶段。①层饱和度快速增加,降雨从沙层表面入渗逐渐进入上层沙土中,沙层水分饱和度变化的范围由初始值增加40%~50%。但由于降雨未进入黄土层,因此,此阶段黄土层的饱和度基本没有变化,与初始值接近。②随着时间的推移,降雨在沙层中不断入渗进入沙土交界面,水分通过沙土交界面快速进入黄土层,坡面入渗过程整体发生改变,沙层饱和度的增长速度减慢,并出现平稳甚至略微下降的现象,此时沙层的入渗率逐渐稳定。与此同时,由于降雨逐渐进入黄土层,黄土层饱和度先进入快速增长阶段,而后也进入平稳阶段,且在进入平稳阶段后饱和度的变化范围较小,基本保持稳定。③沙层水分再次显著增加直至最大值,但相比于第一阶段增加的速度略慢。黄土层仍是平稳阶段,其饱和度保持平稳甚至略微下降。当沙层内达到最大饱和深度时,满足沙层破坏的临界条件,脆弱的覆沙黄土坡面二元结构造成坡面出现滑移崩塌,破坏体向下滑移产沙,在滑移破坏面处产生产流冲刷。同时,沙层的饱和度在短时间内迅速降低。

虽然不同试验场次达到平稳阶段的时间不同,出现滑移的时间不同,但沙层和黄土层饱和度增加的大小基本相同,表明滑移现象的发生受到沙层和黄土层水分变化的共同影响,而沙层饱和度的变化受到沙层厚度、降雨强度和坡度等条件的影响。

3 讨论

3.1 土壤水分变化及产流过程机理

试验结果表明,土壤水分变化过程对覆沙黄土坡面的产流产沙全过程产生重要影响。由于产流和侵蚀主要发生在沙层,因此主要分析沙层水分变化过程及其影响,但黄土层的水分变化也在其中起到重要作用。

(1) 快速增加阶段。试验初期,土槽内的沙土处于相对干燥状态,降雨从沙层表面入渗逐渐进入沙土中,水分未达到黄土层,仅在沙层内运动。由于此时沙层含水率低,吸力较大,入渗率较高。从土壤水分运动的基本理论可知,这一阶段土壤入渗能力随入渗量增加不断减小,但始终大于土壤饱和导水率^[21]。由于沙层饱和导水率高,降雨强度始终低于沙层入渗能力,因此所有水分入渗。此阶段沙层饱和度快速增加。在试验初期湿润锋尚未至黄土层时,黄土也同样处于相对干燥状态,所以此阶段的黄土层饱和度基本保持不变^[22]。

(2) 平稳阶段。随着时间的推移降雨即将入渗进入沙土交界面,湿润锋达到黄土层,在水分进入黄土层的初期,黄土含水率较低,土层吸力较大,入渗能

力较高^[23],因此沙层水分离出速率快,造成沙层饱和度的增长速度减慢,并逐渐平稳甚至出现略微下降的现象。沙土交界面水分运移速率即黄土层入渗率随时间也逐渐减小并趋于稳定状态。黄土层在充分供水的条件下,饱和度快速增长,但随着降雨的继续入渗,黄土层的含水率逐渐升高,土层吸力逐渐减小,基质势梯度减弱,入渗率减小并接近稳定,黄土的饱和度由快速增长阶段逐渐进入平稳阶段^[24]。

