

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.005.

李爽, 张秋芬, 郑越馨, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水沙尺度传递效应及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 1-10.

Li Shuang, Zhang Qiufen, Zheng Yuexin, et al. Analysis of Runoff-Sediment Scale Transfer Effect on Slope Surface of Loess Hilly Region and Its Influencing Factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 1-10.

黄土丘陵沟壑区坡面水沙尺度传递 效应及其影响因素分析

李爽¹, 张秋芬², 郑越馨¹, 鱼京善^{1,3}, 姚晓磊¹, 韩飞飞¹

(1.北京师范大学 水科学研究院 数字流域实验室, 北京 100875;

2.黄河水利委员会 黄河水利科学研究院 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003;

3.山东省生态环境规划研究院 国家环境保护陆海统筹生态治理与系统调控重点实验室, 济南 250101)

摘 要: [目的]探究坡面水沙运动过程中的尺度效应, 阐明黄土高原丘陵沟壑区水沙运动尺度效应影响机制, 进而为水沙传递机理研究及黄河流域水沙综合治理提供科学支撑。[方法]基于黄河子洲径流试验站 4 个径流场径流泥沙资料, 通过对比分析次降雨事件下不同坡长产流产沙过程, 揭示了坡面产流产沙的尺度传递效应。提出尺度传递效率概念, 用来表征上下层级间水沙传递关系, 进而探究了径流泥沙传递效率的影响因素。[结果](1) 不同降雨类型特征因素对坡面产流产沙的影响不同, 降雨历时主要影响坡面产流产沙能力, 平均雨强主要影响坡面产流产沙起始时间; (2) 次降雨事件下, 不同坡长的径流传递是较为理想的平衡传递机制, 且随坡长增加, 径流的传递能力呈减小趋势。而在 40~60 m 坡长条件下, 泥沙的传递表现为非平衡传递过程, 随坡长增加, 泥沙的传递能力呈先增大后减小的变化趋势; (3) 不同尺度坡面水沙传递效率的影响因素不同, 径流深、平均雨强及雨后表层土壤含水率是影响水沙尺度效率传递的主要因素。[结论]黄土丘陵沟壑区坡面产流产沙能力受降雨特性及坡长的影响, 水沙沿程传递存在明显的折损或增益的尺度效应, 水沙传递效率受雨强、径流及土壤湿度等多重因素的调控。

关键词: 水土流失; 尺度效应; 尺度传递效率; 产流输沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0001-10

Analysis of Runoff-Sediment Scale Transfer Effect on Slope Surface of Loess Hilly Region and Its Influencing Factors

Li Shuang¹, Zhang Qiufen², Zheng Yuexin¹, Yu Jingshan^{1,3}, Yao Xiaolei¹, Han Feifei¹

(1. Digital Watershed Laboratory, College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of Yellow River Basin, Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Land and Sea

Ecological Governance and Systematic Regulation, Shandong Academy for Environmental Planning, Jinan 250101, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the scale effect in the process of runoff and sediment movement on the slope, to clarify the scale effect influence mechanism of runoff and sediment movement in the hilly and gully region of the Loess Plateau, so as to provide scientific support for the study of runoff and sediment transfer mechanism and the comprehensive management of runoff and sediment in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the runoff and sediment data of four runoff fields in Zizhou runoff test station of the Yellow River, the scale transfer effect of runoff and sediment yield on slope was revealed

收稿日期: 2023-05-04

修回日期: 2023-09-04

资助项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC3204403); 国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金(U2243234, U2243601); 河南省自然科学基金青年基金(222300420236)

第一作者: 李爽(1999—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: shuang@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 鱼京善(1965—), 男, 吉林延边人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jingshan@bnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

by comparing and analyzing the runoff and sediment yield processes of different slope lengths under rainfall events. The concept of scale transfer efficiency was proposed to characterize the runoff and sediment transfer relationship between the upper and lower levels, and to further explore the influencing factors on runoff and sediment transfer efficiency. [Results] (1) The characteristics of different rainfall types had different effects on the runoff and sediment yield on the slope. The rainfall duration mainly affected the runoff and sediment yield on the slope, and the average rainfall intensity mainly affected the starting time of runoff and sediment yield on the slope. (2) Under the event of rainfall, the runoff transfer of different slope lengths was an ideal equilibrium transfer mechanism, and with the increase of slope length, the transfer capacity of runoff showed a decreasing trend. Under the condition of 40 ~ 60 m slope length, the transfer of sediment was a non-equilibrium transfer process. With the increase of slope length, the transfer capacity of sediment increased first and then decreased. (3) The influencing factors on flow-sediment transfer efficiency on different scale slopes were different. Runoff depth, average rainfall intensity and surface soil moisture content after rain were the main factors affecting the transfer efficiency of flow-sediment scale. [Conclusion] The runoff and sediment yield capacity of the slope in the loess hilly and gully region is affected by rainfall characteristics and slope length. There is a significant scale effect of damage or gain in the transmission of runoff and sediment along the way. The efficiency of water and sediment transport is regulated by multiple factors such as rainfall intensity, runoff and soil moisture.

Keywords: soil and water loss; scale effect; scale transfer efficiency; runoff and sediment transport

水沙运动的尺度问题是许多生态水文学家关注的热点问题之一,其中径流和输沙是水沙运动研究中关注的焦点。当前,多数水文尺度效应研究主要集中在坡面(或地块)、小流域、区域或流域 3 个尺度层次,且理论研究主要应用到径流单元和坡面等小尺度^[1-3]。一般来说,由于土壤性质的差异以及地表、地下径流侵蚀过程的影响,没有明确的水文信息,水沙运动的结果不能随着尺度的变化进行尺度外推^[4]。黄土丘陵沟壑区地形复杂多变,是黄土高原水沙运动较为复杂的区域,也是开展径流、泥沙传递空间尺度效应的重点研究区域^[5]。为此深入研究黄土丘陵区坡面系统径流泥沙在不同尺度上的传输机理,探求一条行之有效的尺度扩展途径,这将对破解尺度传递效应,进行多尺度径流泥沙模拟具有重要的研究价值,对保护黄河流域的生态环境健康和高质量发展有着重要的意义。

