

极端降雨事件对南方红壤区径流和输沙的影响 ——基于赣江支流濂江上游流域的长序列分析(1984—2020年)^{*}

赵利祥^{1,2}, 郭忠录², 聂小飞^{1,3}, 廖凯涛^{1,3}, 郑海金^{1,3**}

(1:江西省水利科学院,南昌 330029)

(2:华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070)

(3:江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,南昌 330029)

摘要:为探究极端降雨对南方红壤区流域水沙的影响,本文基于江西省鄱阳湖水系赣江上游濂江流域1984—2020年逐日降雨量、径流量和输沙量数据,使用95百分位法计算极端降雨,并采用最小事件间隔时间法分割降雨事件,综合应用Pettitt检验和线性回归方法对水沙突变、影响因子进行定量分析。结果表明:(1)发生极端降雨事件的时期是流域泥沙输出的关键时期,极端降雨对输沙量的贡献率达85.58%~87.79%,而对径流量的贡献为38.33%~43.42%。(2)在极端降雨情景下,年径流量从1984—1995年的 $209.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ 下降到1996—2020年的 $165.23 \times 10^6 \text{ m}^3$,而年输沙量从1984—1995年的 $3.65 \times 10^4 \text{ t}$ 增加到1996—2020年的 $12.8 \times 10^4 \text{ t}$,相比于1984—1995年,1996—2020年的极端降雨所产生的径流量和输沙量占比有缩小趋势,分别表现为从43.42%到38.33%和从87.79%到85.58%。(3)极端降雨情景下影响流域水沙变化的主要因子是降雨量,其标准化回归系数为0.39~0.57,而普通降雨情景下水沙变化主要受前期降雨量的影响,其标准化回归系数为0.10~0.29。(4)仅对极端降雨而言,相比于1984—1995年,1996—2020年前期降雨量对径流量和输沙量的标准化回归系数均有所上升,分别从0.33提高到0.36、从0.12提高到0.17,即前期降雨量的作用在“径流减少,输沙增多”时期对水沙变化的影响更明显。因此,在制定流域管理策略时应重视极端降雨对水沙变化的影响,以确保措施切实可行。

关键词: 最小事件间隔时间法;降雨特征参数;径流量;输沙量;赣江;濂江流域

Effects of extreme rainfall events on runoff and sediment in the southern red soil area: A long series analysis based on the Upper Lianjiang River of Ganjiang River (1984–2020)^{*}

Zhao Lixiang^{1,2}, Guo Zhonglu², Nie Xiaofei^{1,3}, Liao Kaitao^{1,3} & Zheng Haijin^{1,3**}

(1: Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, P.R.China)

(2: College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention in Jiangxi Province, Nanchang 330029, P.R.China)

Abstract: This paper explored the influence of extreme rainfall on flow and sediment in the southern red soil region based on the daily rainfall, runoff and sediment discharge data of from 1984 to 2020, in the Upper Ganjiang Basin of the Lake Poyang system in Jiangxi Province. The 95th percentile method was used to isolate extreme rainfall, and the minimum inter-event time method was used to split rainfall events. The Pettitt test and linear regression method were used to analyze the abrupt change and influencing factors of flow and sediment. The results showed that: (1) The period of extreme rainfall events was the critical period of sediment output in the basin, and the contribution of extreme rainfall to sediment was 85.58%~87.79%, while the contribution to runoff was 38.33%~43.42%. (2) Under the extreme rainfall scenario, the annual runoff decreased from $209.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ in 1984–1995 to

* 2023-01-11 收稿;2023-05-08 收修改稿。

国家自然科学基金项目(42267058)、江西省科技厅重大科技研发专项“揭榜挂帅”制项目(20213AAG01012)和江西省水利厅科技计划项目(202124ZDKT25)联合资助。