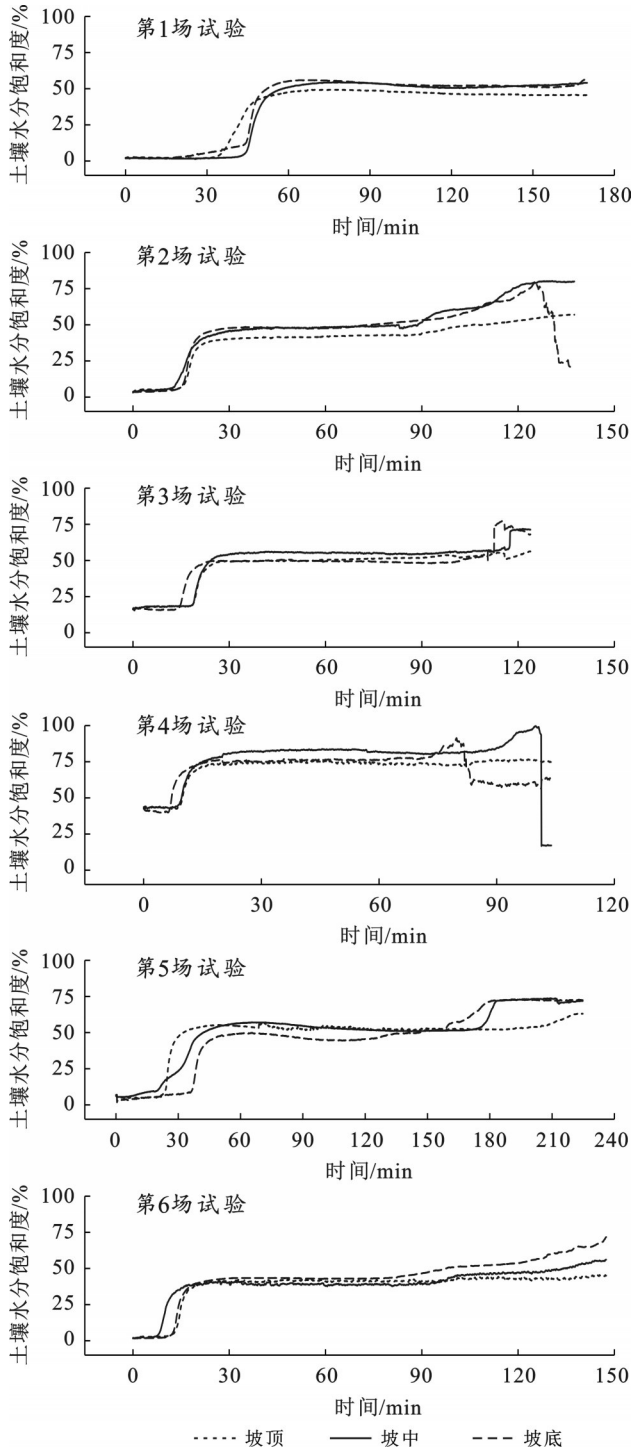


图6 沙层土壤水分饱和度变化过程

Fig.6 Variation process of sand layer saturation

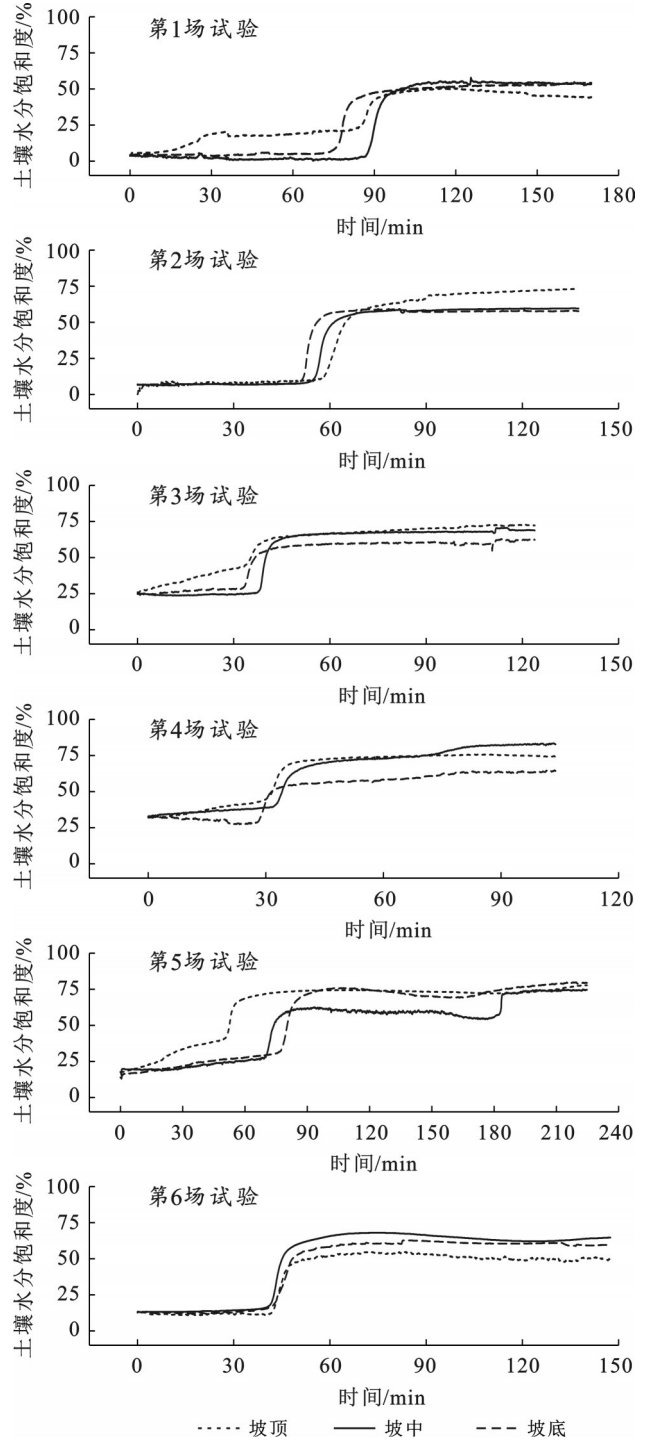


图7 黄土层土壤水分饱和度变化过程

Fig.7 Variation process of loess layer saturation

(3) 再次增长阶段。这一阶段沙层的饱和度重新开始升高直至饱和或接近饱和状态,但相比于第一阶段的增长速度略慢,而黄土层饱和度依然相对保持稳定,表明充分供水条件下沙层的稳定入渗率要大于黄土层的稳定入渗率,在一定时刻后,黄土层入渗率小于沙土交界面的供水率,水分在沙层和黄土界面累积,并可能产生侧向流动,形成潜流。当沙层蓄水容量充满后沙层表面产生地表产流,其整个

过程符合蓄满产流的特点,与 Fox G A 等^[25]发现高渗透性土层内的产流需要达到一定的水头条件后才发生的研究结果一致。部分试验中(试验 2,3,4),沙层滑移的影响范围到达或向上延伸至下坡甚至中坡土壤水分观测剖面处,使该处土壤水分饱和度和迅速降低,形成又一个阶段。