目前已有不少学者对黄河水沙尺度效应进行了探讨,并取得了显著的成果。王玲玲等^[6]研究结果表明,不同空间尺度地貌单元径流量与输沙模数的水沙关系表现出较好的线性关系,且两者关系随着空间尺度增加更为密切,但水沙尺度间传递的比例关系随着空间尺度增加迅速减小。张乐涛等^[7]研究表明,坡面系统内坡面上方含沙水流对下方径流含沙量和输沙模数的影响随着尺度的延伸呈减小的变化趋势。闫云霞^[8]、方海燕^[9]、王玲玲^[10]等研究结果表明黄土高原径流输沙模数随

流域面积变化的趋势也存在差异,主要有单调减小、单调增大、先增大而后减小、先减小而后增大 4 种类型。随之众多学者探究尺度效应产生的原因,韩晓燕等^[11]发现坡面产流产沙过程主要由降雨驱动,随着水沙物质运移至细沟或者沟道,径流成为水沙运动的主要驱动力,降雨特征因素则以间接方式推动径流侵蚀力和总量变化,进而影响水沙尺度传递进程。Zhou 等^[12]认为降雨的时空变化是影响产流产沙的主要因素,不同的降雨类型对径流量、产沙量以及水沙关系有不同的影响。例如降雨总量直接影响径流量及入渗率,而降雨强度、降雨历时和时空特征则决定了地表径流过程和地表冲刷。虽然 Abbaspour 等^[13]将水文模型用于不同尺度的降雨-径流过程的模拟,但是目前坡面土壤侵蚀模型的开发常常过度简化地貌变量的空间复杂性,模型的研究没有考虑坡面之间、坡面与沟道之间的径流泥沙传递关系,因而无法将坡面侵蚀模型简单地外推到大尺度范围使用^[14]。然而随着尺度的增加,土壤特性、植被、气候以及地形等因素的变异性往往变得更加重要,即目前的水文工作还需要对水沙过程的影响因素展开大量的研究,建立基于尺度效应的不同影响因素下的坡面土壤侵蚀模型。以上研究表明,由于尺度横向上的空间差异性和纵向上的水沙过程以及主导因素驱动方式的差异,各尺度间的径流泥沙并非呈现线性叠加的关系。探讨水沙运动如何在不同尺度层级进行逐级

传递,什么是水沙传递过程中空间和尺度变异的影响因素,能否用一个共性的指标去表征尺度间传递特征,是揭示水沙尺度传递过程机理,构建具有物理意义的水沙传递过程模型亟待解决的一系列问题^[15-16]。

综上,为揭示黄土丘陵区坡面径流输沙尺度传递规律,本文在岔巴沟流域选择不同尺度坡面小区,分析天然降雨条件下坡面产流产沙过程观测资料,刻画不同尺度坡面降雨水沙产输过程,揭示相邻尺度坡面径流、泥沙传递关系,利用水沙传递效率概念表示不同尺度坡面水沙传递能力,探究黄土丘陵区不同坡面水沙传递效率影响因素,为黄土丘陵区坡面水沙尺度效应理论的发展提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

研究区域(黄河子洲径流试验站团山沟)地处岔巴沟流域的一级支流蛇家沟流域,37°41'N,109°58'E。研究区域沟壑密集,坡度变化较大,多年平均降水量 437 mm,最大降水强度 3.5 mm/min,年平均温度 8℃,年平均蒸发量 1 570.4 mm,属于半干旱大陆季风气候。土壤侵蚀主要是水蚀,主要侵蚀方式为面蚀及细沟侵蚀。根据研究区域地形地貌特征,团山沟流域内布设 12 个径流场观测流域降雨径流泥沙过程(图 1),水文观测资料丰富,是研究典型黄土丘陵沟壑区水沙运动的理想场所,本文选取同坡度不同空间大小的 2,3,4,7 号径流场为研究对象,构成坡面系统的不同尺度系列。

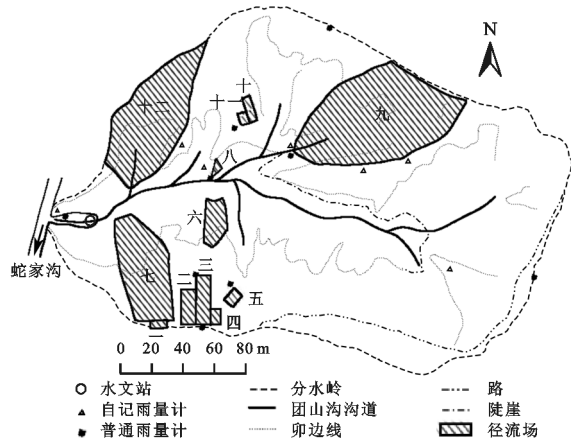


Fig. 1 Runoff plots in Tuanshangou catchment

1.2 数据来源

本文数据主要来源于黄河水利委员会编印的《黄河流域子洲径流试验站水文试验资料》。通过对岔巴沟流域团山沟集水区 2,3,4 号径流场和 7 号全坡面径流场次降雨事件资料的深入挖掘,揭示不同尺度坡面径流泥沙的尺度效应及其尺度传递效率影响因素。各径流场具体特性见表 1, 坡坡 2,3,4 号径流场坡度

相同、坡宽相同,空间面积大小按比例递增,7 号径流场为全坡面,2,3,4 号径流场及 7 号径流场构成不同尺度的坡面系统。

表 1 径流场的基本特征
Table 1 Characteristics of the runoff plots

径流场	位置	坡型	坡度/ (°)	水平投影 坡长/m	坡宽/ m	面积/ m ²
4	左岸崩坡	直行坡	22	20	15	300
2	左岸崩坡	直行坡	22	40	15	600
3	左岸崩坡	直行坡	22	60	15	900
7	左岸崩沟坡	自然坡	全坡面	126	45.5	5740

1.3 数据分析和统计

1.3.1 降雨类型划分 基于历史实测数据,统计 1963—1966 年 2,3,4,7 号径流场子洲径流试验站坡面不同空间尺度的所有降雨事件的降雨、径流、泥沙数据,筛选同一时期 4 个径流场同时产流的次降雨事件。其中 2,3,4 号径流场共用一个 3 号雨量站,7 号径流场另设有一个 7 号雨量站。3 号雨量站站点共记录降雨事件 221 次,1963 年 40 次、1964 年 60 次、1965 年 43 次、1966 年 78 次。7 号雨量站站点共记录降雨事件 205 次,1963 年 35 次、1964 年 55 次、1965 年 41 次、1966 年 74 次。分析 4 年来同一时期 4 个坡面产生径流的降雨事件共 106 次(2,3,4 号场各 26 次,7 号场 28 次)。筛选 4 个坡面同一场降雨中同时产生径流的降雨事件共 21 次,根据降雨总量、降雨历时、平均降雨强度 3 种降雨特征因子对 21 次降雨事件进行分析比较,从中挑选短历时强降雨、短历时弱降雨以及长历时弱降雨 3 场典型降雨事件分别为:1964 年 8 月 2 日短历时强降雨、1966 年 8 月 8 日短历时弱降雨以及 1966 年 8 月 15 日长历时弱降雨,分析 3 场降雨的降水-产流和降雨-产沙过程。具体降雨特征见表 2。

