

# 多时间尺度小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应

梁 越<sup>1,2</sup>, 秦 伟<sup>1,2\*</sup>, 张 勤<sup>1,2</sup>, 丁 琳<sup>1,2</sup>, 许海超<sup>1,2</sup>, 石晨雨<sup>1,2</sup>, 安乐平<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 2. 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 黄河水土保持天水治理监督局, 天水 741000)

**摘 要:** 为阐明多时间尺度小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应机制, 该研究基于吕二沟流域 1982—2020 年逐日降雨、水沙实测资料和土地利用/覆被数据, 综合运用 K-均值聚类法、多元回归分析等方法, 从年际和年内月际 2 个时间尺度对比分析了不同土地利用/覆被格局下的流域侵蚀产沙变化及其与泥沙连通性指数的关系。结果表明: 1) 1982—2020 年间, 吕二沟流域由耕地为主体向农林草复合结构转变、泥沙连通性指数显著下降, 可将整个研究期划分为 1982—1985 年、1986—1990 年、1991—2000 年和 2001—2020 年共 4 个阶段, 分别对应土地利用/覆被格局 I、II、III 和 IV。2) 随着以林地增加为主的土地利用/覆被变化, 流域产流、产沙能力减弱。相较土地利用/覆被格局 I, 土地利用/覆被格局 IV 的年均径流深显著降低; 后期土地利用/覆被格局 (III 和 IV) 下的汛期月产流产沙能力显著小于前期 (土地利用/覆被格局 I)。3) 基于月降雨量、月最大日降雨量和月侵蚀性降雨日数 3 个降雨指标, 可将研究期内的汛期月降雨划分为 4 种类型: 小雨量、弱侵蚀性的 A 型, 中雨量、弱侵蚀性的 B 型, 大雨量、中侵蚀性的 C 型, 大雨量、强侵蚀性的 D 型; 在大雨量中侵蚀性的 C 型降雨下, 不同土地利用/覆被格局间的月际径流深和产沙模数均不存在显著差异 ( $P>0.05$ )。年际和月际尺度下, 小流域产沙模数均与泥沙连通性指数呈指数递增关系, 但 C 雨型下的关系减弱。研究为干旱半干旱区流域土地利用/覆被格局优化配置和功能提升提供科学依据。

**关键词:** 土壤; 侵蚀; 泥沙; 土地利用/覆被格局; 小流域; 连通性指数; 降雨

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301056

中图分类号: S157.1; U412.14

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0155-12

梁越, 秦伟, 张勤, 等. 多时间尺度小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 155-166. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301056 http://www.tcsae.org

LIANG Yue, QIN Wei, ZHANG Qin, et al. Response of sediment yield under different temporal scales to land use/cover pattern changes in typical watershed of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 155-166. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301056 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

流域是水文响应和水土流失防治的基本单元<sup>[1-2]</sup>。以植被为主体的土地利用/覆被是影响流域侵蚀产沙强度与过程的重要因素, 流域内林草植被等土地利用斑块的类型、数量、结构及其分布格局等, 都会改变下垫面条件、水文特性和水沙关系<sup>[3-4]</sup>, 进而影响流域侵蚀产沙<sup>[5-7]</sup>。长期以来, 学者们探索了流域侵蚀产沙对植被覆盖数量变化的响应与定量关系, 但限于流域内植被等地表覆被与地形对土壤侵蚀和泥沙产输的复杂耦合影响, 土地利用/覆被格局的流域侵蚀产沙影响机制与定量作用尚不明确。中国黄土高原、欧洲地中海等干旱半干旱地区普遍面临着水土资源稀缺的客观现状与流域阻蚀减沙的现实需求, 如何优化配置流域内的林草植

被等土地利用格局, 以便在相同水土资源消耗的约束下更大发挥其水土保持功能, 成为生态、地理等学科领域的前沿热点。

植被等土地利用/覆被格局是一定空间范围内不同大小、形状的若干景观单元的排列与配置<sup>[6]</sup>。由于流域尺度地形地貌和土地利用结构的分布复杂性, 针对坡面尺度的土地利用/覆被格局定性描述方式很难适用。为此, 学者们尝试通过景观格局指数 (包括形状、连接性、多样性、边界/斑块密度等) 来表征流域的植被等土地利用/覆被格局, 并探索侵蚀产沙对其的变化响应关系<sup>[8]</sup>。现有相关研究发现, 在黄河中游河龙区间的中大流域, 土地利用斑块的连结度、聚集度、丰富度、平均面积等可被视为影响流域侵蚀产沙的主导格局因子<sup>[9]</sup>; 在中国北方风水蚀交错区的内蒙古鄂尔多斯市典型中尺度流域的西柳沟, 土地利用的最大斑块指数 (largest patch index)、香农多样性指数 (Shannon's diversity index) 与流域侵蚀产沙呈显著正相关关系, 而其蔓延度指数 (contagion index)、聚集度指数 (aggregation index) 和斑块结合度指数 (Patch cohesion index) 的增大则可发挥阻蚀减沙作用<sup>[10]</sup>。由于常规景观指数立足生物过程, 较少关注流域土壤侵蚀和水沙产输过程, 因此对流域侵蚀产沙过程与变化的解释

收稿日期: 2023-01-11 修订日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原小流域植被格局对侵蚀产沙影响的定量表征与耦合关系” (41877073); 国家自然科学基金项目“黄河流域水土保持率变化机制及阈值” (U2243212)

作者简介: 梁越, 博士, 工程师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。

Email: ly8868130@163.com

\*通信作者: 秦伟, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: qinwei\_office@sina.com

能力不足,限制了其在土地利用/覆被格局与流域侵蚀产沙关系研究中的深化应用。通过考虑植被等土地利用/覆被与地形叠置格局的流域侵蚀产沙过程耦合影响,学者们提出了泥沙连通性指数<sup>[11]</sup>、方向渗透性指数(directional leakiness index, DLI)<sup>[12]</sup>、景观空间负荷对比指数(location weighted landscape contrast index, LCI)<sup>[13]</sup>、平均汇流路径长度指数(mean flow length index, MFLI)<sup>[14]</sup>等主要面向侵蚀产沙影响研究的景观格局表征指标,并辨析了其于流域侵蚀产沙的协同关系。其中,泥沙连通性指数最为常见,并先后被进行了不同程度地改进,越来越多地用于评价不同空间尺度的侵蚀产沙时空变化,取得了良好效果<sup>[15-17]</sup>。纵观已有报道,主要涉及基于侵蚀产沙模型模拟<sup>[15-16]</sup>和基于实测水沙统计分析<sup>[10,18]</sup>的2类研究。其中,模型模拟解决了多情景连续水沙观测资料在许多地区难以获取的问题,但却限于所用模型在参数和算法上未充分考虑植被等土地利用/覆被与地形叠置格局的流域侵蚀产沙影响,加之缺乏景观格局的有效表征等问题,依然不能明晰流域侵蚀产沙与土地利用/覆被格局的定量关系;统计分析则主要受制于缺乏流域侵蚀输沙实测资料以及足够的典型土地利用格局情景等挑战,空间尺度上更多集中于设有水文测站的大中流域,尤其在水土流失严重且植被等土地利用/覆被格局变化剧烈的黄土高原地区,针对50 km<sup>2</sup>以下小流域的多时间尺度系统研究还较为缺乏。此外,以往研究在时间尺度上主要关注多年和年际变化,且多集中于某一时间尺度,而流域多时间尺度侵蚀产沙的变化及其对土地利用/覆被格局响应规律的系统研究还鲜见报道。例如,基于黄河中游河口-龙门区间多个水文站控制流域的土地利用和径流泥沙数据,学者们探讨了流域多年平均水沙变量对土地利用/覆被变化的响应及其时空格局<sup>[9,19]</sup>;在黄土高原中小流域,通过探索景观指数与流域年尺度水沙变量的关系,研究阐明了下垫面景观格局变化对流域年尺度侵蚀产沙的作用机理<sup>[10,20]</sup>;近年来,有学者深入分析了事件尺度水沙特性与泥沙连通性指数的关系,发现泥沙连通性指数是影响洪水事件水文过程的重要因素<sup>[18]</sup>。

针对上述背景,为探索多时间尺度下流域侵蚀产沙特征变化及其对土地利用/覆被格局的响应机理,本研究选取黄土高原典型小流域甘肃省天水市吕二沟,基于流域1982—2020年逐日降雨、径流、输沙实测资料和多时相土地利用/覆被空间分布数据,采用泥沙连通性指数表征流域土地利用/覆被格局影响,从年际和年内月际2个时间尺度,对比分析不同土地利用/覆被格局下的流域侵蚀产沙变化及其与泥沙连通性指数的关系,尝试建立两者的协同关系,从而阐明不同降雨条件下小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应机制,以期于干旱半干旱地区的小流域景观格局与水土保持措施优化配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