不同覆沙厚度、降雨强度和坡度下,各坡面土壤水蓄量变化率 i 随降雨历时变化总体上呈现逐渐下降的趋势,其中覆沙厚度较大的坡面 i 下降越大,波动性也越强。当表层土壤完全饱和后, i 逐渐下降最终趋近于稳定。此时土壤孔隙系统的蓄水能力已基本耗尽,入渗过程完全受限于沙土—黄土二元系统的等效饱和导水率。此后地表产流急剧增加,同时伴随侵蚀动力的显著增强。对土壤蓄水量的深入分析可加深对系统总体水文状态影响滑移的机理认识。

3.2 覆沙层破坏滑移侵蚀与土壤水分关系

滑移现象在长历时降雨条件下的覆沙黄土坡面演化过程中呈现显著的非线性特征。当降雨持续时间足够长时,覆沙层与下伏黄土层构成的二元结构体系将经历完整的水分运移—土壤弱化—力学失衡过程^[26]。在相同雨强和坡度条件下,厚覆沙黄土坡面较薄覆沙黄土坡面滑移时间延迟,主要由两者沙层储水容量及水分入渗路径长度的差异造成。厚覆沙层由于蓄水容量更大及入渗水分运移路径更长,在降雨初期可吸纳更多降水形成暂时性储水层^[27],推迟饱和带及孔隙水正压力的形成,延缓覆沙黄土坡面整体稳定性的丧失。但随着储水空间逐渐饱和,其重力作用增加与基质吸力衰减的综合作用最终导致滑移破坏^[28],且其规模可较薄覆沙层更大。