1.3.2 水沙尺度传递效率计算 本研究基于次降雨事件,利用不同尺度下的累积径流深(H)和侵蚀模数(SSY)表征不同层级径流泥沙产量,并由此计算出相邻尺度间的水沙尺度传递效率(δ)。以降雨量(P)、降雨历时(T)、平均雨强(I)、雨前表层土壤含水率(f_1)、雨后表层土壤含水率(f_2)、上下尺度层级小区的径流深(H)和侵蚀模数(SSY)为主要影响因素,绘制上下尺度层级径流尺度传递效率(δ_H)和泥沙尺度传递效率(δ_{SSY})与上述因素之间的相关系数矩阵表。深入探讨影响径流泥沙传递效率的变化原因。

(1)定义水沙尺度传递效率 δ 。同一降雨事件下,坡面相邻尺度单元间下一尺度层级径流泥沙产量(F_F)与上一尺度层级径流泥沙产量(F_U)的比值定义为水沙尺度传递效率 δ 。该参数用于表征水沙传

递关系, δ 的大小表示径流泥沙传递过程中的折损和增益程度。当 $\delta < 1$, 表示尺度传递过程中径流泥沙发生了损失, 随着 δ 的增大, 损失程度逐渐减小; 当 $\delta > 1$, 则表示尺度传递过程中径流泥沙发生了增益, 随着 δ 的增大, 则增益程度逐渐提高。

表 2 典型降雨特征

Table 2 Typical rainfall characteristics

降雨时间 (年-月-日)	3 号雨量站			7 号雨量站		
	总量/mm	历时/min	平均强度/(mm · min ⁻¹)	总量/mm	历时/min	平均强度/(mm · min ⁻¹)
1964-08-02	13.60	25.00	0.54	9.90	37.00	0.27
1966-08-08	11.50	51.00	0.23	9.00	40.00	0.23
1966-08-15	37.90	205.00	0.18	41.30	130.00	0.32

(2) 采用数理统计方法, 根据尺度传递效率的定义, 将 δ 作为相邻尺度间的连接参数, 构建水沙尺度传递效率与侵蚀调控因子耦合关系的数学表达式, 定量分析不同影响因子与尺度间径流泥沙传递效率之间的相互作用。

$$\delta = f_{(水, 沙)}(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_n)$$

(2)

式中: $(\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_n)$ 分别为不同降雨事件下的水文参数, 包括降雨量 P (mm)、降雨历时 T (min)、平均雨强 I (mm/min)、雨前表层土壤含水率 f_1 (%)、雨后表层土壤含水率 f_2 (%)、上下尺度层级小区的径流深 H (mm) 和侵蚀模数 SSY (t/hm²)。

上述计算方法的各项指标参数均从《黄河流域子洲径流试验站水文试验资料》中直接获得或者换算的。本文运用 δ_H 和 δ_{SSY} 这两个指标分别来评价径流和泥沙的尺度传递效率, 并以此分析径流泥沙传递规律在不同尺度上是否一致, 进而寻求水沙尺度传递效率的影响因素。

2 结果与分析

2.1 基于次降雨事件的降雨产流产沙过程

2.1.1 典型降雨条件下不同尺度坡面降雨-产流过程
基于 4 个径流场对应的 3 号和 7 号雨量站水文资料, 选择水文参数: 单次降雨单个小区径流深 (mm), 绘制典型降雨条件下坡面系统的降雨-产流过程 (图 2)。图 2A 短历时强降雨事件中, 从时间来看: 3 号雨量站各径流场产流时间相同, 7 号雨量站对应的 7 号径流场与之相比, 径流深产生和结束时间较晚, 整个产流过程出现了滞后性。从斜率来看: 在产流过程中, 2 号场折线变化的斜率最大, 即随尺度的延伸, 产流能力呈现先增大后减小的变化趋势。图 2B 短历时弱降雨事件中, 从时间来看, 产流的时间顺序依次是: 2 号场 > 3 号场和 4 号场 > 7 号场。整个降雨过程中由于站点记录存在间隔导致折线比较曲折, 整体

$$\delta = \frac{F_{\text{下}}}{F_{\text{上}}} \times 100\%$$

(1)

式中: $F_{\text{下}}$ 为两个相邻尺度中尺度较大层级的径流泥沙产量; $F_{\text{上}}$ 为两个相邻尺度中尺度较小层级的径流泥沙产量; 尺度层级排序为: 4 号场 < 2 号场 < 3 号场 < 7 号场。

来看产流过程中斜率的变化情况依次是: 2 号场 > 3 号场 > 4 号场 > 7 号场, 即产流能力随尺度的延伸呈先增后减的变化趋势。图 2C 长历时弱降雨事件中, 产流的时间顺序: 2 号场 > 3 号场和 4 号场 > 7 号场。2 号场 > 3 号场 > 4 号场 > 7 号场, 即产流能力随尺度增加呈现先增大后减小的变化趋势且变化的程度较为显著。

对比典型降雨条件下同一径流小区的降雨产流过程, 长历时径流量的峰值较短历时的峰值出现时间较晚, 强降雨径流量的峰值较弱降雨的峰值出现时间较晚。降雨径流产生初期, 短历时降雨条件下径流形成的时间较长历时降雨条件下径流形成的时间短, 弱降雨条件下径流形成的时间较强降雨条件下径流形成的时间短。