吕二沟流域地处甘肃省天水市,是黄河最大一级支流渭河的二级支沟,属黄土丘陵沟壑区第三副区,介于

105°41'~105°45'E, 34°30'~34°35'N(图1)。该流域呈南北流向,主沟道长5.8 km,总面积12.01 km<sup>2</sup>,流域形状系数0.25,沟道平均比降7.24%,相对高差532 m。流域内沟壑纵横,沟壑密度达3.82 km/km<sup>2</sup>,溯源侵蚀较为严重。流域地处温带半干旱大陆性气候区,多年平均气温在1℃左右,多年平均降水517 mm(1982—2020年),85%以上的降雨集中在6—9月,且多为暴雨。流域内的土壤以黄土质灰褐土为主。流域上游耕地较少、植被覆盖较好,下游耕地分布较广、植被覆盖度低。主要农作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等,林地多为刺槐(*Robinia pseudosacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,草本植物主要包括白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等。自1953年开始,开始实施水土保持重点工程,经过几十年治理,截至2020年,流域林草植被覆盖提高至62%以上,耕地面积占比减少为36%,水土流失得到有效治理,形成以植被措施为主、沟道工程为辅的水土保持措施体系。同时,由于建设时间较久,多数沟道工程措施已在21世纪初失去直接拦沙能力,且自1980年之后流域总体上没有新修建的淤地坝。

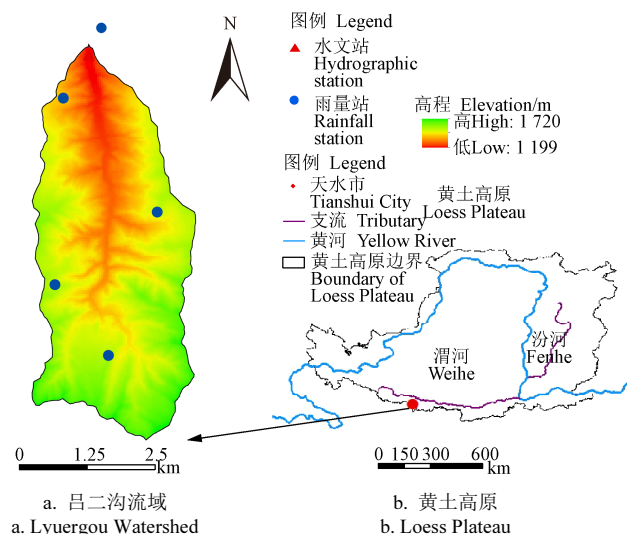


图1 研究区地理位置示意图  
Fig.1 Sketch of geographical location of study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

采用黄河水利委员会天水水土保持科学试验站定位观测的吕二沟小流域1982—2020年逐日降雨、径流和泥沙作为基础数据。其中,降雨数据由流域内外布设的5个雨量站实测取得,径流和泥沙数据由流域沟口布设的水文站测定(图1)。分析中使用的月尺度和年尺度降雨、径流、输沙数据,则是由日尺度数据逐月、逐年加和获得。

为分析降雨和水沙特征,选用并计算如下特征指标:

1) 降雨特征指标:降雨量( $P_r$ , mm);侵蚀性降雨量( $P_{12}$ , mm),即日降雨量不小于12 mm的降雨量总

和; 侵蚀性降雨日数 ( $N_{12}$ ), 即日降雨量不小于 12 mm 的天数<sup>[21]</sup>; 年/月最大日降雨量 ( $P_m$ , mm), 即当年/月最大的日降雨量。以上降雨指标均针对年、月尺度, 基于逐日降雨资料统计计算确定。

2) 水沙特征指标: 径流深 ( $H$ , mm), 即流域单位面积的径流量; 径流系数 ( $R_C$ , %), 即单位降雨量的流域径流深, 反映流域降雨产流能力; 产沙模数 ( $S_{SY}$ , t/km<sup>2</sup>), 即流域单位面积的产沙量; 产沙系数 ( $C_s$ , t/(km<sup>2</sup>·mm)), 即单位降雨量的流域产沙模数, 表征流域降雨产沙能力<sup>[19,22]</sup>。

本研究根据吕二沟流域不同年份 (1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年) 的土地利用类型, 分析流域土地利用时空变化。土地利用类型分布数据采用地球大数据科学工程数据共享服务系统 (<https://data.casearth.cn/>) 提供的 1980—2020 全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0。数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 是由 5 m 间距等高线的 1:1 万数字地形图通过 ArcGIS 的 3D 分析功能生成。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 泥沙连通性指数计算

将地貌单元的水沙输移分解为上方水沙向其汇集和该单元向最近沉积区输移 2 个过程, 利用坡度、植被盖度因子、上坡汇流面积、下坡汇流长度等因子计算上述 2 个过程的输出概率, 提出了连通性指数 ( $I_C$ )<sup>[11]</sup>。 $I_C$  集中反映了流域内地形与土地利用/覆被的叠置格局对侵蚀产沙过程的耦合影响。相较流域内土地利用/覆被斑块连接性、多样性、密度、形状等常规景观格局指数,  $I_C$  对一定地形和下垫面条件下流域潜在水沙输移能力的表征作用更佳<sup>[8]</sup>。

$I_C$  采用 BORSELLI 等<sup>[11]</sup>提出的算法计算:

$$I_C = \lg \frac{D_{up}}{D_{dn}} \quad (1)$$

$$D_{up} = \bar{W} \cdot \bar{S} \sqrt{A} \quad (2)$$

$$D_{dn} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{w_i s_i} \quad (3)$$

式中  $D_{up}$  和  $D_{dn}$  分别为泥沙连通性指数的上坡分量和下坡分量;  $\bar{W}$  为上方汇水区的平均权重因子;  $\bar{S}$  为上方汇水区的平均坡降, m/m;  $A$  为上方汇水区面积, m<sup>2</sup>;  $d_i$  为下坡路径上第  $i$  个栅格单元的边长, m;  $w_i$  为下坡路径内第  $i$  个栅格单元的权重因子, 本研究采用 RUSLE 中的  $C$  因子作为权重因子<sup>[17]</sup>, 具体参考针对相同研究流域的研究<sup>[23]</sup>取值;  $s_i$  为下坡路径内第  $i$  个栅格单元的平均坡降, m/m;  $n$  为第  $i$  个栅格单元到达最近河道或沉积区所经过所有栅格单元总数。

### 2.2.2 数据处理

第一步, 根据不同年份 (1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年) 的土地利用类型组成与分布, 分析流域土地利用变化过程, 选取典型土地利用/覆被格局情景。

第二步, 采用 M-K 趋势检验法探明年降雨、径流和

输沙的变化趋势, 分析流域年、月尺度的降雨、径流和输沙变化, 并以月降雨量、最大日降雨量、侵蚀性降雨日数为特征指标, 采用 K-均值聚类法划分月降雨类型。

第三步, 在 ArcGIS 软件中, 基于流域 DEM 提取坡度、上方汇流面积、下坡汇流长度等地形指标, 并结合不同时期土地利用, 采用空间分析模块计算获得流域  $I_C$  分布, 并通过配对样本  $t$  检验分析不同时期流域  $I_C$  的变化差异。

第四步, 通过单因素方差分析和 Tukey 检验, 评价不同典型土地利用/覆被格局下的径流深 ( $H$ , mm)、径流系数 ( $R_C$ , %)、产沙模数 ( $S_{SY}$ , t/km<sup>2</sup>) 和产沙系数 ( $C_s$ , t/(km<sup>2</sup>·mm)) 等径流、输沙特征指标的变化差异, 并采用多元回归分析建立年、月尺度下径流输沙特征指标与降雨特征指标、 $I_C$  的协同关系。所有统计分析均通过 SPSS 完成, 并利用 R 绘制统计分析图。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域土地利用/覆被及其泥沙连通性变化

#### 3.1.1 流域土地利用/覆被变化过程

由图 2 和表 1 可知, 1985—2020 年间, 吕二沟流域土地利用组成与分布发生了较大变化, 其中尤以 2000 年以前变化最为明显。1985 年时, 耕地是流域内分布最广的土地利用类型, 面积占比达 71.2%, 且分布较为集中, 而林地和草地分布较少, 主要散布于流域上游海拔较高的梁卯地带; 1990 年之后, 由于开展了 20 世纪 80 年代中期启动的水土流失综合治理以及 20 世纪 90 年代末期启动的退耕还林/草工程, 流域内的林草植被逐渐增加, 耕地大幅减少, 到 2000 年时, 流域内的耕地占比降至 40.4%, 林地占比则由 1985 年的 23.1% 增至 36.7%, 主要分布于流域中上游, 草地占比则由 1985 年的 4.90% 增至 21.9%, 并在整个流域呈破碎化散步。2000 年之后, 林草仍有小幅增加, 但各类土地利用均总体较为稳定。整个过程中, 建设用地略有增加, 但面积占比始终很小 (0.8%~1.70%), 且主要分布于流域下游的沟道附近。