** 通信作者;E-mail:haijinzheng@163.com。

$165.23 \times 10^6 \text{ m}^3$ in 1996–2020, while the annual sediment increased from $3.65 \times 10^4 \text{ t}$ in 1984–1995 to $12.8 \times 10^4 \text{ t}$ in 1996–2020, and compared with 1984–1995, the percentage of runoff and sediment generated by extreme rainfall in 1996–2020 has a decreasing trend, respectively showed from 43.42% to 38.33% and from 87.79% to 85.58%. (3) Rainfall was the main factors influencing flow-sediment changes in the basin under extreme scenarios, with standardized regression coefficients of 0.39–0.57. The flow-sediment changes under the normal rainfall scenario was mainly influence by the antecedent rainfall, with standardized regression coefficients of 0.10–0.29. (4) For extreme rainfall only, the standardized regression coefficients of rainfall on runoff and sediment increased from 0.33 to 0.36 and from 0.12 to 0.17, respectively, from 1996 to 2020 compared with 1984 to 1995. It suggested that the effect of antecedent rainfall on flow-sediment change was more significant in the period of “reduced runoff and increased sediment”. Therefore, when formulating basin management strategies, attention should be paid to the influence of extreme rainfall on the flow-sediment changes to ensure that the measures are feasible.

Keywords: Minimum inter-event time; rainfall characteristics parameters; runoff; sediment; Ganjiang River; Lianjiang River Basin

气候变化在 21 世纪变得更加剧烈,极端降雨事件也变得更加普遍^[1]。极端降雨事件能够极大地压缩地貌变化的时间成本,导致洪水中泥沙含量升高、径流系数变大^[2],对经济社会和生态环境等造成巨大的威胁^[3]。南方红壤区年降雨量大,是全国平均降雨水平的 1.9~2.8 倍,且 4—9 月易形成极端降雨,导致该地区降雨侵蚀力远大于其他地区^[4]。南方红壤区土壤类型以红壤土为主,其抗侵蚀能力较差^[5],已成为我国水力侵蚀最严重的地区之一^[4]。位于南方红壤区的赣江上游濂江流域降雨季节分布不均匀,汛期(4—9 月)易发生极端降雨^[6],是洪涝灾害频发区^[7]。濂江流域极端降雨较为频繁,与南方红壤区极端降雨分布具有较好一致性^[5]。同时,赣江为鄱阳湖水系第一大河,其上游濂江流域的土壤类型和全流域水蚀状况也与南方红壤区基本一致。因此,综合濂江流域与南方红壤区的降雨分布及土壤类型等特征,选取濂江流域开展极端降雨对径流量和输沙量的影响研究,具有较强的典型性和代表性。揭示极端降雨在濂江流域水沙变化中的作用,对厘清南方红壤区流域水土流失的降雨敏感程度具有重要意义,可以为未来南方红壤区流域管理和区域可持续发展提供参考。

极端降雨一般是指特定时间的降雨量大于正常水平,当前对极端降雨事件的考虑并不是基于不同持续时间的完整降雨事件,而大都是通过日降雨量来定义^[8]。已有学者提出应当从事件角度出发研究极端降雨^[8],但尚未说明方法的适用范围并形成完整的规范。因此,极端降雨的确定必须基于阈值,选择合适的阈值是开展极端降雨相关研究的关键前提^[9-10]。

极端降雨是引起流域径流和输沙变化的重要因素。降雨是水土流失发生的首要驱动条件,而极端降雨以大雨量、高雨强的特征加大了侵蚀产沙的发生强度^[11]。极端降雨对土壤的打击程度更强,伴随着径流形成与发展,泥沙的搬运速度也将加快^[12]。同时,极端降雨会调节径流量的年内分布易形成大洪水^[13],也将激化河流的输沙进程^[12,14-15]。极端降雨对径流和输沙的影响还存在差异,已有研究表明,输沙量更易与极端降雨产生响应^[16-18]。尽管极端降雨对生态环境的威胁已经被广泛讨论,但其对流域水沙变化的影响机制研究仍需完善。

前期降雨和降雨事件等因素都会影响到径流量的变化^[13]。前期降雨主要是通过增加土壤湿度为径流积累量变的过程,而降雨事件则是径流发生质变的推手,这个推力的大小本质上取决于降雨事件的强弱^[19]。径流量的变化也势必会波及到输沙量,对水沙关系产生作用^[20]。不同时期^[21]和降雨类型^[11,22]下,降雨特征参数对径流和输沙的影响会出现差异。除上述因素外,人类活动对径流、输沙的影响也十分巨大,如水库建设能有效地拦沙蓄水^[22],而不同的土地利用方式(如园地规模化开发)会对侵蚀造成不同的影响^[23]。尽管先前的研究者能够分别关注到极端降雨和人类活动对流域水沙变化的影响,但两者影响下的水沙变化研究仍有待深入。