2.1.2 典型降雨条件下不同尺度坡面降雨-产沙过程
基于 4 个径流场对应的 3 号和 7 号雨量站水文资料, 选择单次降雨单位面积产沙量即侵蚀模数 (t/hm²), 绘制典型降雨条件下坡面系统的降雨-产沙过程 (图 3)。图 3A 是短历时强降雨输沙过程, 从产沙时间来看: 2 号场、3 号场、4 号场同时产生泥沙, 7 号场较晚产沙。从产沙能力来看, 7 号场的变化较为剧烈在 1 min 内和 3 号场同时达到峰值, 然后 2 号场达到峰值, 且 2 号场的产沙量峰值远大于其他径流场, 4 号场最晚达到峰值。4 号场面积最小产沙量较小。随尺度增加, 7 号场面积最大产沙量下降较为缓慢, 即产沙能力随尺度增加呈现先增大后减小的趋势。图 3B 是短历时弱降雨产沙过程。从产沙时间来看, 产沙顺序依次是: 2 号场和 3 号场 > 4 号场 > 7 号场。从侵蚀模数的峰值来看: 7 号场 > 2 号场 > 3 号场 > 4 号场。虽然 2 号场和 3 号场同时产生泥沙, 但是 2 号场的变化比 3 号场更快, 峰值也更高。4 号场产沙量不大, 7 号场产生的侵蚀模数的时间最晚但是侵蚀模数

峰值最高。短历时弱降雨过程中侵蚀速率为 7 号场 > 2 号场 > 3 号场 > 4 号场,即产沙能力在 20~60 m 范围内随着尺度的增加呈现先增大后减小的趋势且尺度间的差异显著。图 3C 是长历时弱降雨输沙过程。从产沙时间来看,产沙顺序依次是:2 号场和 3 号场 > 4 号场 > 7 号场,长历时弱降雨过程中折线变化较为曲折,20~60 m 径流场范围内的雨峰时间较早,7 号场的整体变化迟滞,根据斜率的变化比较几个径流场的产沙能力:3 号场 > 2 号场 > 4 号场 > 7 号场,

即在 20~60 m 范围内随尺度的增大,产沙能力逐渐变大。

对比典型降雨条件下同一径流小区的降雨产沙过程,长历时产沙量的峰值较短历时的峰值出现时间较为滞后,弱降雨产沙量的峰值较强降雨的峰值出现时间较为滞后。降雨产沙初期,短历时降雨条件下产沙量形成的时间较长历时降雨条件下产沙量形成的时间短,强降雨条件下产沙量形成的时间较弱降雨条件下产沙量形成的时间短。