总体来讲, 20 世纪 80 年代中期至今, 吕二沟流域的土地利用结构从耕地为主体向农林草复合结构转变, 2000 年以前土地利用变化剧烈, 2000 年后基本趋于平稳。为此, 将整个具有水沙观测资料的研究期划分为 1982—1985 年、1986—1990 年、1991—2000 年和 2001—2020 年 4 个阶段, 并将各阶段对应的土地利用/覆被情景分别命名为“土地利用/覆被格局 I”、“土地利用/覆被格局 II”、“土地利用/覆被格局 III”和“土地利用/覆被格局 IV”。

#### 3.1.2 流域泥沙连通性变化过程

$I_C$  主要反映地形和土地利用/覆被共同决定的流域泥沙产输能力。伴随土地利用/覆被变化, 近 40 年来, 吕二沟流域不同特征年份的  $I_C$  总体呈下降趋势 (图 3 和图 4); 根据方差分析结果, 1985—2005 年间, 受耕地减少、林草地增加的土地利用/覆被变化驱动, 流域  $I_C$  随时段推进显著降低 ( $P < 0.05$ ), 尤其是流域中下游的  $I_C$  迅速减小, 整个流域的平均  $I_C$  从 1985 年的 -2.58 降至 2005 年的

-2.97; 2005 年之后, 由于土地利用/覆被变化较小, 因此流域  $I_C$  也基本趋于稳定, 随时段推进流域  $I_C$  并无显著性变化 ( $P>0.05$ )。

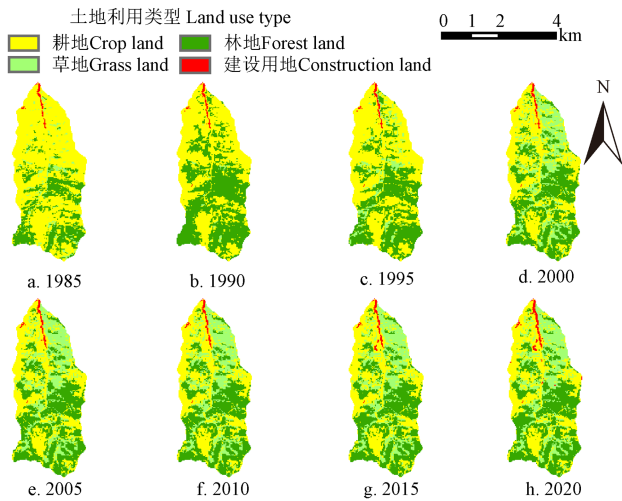
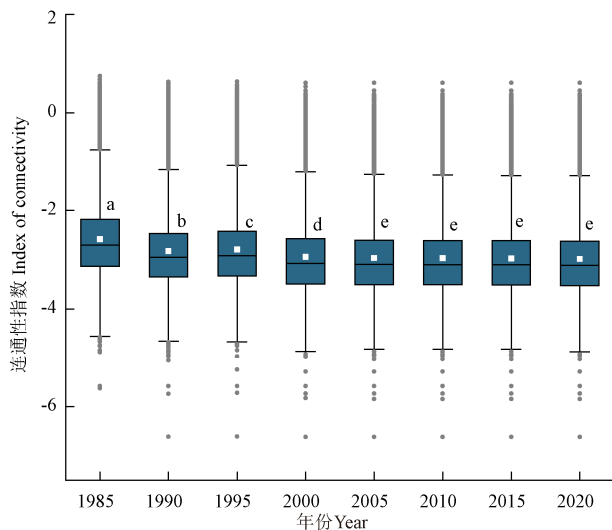


图2 吕二沟流域土地利用分布的时间演化

Fig.2 Temporal evolution of land use distribution in Lyuergou Watershed

表1 1985—2020 年吕二沟流域土地利用类型面积的时间变化  
Table 1 Temporal changes of area for land use type in Lyuergou Watershed during 1985-2020

土地利用类型 Land use type	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
耕地 Crop land	855.16	646.00	678.18	485.52	461.09	456.44	449.51	432.46
林地 Forest land	277.36	535.03	432.09	440.57	445.13	446.59	449.60	455.80
草地 Grass land	58.81	9.39	79.69	263.51	282.20	285.39	287.39	292.41
建设用地 Construction land	9.66	10.58	11.03	11.40	12.58	12.58	14.50	20.33



注: 不同字母表示不同年份均值之间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。  
Note: Different letters represent significant differences of mean among different years at 0.05 level.

图3 吕二沟流域不同年份的泥沙连通性指数变化

Fig.3 Variation of index of connectivity among different years in Lyuergou Watershed

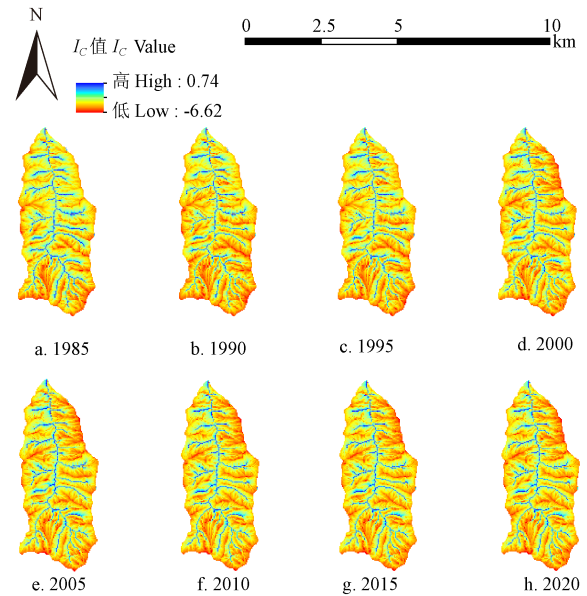


图4 1985—2020 年吕二沟流域不同年份的泥沙连通性指数 ( $I_C$ ) 分布

Fig.4 Distribution of index of connectivity ( $I_C$ ) among different years in Lyuergou Watershed during 1985-2020

### 3.2 年尺度流域降雨和水沙变化及其对土地利用/覆被格局的响应特征

#### 3.2.1 流域年尺度降雨和水沙变化

吕二沟流域 1982—2020 年的年际降雨和水沙特征指标的统计结果表明 (图 5), 平均年降雨量和年侵蚀性降雨量分别为 581.9 和 317.9 mm; 最小年降雨量和最小年侵蚀性降雨量分别为 361.8 和 139.2 mm, 均发生在 1996 年; 最大年降雨量和最大年侵蚀性降雨量分别为 950.1 和 610.1 mm, 均发生在 2003 年; 年降雨超过 800 mm 和年侵蚀性降雨超过 500 mm 的年份, 均只有 2 a, 占整个统计序列总年数的 5%。

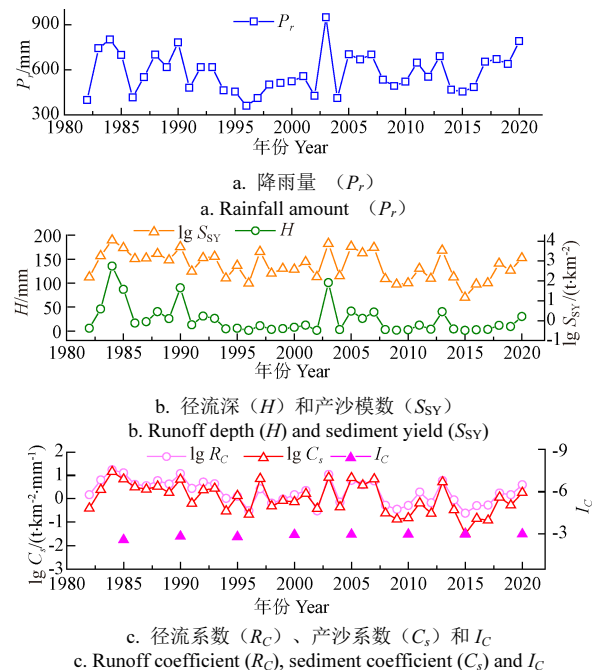


图5 1982—2020 年吕二沟流域降雨量、水沙变量和泥沙连通性指数

Fig.5 Rainfall, runoff and sediment parameters, and  $I_C$  from 1982 to 2020 in Lyuergou Watershed



由图 5 可知, 流域各年径流深介于 1.1~135.3 mm, 平均值为 23.7 mm; 年径流深超过平均值 (23.7 mm) 和 100 mm 的年份分别有 14 和 2 a, 相应占整个统计序列总年数的 36%和 5%; 年径流深小于 10 mm 的年份共有 18 a, 占整个统计序列总年数的 46%。各年径流系数介于 0.24%~16.87%, 平均为 3.44%, 径流系数大于 5%的年份仅有 5 a, 占整个统计序列总年数的 13%。