因此,本文研究极端降雨对我国南方红壤区典型流域水沙变化的影响,阐明极端降雨影响流域水沙的变化特征,厘清极端降雨在不同水沙情景下的作用效果,为流域综合治理与有效管理提供理论依据,助力区域生态环境高质量发展。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

濂江是我国南方红壤区鄱阳湖流域赣江上游贡水左岸一级支流,发源于江西省赣州市安远县欣山镇,流域面积 2339 km^2 ,涉及江西赣州市安远、会昌、于都三县,主河道长 133 km ^[24]。该流域属亚热带季风气候区,四季分明,降水丰沛,多年平均气温 18.7°C ;年均水面蒸发量 1090 mm ,年均径流量 19.2 亿 m^3 ,年均悬移质输沙量 25.9 万 t 。流域内地形大多为低山丘陵,海拔在 $209\sim 1083\text{ m}$ 之间,落差较大;地处华南地层区,赣中南褶隆,寻乌-瑞金深断裂横穿境内。流域内的土壤类型主要为红壤,林地主要为马尾松和杉树,经济林主要为脐橙和柑橘。濂江流域位于我国水土流失严重的南方红壤区,属于国家水土流失重点预防区^[24]。濂江上游设有羊信江水文站,控制面积为 568 km^2 ,本研究将其界定为濂江上游流域。

1.2 数据来源

濂江流域内有6个雨量站(黄屋、上山教、屋背岗、兴地、江头、龙头)和1个水文站(羊信江水文站)。本文共收集了1984—2020年6个雨量站日降雨数据,以及羊信江水文站同期逐日降雨、径流和输沙量数据。数据均来源于江西省水文监测中心,翔实可靠。各雨量站和水文站地理位置如图1所示。

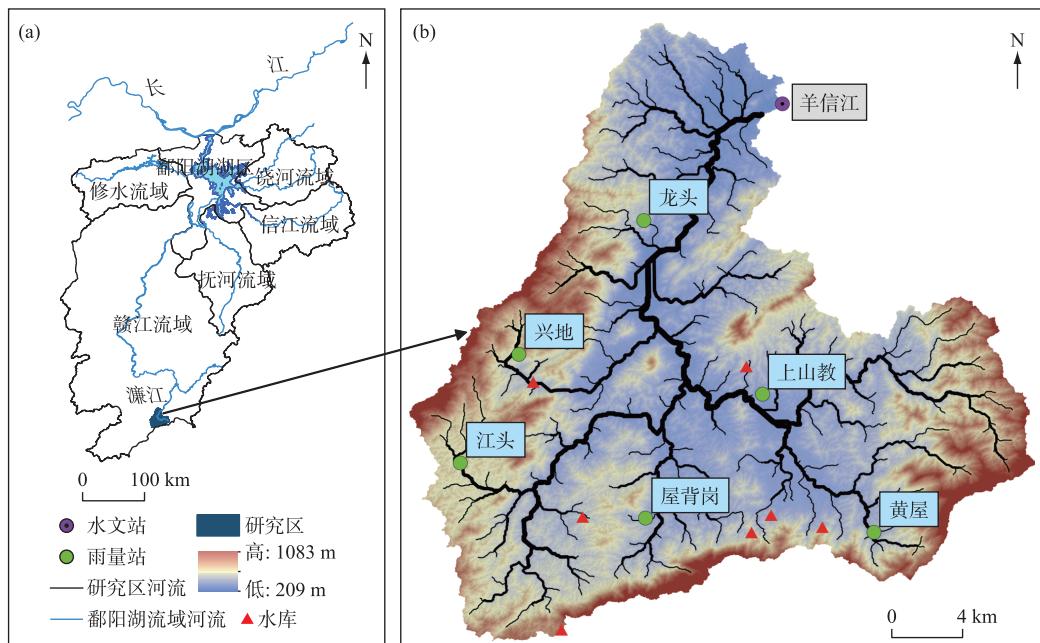


图1 濂江上游流域的区位及水文站和雨量站的分布(研究区内河流为空间分析结果)

Fig.1 The location of Upper Lianjiang Basin and the distribution of hydrological stations and rainfall stations
(Rivers in the study area as a result of spatial analysis)