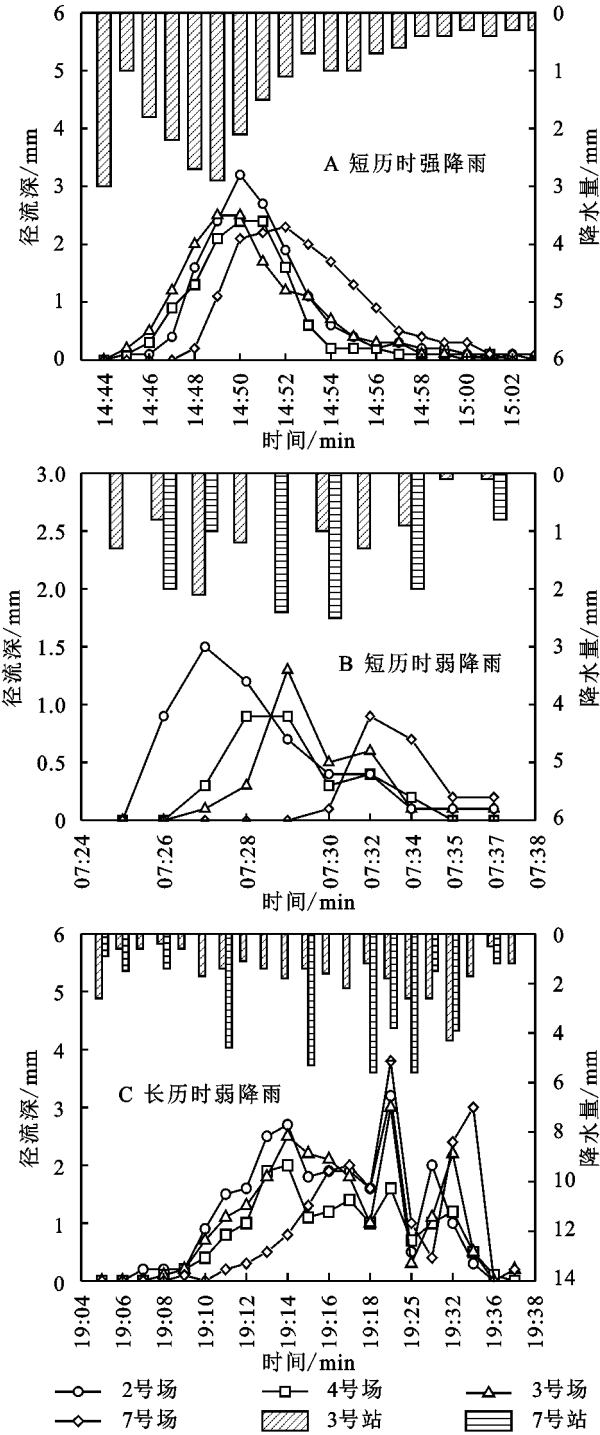


图 2 降雨-产流过程

Fig. 2 Rainfall-runoff process

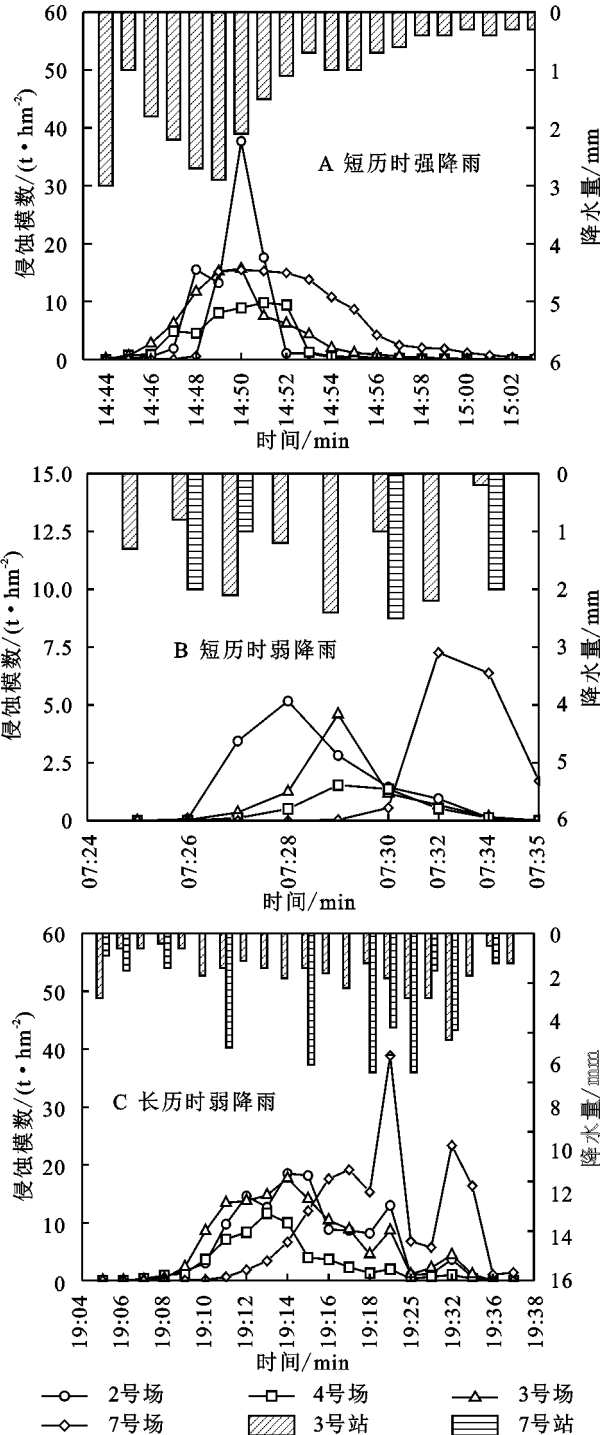


图 3 降雨-产沙过程

Fig. 3 Rainfall-sediment process

2.2 基于次降雨事件的相邻尺度坡面水沙传递特征

2.2.1 次降雨事件下相邻尺度坡面径流传递关系

通过对比次降雨事件下不同尺度坡面的径流深关系,进行径流深尺度传递能力的线性分析(图 4)。拟合结果表明:各尺度坡面之间的径流深均呈线性关系,方程决定系数 R^2 拟合度较高(最高可达 0.97,达到极显著水平)。这在一定程度上说明从最小 20 m 坡长尺度的 4 号径流单元到最大 126 m 坡长尺度的 7 号全坡面

径流单元,尺度间径流传递机制均是比较理想的平衡传输机制。散点分布结果表明:各点位比较均匀地分布在直线两侧,这说明降雨场次的差异性对各个尺度之间的径流传递关系影响较小,换言之,在不同的降水情况下,均存在着大致相同比例的径流深。方程的斜率结果表明:随尺度增加,斜率越小,表明径流的传递能力随尺度的增加有降低的趋势。

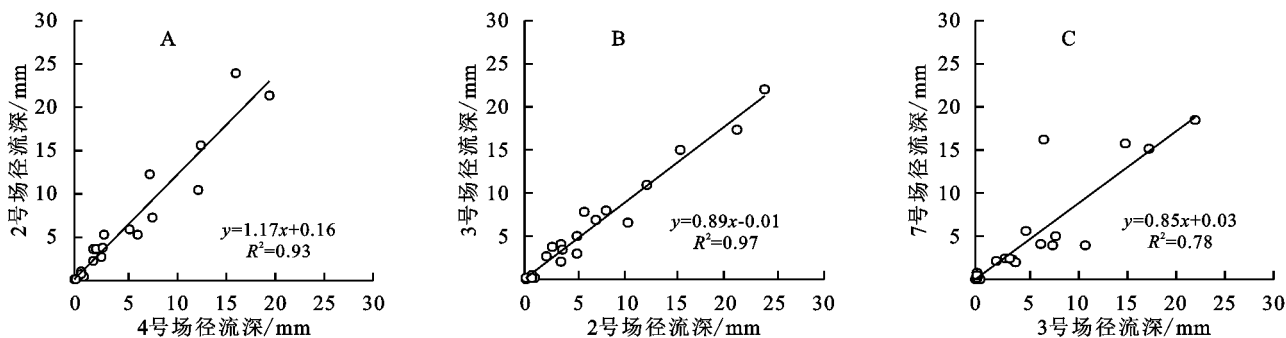


图 4 不同尺度径流传递关系

Fig. 4 Transmission relationship of runoff at different scales

2.2.2 次降雨事件下相邻尺度坡面泥沙传递关系

通过对比次降雨事件下不同尺度坡面输沙量的关系,进行侵蚀模数尺度传递的线性分析(图 5)。拟合结果表明:各尺度径流单元的输沙量关系存在差异,20 m 坡长尺度的 4 号径流单元与 40 m 坡长的 2 号径流单元及 60 m 坡长尺度的 3 号径流单元与 126 m 坡长尺度的 7 号径流单元拟合直线的回归系数 R^2 值较好(分别为 0.73, 0.75),说明尺度间泥沙的传递机制是比较理想的平衡传递机制,40 m 坡长条件下 2 号径

流单元直线的 R^2 值较低(0.39),尺度间泥沙的传递机制为非平衡传递机制。

散点分布结果表明:侵蚀模数值较小时各点比较均匀地沿直线两侧分布,侵蚀模数值越大,点位越分散,表明各尺度间泥沙的传递关系受降雨条件的影响因素比较多。拟合方程的斜率结果表明:斜率随着研究尺度的增加呈现先减小后增大的变化规律,说明泥沙的传递能力随着尺度的增大呈先降低后增加的趋势。

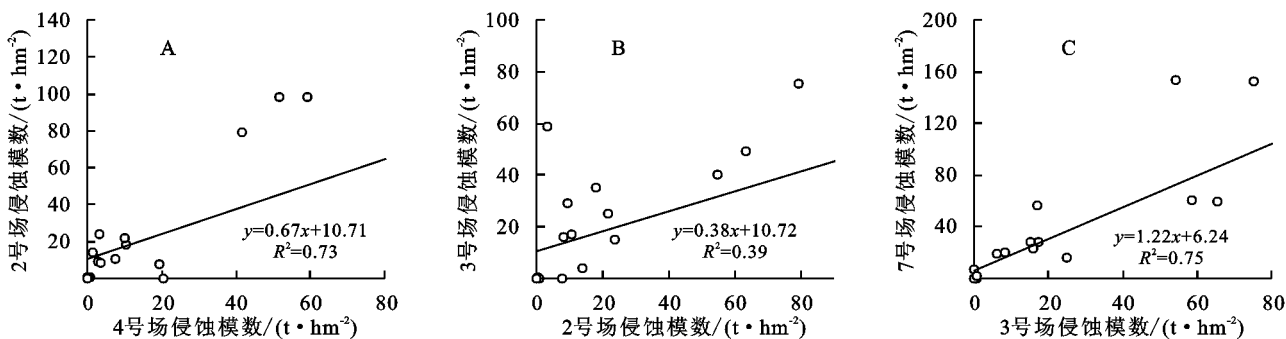


图 5 不同尺度侵蚀模数传递关系

Fig. 5 Transmission relationship of area-specific sediment yield at different scales