流域各年产沙模数的最小值和最大值分别为 14.6 和 11 230.8 t/km<sup>2</sup>, 年产沙模数超过 5 000 t/km<sup>2</sup> (强度侵蚀及以上)<sup>[24]</sup>的年份有 4 a, 占整个统计序列总年数的 10.3%, 对应 4 a 的总降雨量、总径流深和总产沙模数, 分别占 1982—2020 年流域降雨、径流和产沙总量的 14.3%、39.8% 和 44.4%。各年产沙系数介于 0.03~14.00 t/(km<sup>2</sup>·mm), 平均值为 2.46 t/(km<sup>2</sup>·mm), 产沙系数大于 5 t/(km<sup>2</sup>·mm) 的年份仅有 8 a, 占整个统计序列总年数的 21%。

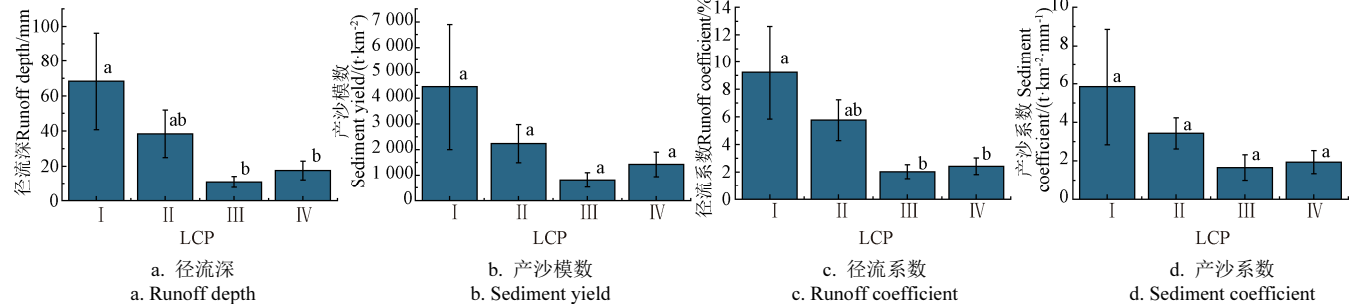
流域年径流深、径流系数、产沙模数和产沙系数的最大值均发生在 1984 年, 而最小值均发生在 2015 年, 整个研究期内的变异系数分别达 1.3、1.1、1.4 和 1.3, 均远大于年降雨量 (0.2) 和年侵蚀性降雨量 (0.3) 的变异系数, 表明流域年际水沙的变化波动程度强于降雨, 也一定程度上反映出除气候外的其他因素 (如土地利用/覆

被格局等) 对研究期内流域水沙变化的影响。

3.2.2 流域年尺度水沙对土地利用/覆被格局的响应

吕二沟流域的年均径流深和径流系数均随土地利用/覆被变化而不断减小, 且相互间存在显著差异 ( $P<0.05$ ) (图 6)。吕二沟流域在土地利用/覆被格局 I、II、III、IV 时的年均径流深和径流系数分别为 68.5、38.4、10.8、17.5 mm 和 9.2%、5.8%、2.0%、2.4%。相较 1982—1985 年的土地利用/覆被格局 I, 在 1986—2020 年间的土地利用/覆被格局 III 和 IV 下, 流域年均径流深分别降低 84.2% 和 74.5%, 年均径流系数分别降低 78.1% 和 73.9%, 而土地利用/覆被格局 I 和 II 下径流深和径流系数之间并无显著性差异 ( $P>0.05$ ) (图 6)。

吕二沟流域在土地利用/覆被格局 I、II、III、IV 下的年均产沙模数分别为 4 448.8、2 233.2、819.4 和 1 421.0 t/km<sup>2</sup>, 年际产沙系数分别为 5.9、3.4、1.7 和 1.9 t/(km<sup>2</sup>·mm), 相较 1982—1985 年的土地利用/覆被格局 I, 在 1986—2020 年间的土地利用/覆被格局 II、III 和 IV 下, 流域年产沙模数分别降低 49.8%、81.6% 和 68.1%, 年均产沙系数分别降低 41.4%、71.6% 和 66.8%, 但不同土地利用/覆被格局之间并无显著性差异 ( $P>0.05$ )。



注: “I”、“II”、“III”、“IV” 分别指的是 1982—1985 年的“土地利用/覆被格局 I”、1986—1990 年的“土地利用/覆被格局 II”、1991—2000 年的“土地利用/覆被格局 III”、2001—2020 年的“土地利用/覆被格局 IV”; 图中不同字母代表不同土地利用/覆被格局之间存在显著差异性 ( $P<0.05$ )。  
Note: “I”, “II”, “III” and “IV” represent “land use/cover pattern” during 1982-1985, “land use/cover pattern II” during 1986-1990, “land use/cover pattern” during 1991-2000 and “land use/cover pattern” during 2001-2020; Different letters represent significant differences between different land use/cover patterns at 0.05 level.

图 6 吕二沟流域不同土地利用/覆被格局下的年际水沙特征指标变化

Fig.6 Interannual variation of runoff and sediment parameters among different land use/cover patterns (LCP) in Lyuergou Watershed

3.2.3 流域年尺度输沙与连通性指数的关系

吕二沟流域年际产沙模数和降雨指标的相关分析结果表明 (表 2), 大多数降雨指标均与年产沙模数呈现极显著正相关, 其中相关性最好的单项降雨指标是年降雨量 ( $P_r$ ), 且复合降雨指标与年产沙模数的相关性年降雨量类似。

因此, 通过非线性回归建立吕二沟流域年际产沙模数与年降雨量的定量关系, 发现年际产沙模数与年降雨量的幂函数和指数函数方程的  $R^2$  分别为 0.67 和 0.69。

鉴于流域水沙对土地利用/覆被格局存在明显的变化响应, 且受降雨影响, 故采用  $I_C$  表征流域土地利用/覆被格局变化, 并结合降雨指标, 构建流域产沙与  $I_C$  和降雨的协同关系。选取与年输沙关系最紧密的年降雨量, 通过非线性回归建立吕二沟流域年际产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与  $I_C$ 、年降雨量的综合定量关系:

$$S_{SY} = 7.9 \times 10^{-9} P_r^{5.26} e^{2.80 I_C} \quad (R^2=0.88) \quad (4)$$

表 2 年产沙模数和降雨指标的 Pearson 相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis between annual sediment yield and their rainfall parameters

降雨指标 Rainfall parameter	$P_r$	$P_{12}$	$P_m$	$S_{SY}$	$P_r P_{12}$	$P_r P_m$	$P_{12} P_m$
$P_r$	—	0.970***	0.629***	0.698***	0.980***	0.828***	0.841***
$P_{12}$	0.970***	—	0.667***	0.641***	0.981***	0.841***	0.874***
$P_m$	0.629***	0.667***	—	0.414**	0.620***	0.946***	0.925***
$S_{SY}$	0.698***	0.641***	0.414**	—	0.699***	0.568***	0.568***
$P_r P_{12}$	0.980***	0.981***	0.620***	0.699***	—	0.827***	0.856***
$P_r P_m$	0.828***	0.841***	0.946***	0.568***	0.827***	—	0.993***
$P_{12} P_m$	0.841***	0.874***	0.925***	0.568***	0.856***	0.993***	—

注: \*, \*\* 和 \*\*\* 分别代表通过了 0.05、0.01 和 0.001 水平的显著性检验;  $P_{12}$  为年侵蚀性降雨量,  $P_m$  为年最大日降雨量。

Note: \*, \*\* and \*\*\* represent significant level at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.001$ ;  $P_{12}$  means annual erosive rainfall amount,  $P_m$  means annual largest daily rainfall amount.

由式 (4) 可以看出, 小流域年际产沙强度分别随年

降雨量和泥沙连通性指数呈幂函数和指数函数递增关系,综合定量关系的  $R^2$  达 0.88,表明年降雨量和泥沙连通性指数可共同解释 88% 的年际产沙模数变化。式 (4) 的  $R^2$  远大于吕二沟流域年际产沙模数与年降雨量定量关系的  $R^2$ ,这表明引入泥沙连通性指数确实可以有效提高对流域年产沙的解释力。

将吕二沟流域从土地利用/覆被格局 I、II、III 时期的年均降雨量和土地利用/覆被格局 IV 的平均泥沙连通性指数 ( $I_c$ ) 代入式 (4) 中计算,与实际年产沙模数比较,结果表明,在假设年降雨量不变的条件下,吕二沟流域从土地利用/覆被格局 I、II、III 转变到土地利用/覆被格局 IV,流域的产沙模数将分别减少 70.2%、59.7% 和 64.8%。