1.3 极端降雨的界定

对濂江流域内7个站点降雨数据使用泰森多边形法计算得到流域平均降雨数据并进行筛选。由于濂江流域蒸散量较大,而国际气象组织认为小于 1 mm 的降雨无法维持土壤湿润,故选取大于 1 mm 的日降雨数据汇总结果作为流域降雨量^[25]。使用日降雨量超过阈值的方法划定极端降雨,根据参考文献[2],本文将第95百分位数的日降雨量认定为极端降雨的发生阈值^[2,26]。在流域日平均降雨量的基础上计算发生阈值,得到濂江流域极端降雨的划分阈值为 23.55 mm 。日降雨量超过阈值为极端降雨,其余则为普通降雨。当出现极端降雨意味着流域水土流失的可能性或强度增大。

极端降雨事件一般是指在一定时间范围内出现较少的小概率降雨事件^[8,27]。最小事件间隔时间(MIT)被

认为是划分降雨事件的最常见标准,MIT 的取值范围为 15 min~1 d^[28],本文取 MIT 为 1 d,对分离出的普通降雨极端降雨进行事件尺度的合并。极端降雨事件必须保证事件内每天的降雨量均大于划分阈值(23.55 mm),而普通降雨事件仅需满足降雨不间断。文中初始径流量和初始输沙量是指降雨事件发生当天的径流量和输沙量值。降雨事件发挥效能具有滞后性,本文认定一次降雨事件所产生的总径流量和总输沙量为降雨事件发生时到结束之后 3 d 的累计值^[29]。前期降雨量是指降雨事件发生之前的累积降雨量^[30],本文中使用前 5 天累积降雨量探究前期降雨量对径流与输沙的影响。年均极端降雨或普通降雨强度(I_i)计算方式如下:

$$I_i = \frac{r_i}{d_i} \quad (1)$$

式中: i 为年份, r_i 为第 i 年某类降雨(极端降雨或普通降雨)总降雨量, d_i 为第 i 年该类降雨(极端降雨或普通降雨)的降雨天数。

1.4 Pettitt 检验

Pettitt 分析方法是在 1979 年被 Pettitt AN 提出的非参数检验方法^[31],该检验是用 Mann-Whitney 的统计量 $U_{t,N}$ 来检验同一个总体的两个样本 x_1, x_2, \dots, x_N 和 x_{t+1}, \dots, x_N 。统计量 $U_{t,N}$ 的公式为:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t = 2, 3, \dots, N$; x_i, x_j 为将要进行检验的随机变量; t 为检验样本对应的时刻; N 为样本容量。 $U_{t,N}$ 为该检验统计第一样本里的数据超过第二样本数据的个数累积值。Pettitt 检验的零假设为没有突变点。其统计量 K_N 如下:

$$K_N = \text{Max}_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (4)$$

统计量 K_N 的显著性 P 由下述公式计算:

$$P \cong 2\exp[-6(K_t^2)/(N^3 + N^2)] \quad (5)$$

若 $P < 0.05$,则存在显著变化点,也就可以依据突变点 t 将时间序列分为两部分。

2 结果与分析

2.1 漓江上游流域极端降雨特征

基于百分位法进行极端降雨统计,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,漓江上游流域 1984—2020 年间共有 4844 d 发生降雨。其中:688 d 为极端降雨,占总降雨天数的 14.1%;4156 d 为普通降雨,占总降雨天数的 85.80%。极端降雨和普通降雨的多年平均降雨量、降雨天数和降雨强度分别为 743.00 mm、19 d/a、39.88 mm/d 和 811.21 mm、114 d/a、7.16 mm/d。此外,年极端降雨量、极端降雨天数和极端降雨雨强的变化范围分别为 264.36~1384.99 mm、7~32 d 和 31.04~48.64 mm/d,普通降雨量、普通降雨天数和普通降雨雨强的变化范围分别为 621.03~1127.89 mm、87~157 d 和 6.30~8.21 mm/d。极端降雨的多年平均降雨量虽然小于普通降雨,但两者相差不大;降雨天数表现为极端降雨明显少于普通降雨;而降雨强度正好相反,表现为极端降雨远大于普通降雨。这说明极端降雨具有低频次、高雨强的显著特征。

基于事件角度解析流域水沙变化可以清晰对比极端和普通降雨的差异。在多年的时间跨度内,某些降雨事件可能呈现出持续性的特征,即表现为多日连续性的降雨,而非单日降雨。基于 MIT 法对降雨天数进行归并后,结果显示流域内 37 年间共有 2622 场次降雨事件。其中:547 场次为极端降雨事件,占总降雨场次的 20.86%;2075 场次为普通降雨事件,占总降雨场次的 79.14%。