由于沙层颗粒较粗,土壤内部黏聚力小,稳定性弱,沙土界面形成一定厚度水分饱和带后,满足沙层破坏的临界条件,坡面可出现坍塌滑移,滑移破坏的沙土容易被水流冲刷带走^[29]。同时未滑移部分的土壤水可从滑移面流失,引起水分快速变化。部分试验中滑移影响范围向上延伸至下坡甚至中坡土壤水分观测剖面(试验 2,3,4),使水分饱和度迅速降低,也增强了未滑部分土壤的稳定性。因此,沙层的滑移破坏是一个复杂的水文过程,也对产流和产沙造成深刻影响。

饱和度的变化表明,滑移的发生需要达到一定的临界条件,受到沙层厚度、降雨强度和坡度等条件的影响。三者共同影响土壤水分的变化及相应的坡面力学稳定状态。试验结果显示,覆沙厚度增大,滑移发生将延迟,滑移规模也更大;降雨强度及坡度增大,滑移发生时间提前。滑移的发生并非沙层越厚

越容易滑移的简单正比关系,而是受到降雨强度和坡度的共同影响。厚覆沙黄土坡面在降雨初期可能更稳定,但随着降雨的持续,其滑移风险逐渐增加。

产沙过程的差异受到物质储备与侵蚀动能的共同影响,厚覆沙层不仅提供更丰富的易侵蚀物源量,其滑移块体解体过程中土壤水释放及滑移面后方的土壤水出流,可显著增加地表水流流量及侵蚀动能,引起更复杂的地表水流侵蚀过程。

3.3 研究不足

本研究利用模拟降雨对不同沙厚、雨强、坡度条件下覆沙黄土的滑移现象进行研究,获得了初步结果,但在下述方面还有待今后进一步研究和完善。

(1) 从理论和模拟计算方面深入研究覆沙黄土坡面的水分过程及滑移侵蚀,进一步量化对水文和侵蚀过程的机理研究,提升认识的普遍性。

(2) 室内模拟试验存在诸多局限性,而野外环境更为复杂多变。后续研究应加强野外观测,结合实际条件选择合适的试验场地,并将室内模拟试验的成果与野外数据相结合,以推动更全面的分析。

4 结论

本文通过模拟降雨试验,研究覆沙黄土在不同沙厚、雨强和坡度条件下的滑移现象,得出以下结论。

(1) 长时间降雨条件下,覆沙黄土坡面易发生沙层滑移。滑移发生时间受覆沙厚度、雨强和坡度影响,厚覆沙延迟滑移,而雨强和坡度增加则使滑移发生时刻提前。产沙量随雨强和坡度增加而增加。

(2) 覆沙厚度、降雨强度和坡度共同影响土壤水蓄量的变化,土壤水蓄量变化率随覆沙厚度、雨强和坡度影响,厚覆沙延迟滑移,而雨强和坡度增加则使滑移发生时刻提前。其中,土壤水蓄量变化率对降雨强度的敏感性最高,表明其在滑移过程中起关键作用。

(3) 覆沙黄土坡面土壤水分过程随时间变化复杂。饱和度变化先后经历快速增加、平稳和缓慢增长 3 个阶段。沙层厚度的增加会延迟土壤饱和,而雨强和坡度的增加则加速坡面下游部分饱和,进而影响滑移的临界时间。这一动态过程揭示土壤水分饱和与滑移发生的内在联系。

(4) 滑移发生与沙层厚度具有较复杂关系,受雨强和坡度共同影响。厚覆沙条件初期较稳定,但随降雨持续,滑移风险增加,导致更快速的侵蚀产沙。滑移发生的临界条件受沙层厚度、雨强和坡度共同作用。这一结果强调在覆沙黄土地区进行生态保护和工程设计时,需综合考虑多因素的协同影响。

参考文献(References)