### 3.3 月尺度流域降雨和水沙变化及其对土地利用/覆被格局的响应特征

#### 3.3.1 流域月尺度降雨和水沙变化

统计分析表明,流域多年平均的汛期月降雨量和月侵蚀性降雨量分别介于 8.3~296.8 和 0~260.9 mm,平均值为 82.6 和 51.8 mm,最大值均发生在 2020 年 8 月,变异系数分别达 0.6 和 0.9,均大于年际降雨变异。流域多年平均的汛期月径流深和月径流系数分别介于 0~41.3 mm 和 0~35.54%,最大值均发生在 2003 年 10 月,平均值为 4.5 mm 和 4.05%。汛期月产沙模数和月产沙系数分别介于 0~3 802.5 t/km<sup>2</sup> 和 0~29.69 t/(km<sup>2</sup>·mm),最大值均发生在 2007 年 8 月,平均值为 313.3 t/km<sup>2</sup> 和 2.41 t/(km<sup>2</sup>·mm)。总体上,流域汛期月尺度的水沙特征指标变异程度强于年尺度,且水沙特征指标变异程度强于降雨指标,产沙特征指标变异程度强于产流,同时汛期的月际降雨、径流和产沙最大值分别出现在不同时期,反映出由于下垫面等其他因素影响,而导致的年内月际降雨与水沙异步变化。

#### 3.3.2 月尺度降雨类型

采用 K-均值聚类法,根据月降雨量、月最大日降雨量和月侵蚀性降雨日数将研究期内 156 个汛期月划分为 4 种降雨类型 (表 3)。其中, A 型降雨呈小雨量、弱侵蚀性, B 型降雨呈中雨量、弱侵蚀性, C 型降雨呈大雨量、中侵蚀性, D 型降雨呈大雨量、强侵蚀性,不同雨型的月降雨量、月最大日降雨量和月侵蚀性降雨日数均表现为 A 型<B 型<C 型<D 型。A 型、B 型和 C 型降雨是研究期内流域主要降雨类型,分别出现 58、58 和 38 次,在 C 型月降雨中,月最大日降雨量超过 50 mm 的月数有

10 个,而 B 型月降雨中月最大日降雨量超过 50 mm 的月数只有 2 个, A 型月降雨中并没有出现月最大日降雨量超过 50 mm 的月份。D 型月降雨在研究期内仅发生了 2 次,月降雨量和月最大日降雨量分别为 288.5~296.8 和 53.0~92.0 mm,属于偶发降雨类型。

表 3 不同汛期 (7—10 月) 月降雨类型的统计特征

Table 3 Statistical characteristics for different monthly rainfall types in the flood season (July-October)

类型 Type	降雨指标 Rainfall parameter	月降雨量 Monthly rainfall/mm	月最大日降雨量 Maximal daily rainfall/mm	月侵蚀性降雨日数 Days of monthly erosive rainfall
A	平均值	37.8	13.8	0.8
	标准差	12.8	5.9	0.7
	频次		58	
B	平均值	78.3	25.8	2.2
	标准差	14	9	0.9
	频次		58	
C	平均值	146.7	44.3	4.2
	标准差	23.6	16.9	1.2
	频次		38	
D	平均值	292.6	72.5	7.4
	标准差	5.9	27.6	1.7
	频次		2	

#### 3.3.3 流域月尺度水沙对土地利用/覆被格局的响应

不同土地利用/覆被格局下,吕二沟流域汛期的月际径流深和径流系数变化与年际尺度类似,土地利用/覆被格局 I、II、III 和 IV 所对应的流域汛期月均径流深分别为 11.7、5.9、1.8 和 4.0 mm、月均径流系数分别为 11.9、6.4、1.9、3.0%,土地利用/覆被格局 I 的汛期月均径流深和径流系数分别是土地利用/覆被格局 II、III 和 IV 的 2.0、6.3、2.9 倍和 1.9、6.3、4.0 倍,均显著大于之后的 3 种土地利用/覆被格局 ( $P<0.05$ ) (图 7)。

流域在土地利用/覆被格局 I、II、III 和 IV 下的汛期月均产沙模数分别为 713.4、377.4、112.0 和 317.9 t/km<sup>2</sup>。排除降水差异影响后,流域在土地利用/覆被格局 I、II、III 和 IV 下的汛期月均产沙系数分别为 6.4、3.2、1.0 和 2.2 t/(km<sup>2</sup>·mm),最初土地利用/覆被格局 I 所对应的产沙系数显著大于后期 3 种土地利用/覆被格局 ( $P<0.05$ )。

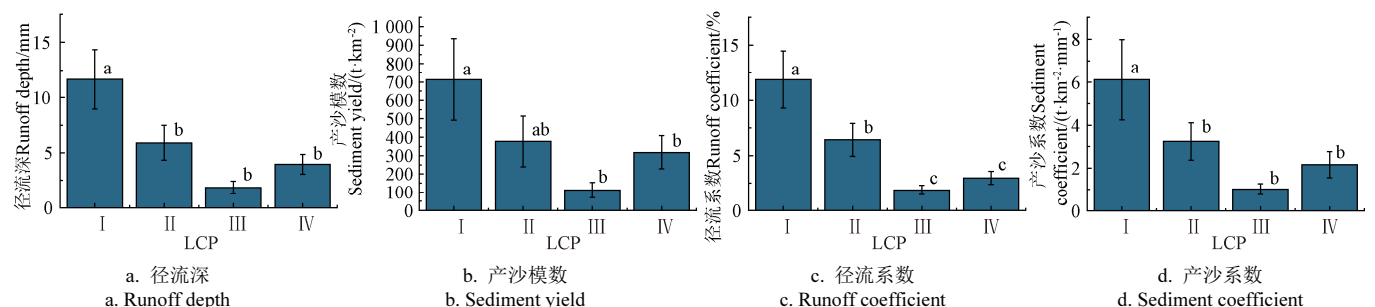


图 7 吕二沟流域不同土地利用/覆被格局下的汛期月际水沙特征指标变化

Fig.7 Monthly variation of runoff and sediment parameters in flood season among different LCP in Lyuergou Watershed

### 3.3.4 流域月尺度水沙对降雨类型和土地利用/覆被格局的响应

A 和 B 2 种月降雨类型下, 吕二沟流域在土地利用/覆被格局 I 时的汛期月均径流深分别为 5.4 和 9.1 mm, 均显著高于土地利用/覆被格局 III 和 IV ( $P<0.05$ ), 分别达 9.2~21.9 和 6.6~7.7 倍; 月均径流系数分别为 12.7% 和 9.8%, 显著高于其他 3 种土地利用/覆被植被格局 ( $P<0.05$ ), 分别达 4.3~30.5 和 1.2~6.2 倍 (图 8)。A 和 B 2 种月降雨类型下, 流域在土地利用/覆被格局 I 时的月均产沙模数分别为 75.0 和 650.4 t/km<sup>2</sup>, 显著高于其他 3 种土地利用/覆被植被格局 ( $P<0.05$ ), 分别达 3.1~6.7 和 2.7~13.0 倍; B 型降雨下, 流域月均产沙系数为 6.2 t/(km<sup>2</sup>·mm), 显著高于土地利用/覆被植被格局 III 和 IV ( $P<0.05$ ), 达 5.4~17.8 倍。

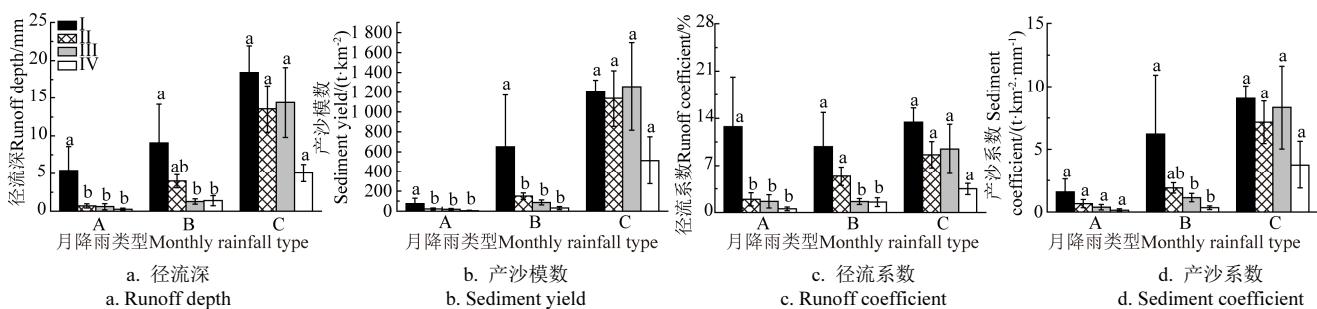


图 8 吕二沟流域不同类型月降雨和土地利用/覆被格局下的汛期月际水沙特征指标变化

Fig.8 Monthly variation of runoff and sediment parameters in flood season among different monthly rainfall types and land use/cover patterns in Lyuergou Watershed

### 3.3.5 流域月尺度输沙与连通性指数的关系

吕二沟流域汛期月产沙模数和降雨指标的相关分析结果表明 (表 4), 大多数月尺度降雨指标均与年产沙模数呈现显著正相关, 其中相关系数较大的单项降雨指标是月最大日降雨量 ( $P_m$ ) 和月降雨量 ( $P_r$ ), 相关系数较大的复合降雨指标是  $P_r P_m$ 。