2.3 坡面水沙尺度传递效率

2.3.1 水沙尺度效率传递影响因素相关系数矩阵

为探究水沙尺度效应的成因,本研究通过对 1963—1966 年同一场降雨下两相邻坡长尺度径流场降雨径流泥沙资料进行相关性系数矩阵分析,探求降雨特征因素、径流深、侵蚀模数对径流泥沙尺度传递效率以及径流尺度传递效率和水沙尺度传递效率之间的关系,结果见表 3—5。从表 3 可以看出,与 δ_H 相关性

较密切的因素是 H_4 ($R = -0.37$) 和 H_2 ($R = 0.35$); 与 δ_{SSY} 相关性较密切的因素是 H_2 ($R = 0.45$) 和 P ($R = 0.39$)。从表 4 可以看出, I 与 δ_H 之间存在非常密切且显著的负相关关系 ($R = -0.74$); 对 δ_{SSY} 影响最大的因素是 f_2 , 两者呈负相关 ($R = -0.32$)。从表 5 可以看出,与 δ_H 相关性最密切和显著的因素是 I ($R = 0.74$); H_3 与 δ_{SSY} 的关系更为密切且显著 ($R = 0.84$)。另外 δ_H 与 δ_{SSY} 之间存在显著的相关性 ($R =$

0.82),说明径流和泥沙的传递密切相关。综上所述,径流深与径流传递效率相关性较为密切,特别是在小尺度地区,随着径流深的增大,径流的传递效率越高,平均雨强在大尺度地区与径流传递效率的相关性比较密切。影响泥沙传递效率的因素比较复杂。在小尺度地区,下一层级的径流深和降雨量与泥沙传递效率的相关性较为密切,中等尺度地区,雨后表层土壤含水率与泥沙传递效率的相关性较为密切,随尺度延伸,大尺度地区,上一层级径流深与泥沙传递效率相关性更为密切且显著。

表 3 4 号场与 2 号场水沙尺度效率传递影响因素相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of influencing factors of flow-sediment scale efficiency transfer Field No. 4 to Field No. 2											
因素	P	T	I	f_1	f_2	H_4	H_2	SSY_4	SSY_2	δ_H	δ_{SSY}
P	1										
T	0.53 *	1									
I	0.16	0.43	1								
f_1	-0.29	-0.34	-0.087	1							
f_2	0.24	0.066	0.34	0.37	1						
H_4	0.56 *	-0.046	0.39	-0.038	-0.048	1					
H_2	0.51 *	-0.049	0.37	0.023	0.044	0.96 ***	1				
SSY_4	0.74 ***	0.11	0.16	0.079	0.042	0.84 ***	0.82 ***	1			
SSY_2	0.57 **	-0.036	0.32	-0.057	-0.1	0.94 ***	0.94 ***	0.85 ***	1		
δ_H	-0.22	-0.096	-0.17	0.32	0.21	-0.37	0.35	-0.14	-0.092	1	
δ_{SSY}	0.39	-0.28	-0.084	0.029	0.067	0.32	0.45 *	-0.33	-0.32	0.39	1

注: * 表示变量间显著性水平, * 越多表示两者相关性越明显,下表同。

表 4 2 号场与 3 号场水沙尺度效率传递影响因素相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of influencing factors of flow-sediment scale efficiency transfer Field No. 2 to Field No. 3											
因素	P	T	I	f_1	f_2	H_2	H_3	SSY_2	SSY_3	δ_H	δ_{SSY}
P	1										
T	0.51 *	1									
I	0.017	0.55 *	1								
f_1	-0.20	-0.28	-0.026	1							
f_2	0.28	0.071	0.23	0.42	1						
H_2	0.47 *	-0.11	0.28	0.12	0.1	1					
H_3	0.43	-0.16	0.33	0.15	0.22	0.98 ***	1				
SSY_2	0.53 *	-0.086	0.23	0.025	-0.045	0.94 ***	0.89 ***	1			
SSY_3	0.31	-0.23	0.34	-0.044	-0.038	0.5 *	0.49 *	0.58 **	1		
δ_H	0.17	-0.38	-0.74 ***	-0.3	0.28	-0.33	-0.38	0.43	0.49	1	
δ_{SSY}	-0.12	-0.16	0.28	-0.029	-0.32	-0.077	-0.076	-0.15	-0.26	-0.064	1

表 5 3 号场与 7 号场水沙尺度效率传递影响因素相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of influencing factors of flow-sediment scale efficiency transfer Field No. 3 to Field No. 7											
因素	P	T	I	f_1	f_2	H_3	H_7	SSY_3	SSY_7	δ_H	δ_{SSY}
P	1										
T	0.56 ***	1									
I	0.18	-0.38	1								
f_1	-0.19	-0.36	-0.001	1							
f_2	0.18	0.062	0.14	0.19	1						
H_3	0.54 **	-0.046	0.45 *	0.072	0.04	1					
H_7	0.72 ***	0.02	0.45 *	0.15	0.14	0.85 ***	1				
SSY_3	0.57	-0.034	0.4	0.081	-0.12	0.93 ***	0.82 ***	1			
SSY_7	0.74 ***	0.024	0.47 *	0.14	0.094	0.86 ***	0.99 ***	0.86 ***	1		
δ_H	-0.4	-0.17	0.74 ***	-0.18	-0.21	-0.41	0.45 *	-0.008	-0.12	1	
δ_{SSY}	0.29	-0.15	-0.2	0.34	-0.36	0.84 ***	-0.12	-0.17	-0.13	0.82 ***	1

2.3.2 构建径流泥沙的多尺度传递效率函数 拟合不同尺度坡面传递效率 δ 与影响因素 $P, T, I, f_1, f_2, H, SSY$ 之间的函数方程。由表 6 可知:影响 4 号场到 2 号场的径流传递效率的因素中上级径流深 > 下级径流深,影响 4 号场到 2 号场的泥沙传递效率的因素中下级的径流深 > 侵蚀模数 > 降雨量;影响 2 号场到 3 号场的径流传递效率的因素中平均雨强 > 下级侵蚀模