如图 2 所示,当地汛期(4—9 月)多年平均出现极端降雨 14 d,主汛期(4—6 月)多年平均出现极端降雨 9 d,而非汛期多年平均出现极端降雨 5 d;汛期多年平均极端降雨量为 551.44 mm,主汛期多年平均极端降雨量为 351.77 mm,而非汛期多年平均极端降雨量 191.56 mm。总之,漓江流域汛期尤其是主汛期更容易出现极端降雨。

表1 濂江上游流域不同降雨类型统计特征
Tab.1 Statistical characteristics of different rainfall types in Upper Lianjiang Basin

| 降雨类型 | 特征变量 | 均值 | 最大值 | 最小值 | 标准差 | C_v (无量纲) |
|------|------------|--------|---------|--------|--------|-------------|
| 极端降雨 | 降雨量/(mm/a) | 743.00 | 1384.99 | 264.36 | 251.61 | 0.34 |
| | 降雨时间/d | 19 | 32 | 7 | 5.68 | 0.3 |
| | 雨强/(mm/d) | 39.88 | 48.64 | 31.04 | 4.61 | 0.12 |
| 普通降雨 | 降雨量/(mm/a) | 811.21 | 1127.89 | 621.03 | 95.01 | 0.12 |
| | 降雨时间/d | 114 | 157 | 87 | 12.62 | 0.11 |
| | 雨强/(mm/d) | 7.16 | 8.21 | 6.30 | 0.47 | 0.07 |

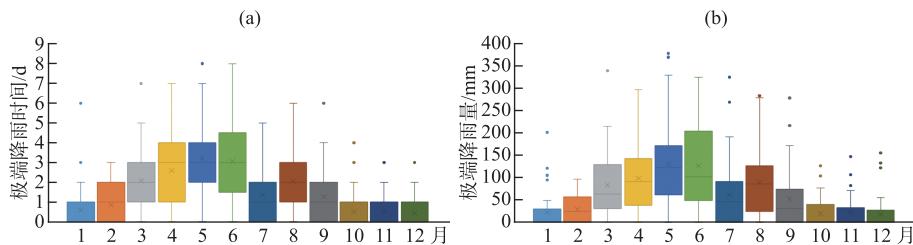


图2 濂江上游流域年极端降雨天数(a)和极端降雨量(b)的年内分配
(实线代表中位数, 叉号代表平均值, 方框的上下边界是75%和25%分位数,
方框上下的线帽代表90%和10%分位数, 横线上方的点为异常值)

Fig.2 Annual variation of extreme rainfall days (a) and extreme rainfall (b) in Upper Lianjiang River Basin
(The solid line represents the median, the cross represents the mean, the upper and lower boundaries
of the box are 75% and 25% quartiles, the whiskers above and below the box
represent 90% and 10% quartiles, and the dots above the horizontal line are outliers)

2.2 濂江上游水沙变化特征

濂江上游流域径流量和输沙量的年内分布规律与极端降雨量相似,汛期(4—9月)尤其是主汛期(4—6月)径流量和输沙量表现得格外显著,其中径流量和输沙量在6月份出现最大值;而在非汛期,尤其是10—12月的径流量和输沙量明显下降(图3)。濂江上游流域1984—2020年年径流量和年输沙量的变化特征为:年径流量呈微弱递减趋势,而年输沙量呈递增趋势,线性趋势系数分别为-0.78和4.59,5年滑动平均值在均值附近波动;年径流量和年输沙量的变化并不完全一致,但是在2000年后两者的变化范围都有所增加,而且出现明显的最大值(图3)。