因此, 通过非线性回归分析, 分别尝试建立吕二沟流域汛期月际产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与  $P_m$ 、 $P_r$  和  $P_r P_m$  等月降雨指标的综合定量关系, 结果发现汛期月际产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与  $P_r$ 、 $P_m$  和  $P_r P_m$  月降雨指标的定量方程  $R^2$  分别为 0.36、0.38 和 0.34, 而汛期  $S_{SY}$  与  $P_r$  和  $P_m$  双指标的多元回归方程  $R^2$  为 0.34。

表 4 汛期月产沙模数和降雨指标的相关分析

Table 4 Correlation analysis between monthly sediment yield in flood season and their rainfall parameters

降雨指标 Rainfall parameter	$P_r$	$P_{12}$	$P_m$	$N_{12}$	$S_{SY}$	$P_r P_{12}$	$P_r P_m$	$P_{12} P_m$
$P_r$	—	0.966***	0.789***	0.892***	0.598***	0.915***	0.883***	0.875***
$P_{12}$	0.966***	—	0.814***	0.920***	0.593***	0.927***	0.881***	0.900***
$P_m$	0.789***	0.814***	—	0.596***	0.613***	0.705***	0.908***	0.893***
$N_{12}$	0.892***	0.920***	0.596***	—	0.445***	0.802***	0.669***	0.690***
$S_{SY}$	0.598***	0.593***	0.613***	0.445***	—	0.585***	0.669***	0.668***
$P_r P_{12}$	0.915***	0.927***	0.705***	0.802***	0.585***	—	0.896***	0.916***
$P_r P_m$	0.883***	0.881***	0.908***	0.669***	0.669***	0.896***	—	0.992***
$P_{12} P_m$	0.875***	0.900***	0.893***	0.690***	0.668***	0.916***	0.992***	—

图 8 还表明, 在 C 型降雨下, 伴随月降雨量、月最大日降雨量和月侵蚀性降雨日数的增大, 不同土地利用/覆被格局间的径流、输沙特征指标大小关系有所变化。具体而言, 当处于土地利用/覆被格局 I 时, 流域月均径流深和月均径流系数分别达到 18.4 mm 和 13.4%, 流域月均产沙模数和月均产沙系数分别达 1 201.8 t/km<sup>2</sup> 和 9.0 t/(km<sup>2</sup>·mm), 单因素方差分析的结果表明, C 型月降雨类型下, 吕二沟流域在不同土地利用/覆被格局下的汛期月均径流深 ( $P=0.131$ ) 和月均产沙模数 ( $P=0.439$ ) 之间均不存在显著性差异。

以上结果反映出, 土地利用覆被/格局对流域年内水沙的调控作用大小受月降雨状况影响, 在雨量大、侵蚀性强的降雨月份, 流域土地利用/覆被格局的水沙影响将会减弱。

现流域汛期月际产沙模数与月降雨指标定量关系并不理想, 且由于流域土地利用/覆被格局对流域的影响, 因此优选与小流域月尺度产沙模数关系较高的降雨变量  $P_m$ 、 $P_r$  和  $P_r P_m$ , 构建了小流域汛期月尺度产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与月降雨指标和  $I_C$  的多元函数关系, 结果表明, 小流域汛期月尺度产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与月最大日降雨量 ( $P_m$ )、月降雨量 ( $P_r$ ) 及泥沙连通性指数 ( $I_C$ ) 的多元函数关系效果最佳:

$$S_{SY} = 2\,837.2 P_r^{1.12} P_m^{1.51} e^{4.40 I_C} \quad (R^2=0.59) \quad (5)$$

与式 (5) 相比, 小流域汛期月尺度产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与  $P_m$  和  $I_C$ 、 $P_r$  和  $I_C$ 、 $P_r P_m$  和  $I_C$  的多元定量关系的  $R^2$  分别为 0.54、0.47 和 0.59, 效果相对较差。由式 (5) 可以看出, 小流域月尺度产沙与月最大日降雨量和月降雨量存在幂函数递增关系, 与  $I_C$  呈良好指数递增关系。

前述分析可知, 吕二沟小流域汛期月际产沙模数与土地利用/覆被格局的关系受制于降雨类型, 因此针对不同雨型, 采用非线性回归分析, 分别构建了流域汛期月际产沙模数 ( $S_{SY}$ ) 与月最大日降雨量 ( $P_m$ )、月降雨量 ( $P_r$ ) 和泥沙连通性指数 ( $I_C$ ) 的综合定量关系。

$$\text{A 型降雨: } S_{SY} = 2.2 \times 10^4 P_r^{2.29} P_m^{0.08} e^{6.29 I_C} \quad (R^2=0.62) \quad (6)$$

$$\text{B 型降雨: } S_{SY} = 6.5 \times 10^6 P_r^{1.24} P_m^{2.30} e^{9.15 I_C} \quad (R^2=0.98) \quad (7)$$

$$\text{C 型降雨: } S_{SY} = 5.6 P_r^{2.23} P_m^{1.34} e^{3.95 I_C} \quad (R^2=0.45) \quad (8)$$

如式 (6)~式 (8) 所示, 对于 A 型和 B 型降雨, 流域汛期月际产沙模数与月最大日降雨量、月降雨量及



泥沙连通性指数的关系良好,  $R^2$  较高, 而在 C 型降雨时, 关系并不理想,  $R^2$  仅 0.45; 此外, C 型降雨下  $I_C$  的系数 (3.95) 也远小于 A 型 (6.29) 和 B 型降雨 (9.15), 表明 C 型降雨下汛期月际产沙对  $I_C$  变化的响应程度小于 A 型和 B 型降雨。

以上结果说明,  $I_C$  能较好反映土地利用/覆被格局的小流域侵蚀产沙影响, 可用于定量评估不同土地利用/覆被格局下的小流域侵蚀产沙变化。伴随  $I_C$  增大, 小流域年际和年内月际产沙均呈指数递增, 但其紧密和响应程度受降雨影响。尤其在年内月尺度, 不同雨型下, 月产沙强度与降雨、 $I_C$  的关系差异较大, 随着月降雨量及其侵蚀性增大, 泥沙连通性指数与月际产沙模数间的定量关系减弱, 土地利用/覆被格局的侵蚀产沙影响降低。

#### 4 讨论

由于流域地形地貌在短期内相对稳定, 且吕二沟流域过去 40 余年沟道治理措施实施相对较少, 因此流域下垫面条件的改变基本由林草植被增加为主的土地利用/覆被变化所致。具体而言, 20 世纪 80 年代初期, 吕二沟流域的土地利用以耕地为主体, 伴随 20 世纪 80 年代中期开始实施植物措施为主的水土流失综合治理, 林草面积快速增加, 土地利用/覆被格局发生剧烈变化, 直至 2000 年之后逐渐趋于稳定, 整个变化过程中, 尤以坡耕地分布较广的流域中、下游变化最为明显 (图 2)。流域中、下游的植被增加不仅通过冠层拦截降雨, 削减降雨动能以及根系促进入渗和提高抗蚀性等方式减少了其覆盖区域的水土流失, 还会由于减少地表产流、增加径流阻力、拦截过滤泥沙等功能, 从而阻断上坡汇流输移路径、阻控下方汇流冲刷, 发挥了减少非覆盖区域侵蚀产沙的异地水土保持作用<sup>[7,25-27]</sup>。此外, 流域中少量的包括淤地坝在内的沟道治理措施也发挥了拦截径流泥沙, 并减弱下游沟道侵蚀的作用<sup>[3-4,28]</sup>。通过上述过程, 最终改变整个流域的泥沙连通性, 影响流域在降雨过程中的侵蚀产沙。

本研究从年际和年内月际 2 个时间尺度对比分析了不同土地利用/覆被格局下的流域侵蚀产沙变化, 阐明了小流域侵蚀产沙对土地利用/覆被格局的变化响应机制。就日尺度水沙来讲, 由于日尺度水沙的变异性较强, 数据量巨大, 系统的分析较为复杂繁琐。因此, 从不同土地利用/覆被格局 (“土地利用/覆被格局 I”、“土地利用/覆被格局 II”、“土地利用/覆被格局 III”、“土地利用/覆被格局 IV”) 中分别选择一个典型年份, 对其日尺度输沙率的变化做了初步的分析。吕二沟小流域日尺度输沙率有很多是 0, 表明每年中有很长时间没有径流输沙 (图 9); 随着以林地、草地增加为主的土地利用/覆被变化, 小流域日尺度输沙率不断下降, 变异性降低, 1995 年和 2010 年流域的日尺度输沙率显著小于 1985 年和 1990 年 ( $P<0.05$ )。流域日尺度输沙率变化的结果表明, 虽然流域侵蚀产沙的变化特征会随时间尺度的改变而发生变化, 呈现出一定的时间尺度效应, 但以林草地增加为主的土地利用/覆被变化的减沙效应是基本一致的。