- [1] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.
Zhang Jianwen, Li Peng, Gao Haidong, et al. Response relationship between micro-relief variation and slope erosion under sand-covered conditions [J]. Arid Zone Research, 2020,37(3):757-764.
- [2] 吴成基,甘枝茂,孙虎,等.黄河中游多沙粗沙区亚区划分[J].人民黄河,1999,21(12):22-24.
Wu Chengji, Gan Zhimao, Sun Hu, et al. Sub-region division of the sandy and coarse sandy areas in the middle reaches of the Yellow River [J]. Yellow River, 1999,21(12):22-24.
- [3] 王庆妮,曹晓娟,刘颖,等.沙盖黄土坡面产流产沙对坡长和覆沙厚度的响应[J].北京林业大学学报,2024,46(10):81-89.
Wang Qingni, Cao Xiaojuan, Liu Ying, et al. Response of runoff and sediment production on sand-covered loess slopes to slope length and sand covering thickness [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024,46(10):81-89.
- [4] 武秀荣,张风宝,王占礼.片沙覆盖黄土坡面沙土二元结构剖面土壤物理性质变化研究[J].水土保持学报,2014,28(6):190-193.
Wu Xiurong, Zhang Fengbao, Wang Zhanli. Variation of sand and loess properties of binary structure profile in hilly region covered by sand of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(6):190-193.
- [5] 谢林好,白玉洁,张风宝,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.
Xie Linyu, Bai Yujie, Zhang Fengbao, et al. Effects of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered loess slopes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(1):60-72.
- [6] 苏远逸,冯朝红,张扬,等.黄土丘陵区覆沙坡面产流产沙过程及水沙关系[J].干旱区研究,2022,39(4):1166-1173.
Su Yuanyi, Feng Zhaohong, Zhang Yang, et al. Runoff and sediment yield and relationship between water and sediment of sand covered slope of loess hilly region [J]. Arid Zone Research, 2022,39(4):1166-1173.
- [7] 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.
- [8] 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,1999,13(1):40-45.
Zhang Liping, Tang Keli, Zhang Pingcang. Soil water erosion processes in loess hilly gully region covered with sheet sand [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999,13(1):40-45.
- [9] 张丽萍,倪含斌,吴希媛.黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征实验研究[J].水土保持研究,2005,12(5):126-127.
Zhang Liping, Ni Hanbin, Wu Xiyuan. Soil water erosion processes on sloping land with different material in the wind-water interaction zone in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005,12(5):126-127.
- [10] Wang Yixuan, Chai Junrui, Cao Jing, et al. Effects of seepage on a three-layered slope and its stability analysis under rainfall conditions [J]. Natural Hazards, 2020,102(3):1269-1278.
- [11] Fan Kaixuan, Liu Ying, Zhang Xuyang, et al. Assessing the relative contribution of climate change and human activity factors to spatiotemporal distributions of sand fixation service in the Loess Plateau [J]. GIScience & Remote Sensing, 2025,62(1):2444630.
- [12] Liang Ziwei, Chen Xiaolan, Wang Ce, et al. Response of soil moisture to four rainfall regimes and tillage measures under natural rainfall in red soil region, southern China [J]. Water, 2024,16(10):1331.
- [13] Ran Bin, Xing Zhenguo, Fang Jie, et al. Analysis of soil moisture dynamics and its response to rainfall in the Mu Us sandy land [J]. Water, 2025,17(1):105.
- [14] Lei Wenkai, Dong Hongyuan, Chen Pan, et al. Study on runoff and infiltration for expansive soil slopes in simulated rainfall [J]. Water, 2020,12(1):222.
- [15] Yu Fengdan, Qiao Gang, Wang Kai, et al. Investigation of groundwater characteristics and its influence on landslides in Heifangtai Plateau using comprehensive geophysical methods [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2023,11(2):171-182..
- [16] Xu Guoce, Tang Shanshan, Lu Kexin, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. Environ. Earth Sci., 2015,74(3):2523-2530.
- [17] Ren Zongping, Zhang Xing, Zhang Xunchang, et al. Sand cover enhances rill formation under laboratory rainfall simulation [J]. Catena, 2021,205:105472.
- [18] 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. Introduction to the artificial rainfall simulation hall and rainfall simulation equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004,11(4):177-178.
- [19] Zhang Qingwei, Wang Zhanli, Guo Qi, et al. Plot-based experimental study of raindrop detachment, interrill wash and erosion-limiting degree on a clayey loessal soil [J]. Journal of Hydrology, 2019,575:1280-1287.