数 > 上级侵蚀模数;影响 2 号场到 3 号场的泥沙传递效率的因素中平均雨强 > 下级侵蚀模数;影响 3 号场到 7 号场的径流传递效率的因素中平均雨强 > 下级径流深 > 上级径流深,影响 3 号场到 7 号场泥沙传递效率中上级径流深 > 雨后表层土壤含水率 > 雨前表层土壤含水率。综上所述,不同参数在构建径流泥沙的多尺度传递效率函数的有效性不同。

表 6 多尺度传递效率函数

Table 6 Multiscale transfer efficiency function

径流场传递	函数方程式	R^2	P
4 号场—2 号场	$\delta_H = -0.137X_{H4} + 0.094X_{H2} + 1.547$	0.47	0.08
	$\delta_{SSY} = 0.456X_P - 0.035X_T + 1.005X_{H2} - 0.151X_{SSY4} - 0.091X_{SSY2} + 7.091$	0.97	0.01
2 号场—3 号场	$\delta_H = -4.662X_I - 0.021X_{SSY2} + 0.034X_{SSY3} + 3.228$	0.61	0.07
	$\delta_{SSY} = 325.130X_I - 2.549X_{SSY3} + 24.084$	0.22	0.12
3 号场—7 号场	$\delta_H = -0.135X_P + 0.036X_T + 8.941X_I - 0.685X_{H3} + 0.948X_{H7} + 0.072X_{SSY3} - 0.073X_{SSY7}$	0.68	0.18
	$\delta_{SSY} = 0.091X_P - 0.012X_T + 0.106X_{f1} - 0.158X_{f2} + 0.205X_{H3} - 0.047X_{SSY3} + 2.898$	0.84	0.01

3 讨论

本研究通过拟合次降雨事件下相邻坡长尺度间的径流深关系,发现不同尺度间径流关系拟合度较高(R^2 均大于 0.7)。相邻坡长尺度间的径流量呈线性关系,因此坡面尺度间径流传递是较为理想的平衡传输机制。产生此结果的原因是坡面尺度下径流几乎全部到达径流单元底部,具有空间上的连续性,即径流是按等比例进行传递。本研究结果中等尺度 40 m 坡长与 60 m 坡长条件下泥沙关系 R^2 拟合度较低,小和大尺度条件下泥沙关系 R^2 拟合度较好(R^2 均大于 0.7)。因此中等尺度泥沙的尺度间传递机制为非平衡传递机制,小和大尺度间泥沙的传递机制是比较理想的平衡传递机制。上述现象的出现主要是土壤的复杂性和地表的粗糙度不同导致了尺度传递机制的无规则性。由于驱动形式的不同,坡面系统不同地貌单元的侵蚀强度差异较大,导致了土壤剥离、搬运和沉积三要素在作用形式上的时空差异性,从而产生了坡面尺度输沙量过程中的非线性效应^[17]。上述结果表明,坡面侵蚀过程中尺度的作用依赖于侵蚀形态的演变特征及其侵蚀的程度,西班牙学者 de Vente 等^[18]的研究中发现 50 km² 尺度内侵蚀模数随尺度变化没有显著的规律,研究表明泥沙传递规律受到水文过程和沉积过程的相互影响。本研究发现大尺度区域泥沙传递能力和径流传递能力密切相关,表 5 径流泥沙尺度传递效率相关性 $R=0.82$,说明两者关系较为密切。坡面系统不同尺度间土壤侵蚀主要受到径流量的变化影响,径流量对水流强度和流速产生直

接影响,进而影响沙粒的输移能力,影响输沙量的差异。这验证了张乐涛^[19]的研究结论,说明在资料不全的情况下,可以用径流传递量来估计输沙传递量,即对坡面系统径流过程进行调节可有效地控制泥沙的产生和输移。

此外,也有研究表明径流和泥沙传递能力受到多种影响因素的作用^[20],且控制径流和泥沙侵蚀量尺度传递的主要指标可能因不同土地利用覆被而变化,当影响因素相对统一时,径流量输沙量会随尺度延伸产生趋势性变化^[21]。降雨作为侵蚀过程的主要输入对径流泥沙的传递机制起着重要影响,降雨特征对尺度间径流泥沙传递机制的影响可能取决于地块的大小、地块的陡度以及土壤和植被覆盖的类型,且具有高入渗能力的缓坡点可能对传递机制表现出较少的波动影响。本研究发现不同降雨类型对径流小区产流产沙能力均有影响,强降雨条件下产流量和产沙量的峰值产生的时间较弱降雨条件的时间早(图 2—3)。研究表明黄土坡面结构疏松,强降雨作用下坡面在雨滴溅蚀作用下可形成高含沙水流,由于水流能耗降低,坡面系统径流侵蚀输沙的搬运能力显著增强,因此,在强降雨条件下侵蚀更容易产生且能力更显著。Liu 等^[22]试图通过建立径流土壤流失量回归模型解释相似的降雨特征在不同地块产生不同的径流量以及侵蚀量的现象,提出这种现象可能与降雨强度的波动有关。本研究发现随尺度延伸,径流传递效率的主要影响因素由上下层级径流深转变为平均雨强,泥沙传递效率的主要影响因素由下一层级径流深以及降雨量转换为雨后表层土壤含水率然后转变成上

一层级径流深(表3—5)。这是由于坡面系统不同尺度下径流输沙量的主要驱动因素不同。坡面径流直接影响径流的传递效率,降水是径流变化最直接的影响因素,降雨强度通过影响坡面径流的形成从而影响径流的传递效率。泥沙传递与径流传递过程相比所受影响因素更加复杂。土壤侵蚀问题已有大量的研究^[23],根据坡面流动,坡面侵蚀方式主要从面蚀到细沟侵蚀。本研究中全坡面7号径流场在长历时典型降雨条件下形成大量泥沙物源从而导致产沙峰值 38.9 t/hm^2 (图3C)。这是由于较小坡面尺度土壤侵蚀以面蚀为主,随着坡面尺度的增加,细沟侵蚀占的比重增加,坡面径流汇集后甚至有重力侵蚀发生。尽管对这种规律的认识比较统一,但由于问题的复杂性,侵蚀类型改变的阈值仍需要做深入细致的研究。因此,需要开展更多的野外工作来收集更多的数据,建立尺度传递模型,并比较不同影响因素下径流和土壤侵蚀尺度传递的变化关系。