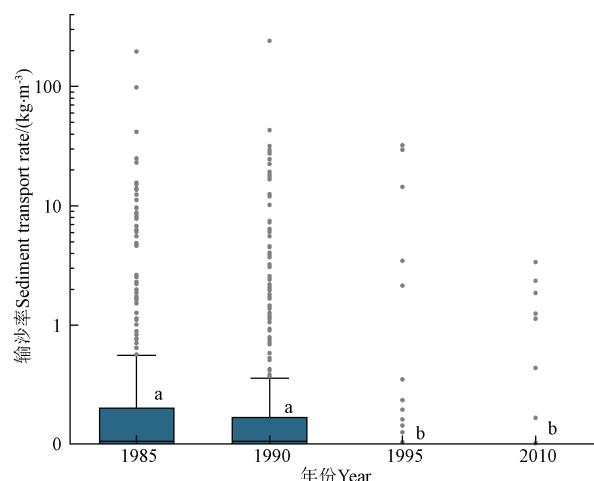


图 9 吕二沟流域不同年份的日输沙率变化

Fig.9 Variation of daily sediment transport rate among different years in Lyuergou Watershed

流域林草植被等土地利用/覆被格局对径流、输沙的影响, 很大程度受制于降雨条件<sup>[28]</sup>。一方面可能由于当降雨量或降雨强度超过一定阈值时, 产流急剧增加, 径流的水蚀能量与功率将超出植被等地表覆被的滞缓和拦截能力, 从而导致明显不同于常态降雨条件下的侵蚀产沙结果<sup>[7]</sup>; 另一方面, 在极端强降雨事件中, 流域内的老式梯田, 退耕草地等常态降雨事件中充当泥沙“汇”的部分土地利用斑块, 将可能因遭受洪水径流的强烈冲刷而转变为泥沙“源”<sup>[29-30]</sup>。此外, 大量坡面径流汇集进入沟缘线以下的沟坡、沟道后, 将加剧沟谷重力侵蚀, 形成大量泥沙物源, 并将原本在沟道内的沉积泥沙带出流域出口, 形成冲刷作用极强的高含沙水流, 从而导致产沙峰值<sup>[31]</sup>, 因此, 即使在流域植被覆盖条件较好的情况下, 强降雨也会导致较大的侵蚀产沙量, 土地利用/覆被格局对侵蚀产沙的调控作用降低。本研究中, 在小雨量的 A 型降雨和中雨量的 B 型降雨下, 吕二沟流域在土地利用/覆被格局 III 和 IV 时的汛期月均径流深和产沙模数均显著小于土地利用/覆被格局 I ( $P<0.05$ ); 但由于强降雨的影响, 在大雨量的 C 型降雨时土地利用/覆被格局的侵蚀产沙影响减弱, 不同格局情景间的月际径流深和产沙模数均未见显著差异 (图 8), 并导致泥沙连通性指数与月际产沙模数的关系不再紧密 (式 (8))。因此, 随着降雨增大、增强, 小流域土地利用/覆被格局的侵蚀产沙影响减弱, 有关其作用变化的阈值降雨, 以及极端暴雨事件下的小流域水土保持措施功能特征与优化配置还需持续关注。

降雨条件除了改变侵蚀产沙量之外, 还会对含沙量产生一定的影响。由以往研究结果可知, 降雨强度和降雨历时是流域事件尺度水沙变量的主要影响因素<sup>[32-34]</sup>, 而降雨强度则与次含沙量的相关性最为显著<sup>[28,33]</sup>。因此, 相比普通的降雨事件, 暴雨事件除了诱发侵蚀产沙峰值<sup>[29]</sup>之外, 也可能会导致较高的次洪水事件含沙量。在 1982—1985 年 (“土地利用/覆被格局 I”), 整个时期内没有出现日降雨量大于 50 mm 的暴雨日, 而在 1986—1990 年 (“土地利用/覆被格局 II”) 和 1991—2000 年 (“土地



利用/覆被格局Ⅲ”),暴雨日分别发生了2次和1次,而在2001—2020年(“土地利用/覆被格局Ⅳ”),暴雨日的发生次数在11次以上。总体而言,随着时段的推进,暴雨日数不断增大,因此吕二沟流域后期次洪水事件的含沙量不断上升;此外,由于流域中少量的沟道治理措施在研究期的前期(1982—2000年)尚能发挥拦截径流泥沙,降低径流含沙量的作用<sup>[4]</sup>;而到了研究期后期(2001—2020年)沟道工程措施由于失去直接拦沙能力,且自1980年之后流域没有新修建的淤地坝,因此导致了较高的汛期月平均含沙量和年含沙量,也出现了后期相比前期减沙效益弱于减水效益的现象。

泥沙连通性指数( $I_C$ )一定程度上反映了流域内地形与土地利用/覆被空间分异及综合影响,相较单纯考虑土地利用/覆被斑块大小、形状和位置关系的连接性、多样性等常规景观格局指数,与流域侵蚀产沙间具有更加紧密的协同关系<sup>[8,35-37]</sup>。近年来,学者们利用泥沙连通指标分析流域水沙对土地利用/覆被格局的变化响应,发现两者间存在良好的正向协同,并建立了不同的定量关系<sup>[18,37-38]</sup>,这在本研究的结果中也再次得到印证。本研究探讨了不同土地利用/覆被格局下的流域径流、输沙变化,并建立了年、月尺度的流域产沙模数与泥沙连通性指数、降雨量间的定量协同关系。然而,受制于小流域土地利用/覆被变化的复杂性,尚不能精准区分土地利用/覆被变化类型、数量、分布以及植被覆盖程度等不同因素对流域侵蚀产沙变化的定量贡献。在未来可结合模型模拟和GIS空间分析等方法,通过设计固定覆盖比例和植被类型的典型植被格局,更加全面揭示流域植被格局对泥沙连通性和侵蚀产沙的影响机制和定量关系,为干旱半干旱地区小流域水土保持措施优化配置和功能提升提供科学依据。

## 5 结 论

本研究分析了吕二沟流域1982—2020年多时间尺度下流域侵蚀产沙特征变化,并探讨其对土地利用/覆被格局的响应机理。结论如下:

1) 20世纪80年代中期至今,吕二沟流域由耕地为主体向农林草复合结构转变,流域平均连通性指数( $I_C$ )总体显著下降,不同时期的流域 $I_C$ 之间存在显著性差异( $P<0.05$ )。根据流域土地利用/覆被格局的变化情况,将整个研究期划分为“土地利用/覆被格局Ⅰ”(1982—1985年)、“土地利用/覆被格局Ⅱ”(1986—1990年)、“土地利用/覆被格局Ⅲ”(1991—2000年)和“土地利用/覆被格局Ⅳ”(2001—2020年)4种土地利用/覆被格局情景。

2) 近40年来,随着以林地、草地增加为主的土地利用/覆被变化,流域年产流、产沙能力减弱。吕二沟流域在土地利用/覆被格局Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ时的年均径流深和径流系数分别为68.5、38.4、10.8、17.5 mm和9.2%、5.8%、2.0%、2.4%;吕二沟流域在土地利用/覆被格局Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的年均产沙模数和产沙系数分别为4 448.8、2 233.2、819.4、1 421.0 t/km<sup>2</sup>和5.9、3.4、1.7、1.9

t/(km<sup>2</sup>·mm),但相互并无显著差异。

3) 研究期内156个汛期月可划分为4种降雨类型。其中,A型降雨呈小雨量、弱侵蚀性,B型降雨呈中雨量、弱侵蚀性,C型降雨呈大雨量、中侵蚀性,D型降雨呈大雨量、强侵蚀性。吕二沟流域土地利用/覆被格局Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ所对应的汛期月际径流深和产沙模数分别为11.7、5.9、1.8、4.0 mm和713.4、377.4、112.0、317.9 t/km<sup>2</sup>,且土地利用/覆被格局Ⅲ和Ⅳ均显著小于土地利用/覆被格局Ⅰ( $P<0.05$ ),但C型降雨下的不同时期月产沙模数和产沙系数间差异均不显著,表明随降雨增大,流域土地利用/覆被格局的侵蚀产沙影响明显减弱。

4) 建立了年际和年内汛期月际流域产沙模数与降雨指标、 $I_C$ 的综合定量关系。小流域产沙随雨量增多呈幂函数增长,而随 $I_C$ 增大呈指数递增,且响应程度受降雨影响。尤其对于C型降雨,流域月产沙模数与 $I_C$ 关系减弱,表明流域产沙对土地利用/覆被格局变化的响应程度降低。

## 【参 考 文 献】

- [1] 傅伯杰,徐延达,吕一河.景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J].地球科学进展,2010,25(7):673-681.  
FU Bojie, XU Yanda, LV Yihe. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 673-681. (in Chinese with English abstract)
- [2] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.  
WEI Yanhong, JIAO Juying. Characteristics of erosion and sediment yield in small watersheds under different land use patterns in hilly and gully region of the Loess Plateau in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 96-103. (in Chinese with English abstract)
- [3] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降水 and 水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(4):9-16.  
YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu, et al. Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 原翠萍,雷廷武,张满良,等.黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响[J].农业机械学报,2011,42(3):36-43.  
YUAN Cuiping, LEI Tingwu, ZHANG Manliang, et al. Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):

- 36-43. (in Chinese with English abstract)
- [5] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的影响[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 972-981.  
XU Jiongxin. Response of erosion and sediment producing processes to soil and water conservation measure in the Wuding River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 972-981. (in Chinese with English abstract)
- [6] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4905-4912.  
QIN Wei, CAO Wenhong, GUO Qiankun, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14): 4905-4912. (in Chinese with English abstract)
- [7] 丁琳, 许海超, 秦伟, 等. 不同坡面草被格局下的侵蚀产沙量及其连通性指数表征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 119-128.  
DING Lin, XU Haichao, QIN Wei, et al. Erosion and sediment yield under different grass cover patterns and its characterization of connectivity index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 119-128. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰, 等. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.  
LIU Yu, LV Yihe, FU Bojie, et al. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 267-275. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响—景观水平与多尺度比较[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5531-5541.  
WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al. Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: Landscape-level and comparison at multiscale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5531-5541. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王金花, 李占斌, 张荣刚, 等. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 68-75.  
WANG Jinhua, LI Zhanbin, ZHANG Ronggang, et al. Relationships between landscape, runoff, and sedimentation in wind-water erosion crisscross region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 14(3): 68-75. (in Chinese with English abstract)
- [11] BORSELLI L, CASSI P, TORRI D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. *Catena*, 2008, 75(3): 268-277.
- [12] LUDWIG J A, BARTLEY R, HAWDON A A, et al. Patch configuration non-linearly affects sediment loss across scales in a grazed catchment in north-east Australia[J]. *Ecosystems*, 2007, 10(5): 839-845.
- [13] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法—景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.  
CHEN Liding, FU Bojie, XU Jianying, et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413. (in Chinese with English abstract)
- [14] MAYOR G, BAUTISTA S, SMALL E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): W10423
- [15] CAVALLI M, TREVISANI S, COMITI F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments[J]. *Geomorphology*, 2013, 188: 31-41.
- [16] ZHAO G J, GAO P, TIAN P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2020, 185: 104284.
- [17] LIU W, SHI C X, MA Y Y, et al. Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2022, 408: 115566.
- [18] ZOU Y W, HUANG X, HOU M T, et al. Linking watershed hydrologic processes to connectivity indices on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2022, 216: 106341.
- [19] GAO G Y, ZHANG J J, LIU Y, et al. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4363-4378.
- [20] CHEN C L, ZHAO G J, ZHANG Y T, et al. Linkages between soil erosion and long-term changes of landscape pattern in a small watershed on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2023, 220: 106659.
- [21] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.  
ZHANG Wenbo, XIE Yun, LIU Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705-711. (in Chinese with English abstract)
- [22] GAO G Y, MA Y, FU B J, et al. Multi-temporal scale changes of streamflow and sediment load in a loess hilly

- watershed of China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30: 365-382.
- [23] QIN W, GUO Q K, CAO W H, et al. A new RUSLE slope length factor and its application to soil erosion assessment in a Loess Plateau watershed[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 182: 10-24.
- [24] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL190-2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 8.
- [25] 闫帅旗, 朱冰冰, 边焯. 不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 116-123. YAN Shuaiqi, ZHU Bingbing, BIAN He. Variation characteristics of flow length of grass slope under different grass strip positions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(3): 116-123. (in Chinese with English abstract)
- [26] LIANG Y, JIAO J Y, TANG B Z, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124694.
- [27] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(4): 96-101. ZHANG Qingchun, LIU Baoyuan, ZHAI Gang. Review on relationship between vegetation and soil and water loss[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(4): 96-101. (in Chinese with English abstract)
- [28] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 169-175. YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 169-175. (in Chinese with English abstract)
- [29] ZHANG J Q, YANG M Y, ZHANG F B, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, PR China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28: 2527-2539.
- [30] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 等. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 159-167. JIAO Juying, WANG Zhijie, WEI Yanhong, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(13): 159-167. (in Chinese with English abstract)
- [31] 郑明国, 蔡强国, 陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(9): 3572-3581. ZHENG Mingguo, CAI Qiangguo, CHEN Hao. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in Gullied-hilly Area of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3572-3581. (in Chinese with English abstract)
- [32] 秦伟, 左长清, 晏清洪. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 124-132. QIN Wei, ZUO Changqing, YAN Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(2): 124-132. (in Chinese with English abstract)
- [33] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 1-8. YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu. Variation in the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of Lu'ergou Watershed in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张兴义, 乔宝玲, 李健宇, 等. 降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 110-117. ZHANG Xingyi, QIAO Baoling, LI Jianyu, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(16): 110-117. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘时城. 延河流域不同尺度水文连通性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. LIU Shicheng. Research on Hydrological Connectivity at Different Scales in Yanhe River Catchment[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [36] LÓPEZ-VICENTE M, POESEN J, NAVAS A, et al. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees[J]. *Catena*, 2013, 102: 62-73.
- [37] SOUGNEZ N, van WESEMAEL B, VANACKER B. Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain[J]. *Catena*, 2011, 84: 1-11.
- [38] TIAN X J, ZHAO G J, MU X M, et al. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133556.



## Response of sediment yield under different temporal scales to land use/cover pattern changes in typical watershed of Loess Plateau

LIANG Yue<sup>1,2</sup>, QIN Wei<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Qin<sup>1,2</sup>, DING Lin<sup>1,2</sup>, XU Haichao<sup>1,2</sup>, SHI Chenyu<sup>1,2</sup>, AN Leping<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China; 3. Yellow River Soil and Water Conservation Tianshui Governance and Supervision Bureau, Tianshui 741000, China)

**Abstract:** The influence of land use/cover patterns on soil erosion and sediment transport can be one of the most important indicators to optimize the soil and water conservation measures in a watershed. However, it is still lacking in the quantitative evaluation of the land use/cover pattern and their impacts on soil erosion and sediment yield at the watershed scale. This study aims to explore the long-term changes in the sediment yield on the interannual and intermonthly temporal scales from 1982 to 2020, together with their responses to the land and use/cover pattern. A typical watershed was selected in the Loess Plateau, and the Lyuergou watershed. The M-K trend analysis was employed to elucidate the long-term temporal trends of annual rainfall, runoff, and sediment yield in the study area. An investigation was explored on the changes in the runoff and sediment under different vegetation patterns using the land use/cover pattern. The index of connectivity was chosen to characterize the impacts of the land use/cover pattern on soil erosion and sediment yield. Accordingly, quantitative relationships were also established between the index of connectivity and sediment yield. In addition, the monthly rainfall amount, the maximum daily rainfall amount, and erosive rainfall days were selected as the indices to classify the rainfall types. The results indicated that the Lyuergou watershed experienced cropland abandonment and vegetation restoration, where the index of connectivity decreased significantly during 1982-2020. Consequently, the whole study period was divided into four stages: 1982-1985, 1986-1990, 1991-2000, and 2001-2020, corresponding to the land use/cover pattern I, II, III, and IV, respectively. The average annual sediment yield varied consistently, as the land use/cover pattern changed. Significantly downward trends were found in the average annual sediment yield and runoff depth, whereas, the annual rainfall amount showed no significant changing trend. Specifically, the annual runoff depth and sediment yield of land use/cover pattern IV decreased by 74.5% and 68.1%, respectively, compared with the land use/cover pattern I, respectively. The average monthly runoff depth and sediment yield in the flood season were 11.7, 5.9, 1.8, 4.0 mm and 713.4, 377.4, 112.0, 317.9 t/km<sup>2</sup> in the land use/cover pattern I, II, III, and IV, respectively. The runoff depth and sediment yield under the later land use/cover pattern (III and IV) were significantly lower as opposed to those in the early land use/cover pattern I. The erosive rainfall in the flood season was classified into four types: type A (minor rainfall amount, and weaker rainfall erosivity), type B (medium rainfall amount, and weaker rainfall erosivity), type C (great rainfall amount, and medium rainfall erosivity), and type D (great rainfall amount, and larger rainfall erosivity). Type A, B and C contributed to the most sediment yield on the small watershed. However, there was no significant difference in the monthly runoff depth and sediment yield among different land use/cover patterns under type C. The sediment yield on both interannual and intermonthly scales increased exponentially with index of connectivity, whereas the relationships were weaker under type C. The finding can provide a strong reference to the optimal allocation of land use/cover patterns and soil and water conservation measures in arid and semi-arid areas.

**Keywords:** soils; erosion; sediments; land use/cover pattern; small watershed; index of connectivity; rainfall