4 结论与展望

(1) 通过降雨-径流以及降雨-产沙过程线可以看出径流和产沙均受降雨过程的影响,且产沙能力比产流能力受降雨过程影响更为敏感。产流能力随尺度的延伸呈现先增大后减小的变化趋势且在长历时弱降雨中径流变化较为显著。产沙能力受降雨历时的影响,短历时条件下在 $20\sim 60\text{ m}$ 范围内呈现先增大后减小的变化,长历时条件下产沙能力随尺度增大而增大。平均雨强会影响产流产沙时间,在强降雨时产流产沙时间与尺度传递的关系较小,在弱降雨时中等尺度先产流产沙。

(2) 通过相邻尺度间坡面径流深和侵蚀模数的相关性散点图可以发现,径流的尺度传递是较为理想的平衡传递机制,且随尺度增大,径流的传递能力呈减小趋势,而最小的4号径流单元和最大的7号全坡面径流单元尺度间泥沙的传递机制是比较理想的平衡传递机制,且随尺度增大,泥沙的传递能力呈先增大后减小的变化趋势。中等尺度 40 m 坡长条件下2号径流单元尺度间泥沙的传递机制为非平衡传递机制。

(3) 不同尺度坡面水沙传递效率的影响因素不同。小尺度层级间径流传递效率的主要影响因素为上下层级径流深,随尺度增大,主要影响因素转变为平均雨强;小尺度层级间泥沙传递效率的主要影响因素为下一层级径流深以及降雨量,中等尺度层级间主要影响因素为雨后表层土壤含水率,随尺度增大,主

要影响因素为上一层级径流深。

为进一步挖掘小流域系统径流泥沙尺度传递,进行尺度转换,本研究还需要结合新的野外试验观测数据进行进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Joel A, Messing I, Seguel O, et al. Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes [J]. *Hydrological Processes*, 2002,16(7):1467-1478.
- [2] Sadeghi S H R, Seghaleh M B, Rangavar A S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed[J]. *Catena*, 2013,102:55-61.
- [3] Wainwright J, Parsons A J, Abrahams A D. Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: Case studies from Arizona and New Mexico[J]. *Hydrological Processes*, 2000,14(16/17):2921-2943.
- [4] Lin H, Bouma J, Pachepsky Y, et al. Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology[J]. *Water Resources Research*, 2006,42(5):W05301.
- [5] 张林红.小流域淤地坝系溃坝洪水特征与安全评价研究[D].西安:西安理工大学,2013.
Zhang L H. Study on Characteristics of Dam Break Flood and Safety Evaluation Assessment in Small Watershed[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013.
- [6] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].*农业工程学报*, 2015, 31(24):120-126.
Wang L L, Yao W Y, Wang W L, et al. Sediment transport capacity and flow-sediment relationship in different topographical units of different spatial scales in hilly loess region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(24):120-126.
- [7] 张乐涛,李占斌,王彬彬.坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J].*农业工程学报*, 2015, 31(20): 124-131.
Zhang L T, Li Z B, Wang S S. Impact of runoff regimes on sediment yield and sediment flow behavior at slope scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(20):124-131.
- [8] 闫云霞,许炯心.黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探[J].*中国科学: D辑 地球科学*, 2006,36(8):767-776.
Yan Y X, Xu J X. Preliminary study on scale effect of erosion and sediment yield in Loess Plateau[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2006,36(8):767-776.
- [9] 方海燕,蔡强国,李秋艳.产沙模数与流域面积关系研究进展[J].*地理科学进展*, 2008,27(6):63-69.

- Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. A review of the relationship between specific sediment yield and drainage area [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(6): 63-69.
- [10] 王玲玲, 姚文艺, 王文龙, 等. 黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J]. *水利学报*, 2013, 44(11): 1347-1351.
- Wang L L, Yao W Y, Wang W L, et al. Characteristics of soil erosion and sediment yield of hilly-gully system at different temporal scale in the loess region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1347-1351.
- [11] 韩晓燕, 钱鞠, 王磊, 等. 黄土高原土壤侵蚀(水蚀)多尺度过程与水土保持研究进展[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1487-1498.
- Han X Y, Qian J, Wang L, et al. Progress in studying multi-scale process of soil erosion(water erosion) and soil conservation in the Loess Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1487-1498.
- [12] Zhou Y W, Li Z X, Wang T W, et al. Divergent hydrological responses to intensive production under different rainfall regimes: Evidence from long-term field observations [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128918.
- [13] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 733-752.
- [14] 王成韬. 黄土高原小流域产流及产沙过程无量纲模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- Wang C T. Study on the Dimensionless Models of Watershed Runoff and Sedimentation on the Loess Plateau [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006.
- [15] 颜明, 郑明国, 舒畅, 等. 泾河流域径流-泥沙的尺度效应研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 184-188, 194.
- Yan M, Zheng M G, Shu C, et al. A study on scale effects of runoff and sediment in Jinghe River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(6): 184-188, 194.
- [16] 潘雅文, 马文龙, 潘庆宾, 等. 流域侵蚀输沙空间尺度效应及其影响因素研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 88-97, 105.
- Pan Y W, Ma W L, Pan Q B, et al. Review of the scale effects of soil erosion and sediment delivery and their influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 88-97, 105.
- [17] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 1989, 26(2): 109-116.
- Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(2): 109-116.
- [18] de Vente J, Poesen J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 71(1/2): 95-125.
- [19] 张乐涛. 基于侵蚀能量的径流输沙尺度效应研究: 以黄土高原丘陵沟壑区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- Zhang L T. Spatial Scale Effects on Erosive Energy Based Water Flow Driven Sediment Delivery on the Hilly Loess Region of the Chinese Loess Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [20] Gomi T, Sidle R C, Miyata S, et al. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(8): W08411.
- [21] 张晓明, 曹文洪, 武思宏, 等. 泥沙输移比尺度依存及分形特征[J]. *水利学报*, 2013, 44(10): 1225-1232.
- Zhang X M, Cao W H, Wu S H, et al. Dependence of sediment delivery ratio on scale and its fractal characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(10): 1225-1232.
- [22] Liu J B, Liang Y, Gao G Y, et al. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127494.
- [23] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(II): 土壤侵蚀[J]. *力学进展*, 2004, 34(4): 493-506.
- Liu Q Q, Li J C, Chen L, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (II): Soil erosion[J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 493-506.