为研究不同输沙阶段的水沙变化特征,更好地剖析输沙量变化的原因,本文使用Pettitt检验对濂江流域37年的径流量、输沙量进行突变识别,发现径流量和输沙量的突变点分别在1997年和1995年(图3)。因径流为输沙变化的驱动因素,故选取1995年作为划分节点进行统计,结果如表2所示。从表2可以看出,突变前1984—1995年多年极端降雨对应的平均径流量为 $209.21 \times 10^6 \text{ m}^3$,变化范围为 $40.06 \times 10^6 \sim 382.32 \times 10^6 \text{ m}^3$;突变后1996—2020年多年极端降雨对应的平均径流量为 $165.23 \times 10^6 \text{ m}^3$,变化范围为 $49.64 \times 10^6 \sim 443.70 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。突变前1984—1995年多年极端降雨对应的平均输沙量为 $3.65 \times 10^4 \text{ t}$,变化范围为 $0.45 \times 10^4 \sim 7.14 \times 10^4 \text{ t}$;突变后1996—2020年多年极端降雨对应的平均输沙量为 $12.80 \times 10^4 \text{ t}$,变化范围为 $0.74 \times 10^4 \sim 61.74 \times 10^4 \text{ t}$ 。可见,突变后1996—2020年径流量和输沙量的最大值都有较大幅度的提高,变异性更强,但总体上呈现出“径流减少,泥沙增多”的趋势。

图3显示径流量和输沙量的年内分布明显具有一致性,且都集中于汛期(4—9月)。进一步分析不同时期极端降雨情景下降雨、径流和输沙量的占比可知(表2),总体上极端降雨情景下产生的降雨、径流和输沙量分别占总降雨、径流和输沙的45.95%,39.98%和86.29%。在不同时期极端降雨情景下产生的降雨、径流和输沙量略有不同,1984—1995年间三者的占比分别为44.73%、43.42%和87.79%,而1996—2020年间则分

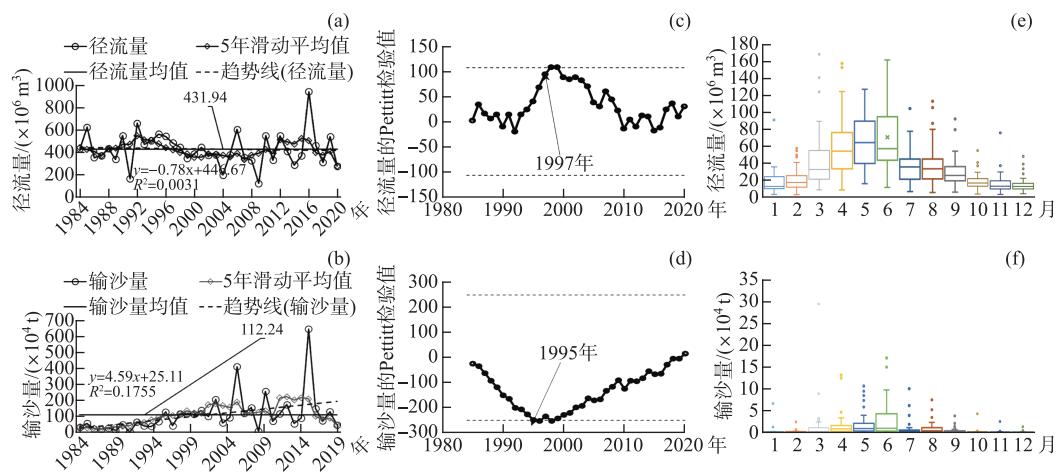


图3 濂江上游径流量和输沙量的年际变化(a,b)、突变点(c,d)和年内分布(e,f)
(其中e和f中的实线代表中位数, 叉号代表平均值, 方框的上下边界是75%和25%的分位数,
方框上下的线帽代表90%和10%的分位数, 横线上方的点为异常值)

Fig.3 Interannual variation (a, b), mutation point (c, d) and annual distribution (e, f) of runoff and sediment in Upper Lianjiang River

(Where the solid line in e and f represents the median, the cross represents the mean,
the upper and lower boundaries of the box are the 75% and 25% quartiles,
the line caps above and below the box represent the 90% and 10% quartiles,
and the dots above the horizontal line are outliers)

表2 不同时期极端降雨量及其产生的径流和输沙量和三者分别占全部降雨量、径流量和输沙量的比例

Tab.2 Extreme rainfall and runoff and sediment transport in different periods and account
for the proportion of total rainfall, total runoff and total sediment respectively

| 时期 | 水沙参数 | 均值 | 最大值 | 最小值 | 标准差 | C_V (无量纲) |
|------------|---------------------------|--------|---------|--------|--------|-------------|
| 总体 | 极端降雨量/mm | 743.00 | 1384.99 | 264.36 | 251.61 | 0.34 |
| | 占全部比例/% | 45.95 | 64.00 | 24.64 | 9.08 | 0.20 |
| | 径流量/($\times 10^6 m^3$) | 179.49 | 443.70 | 40.06 | 88.45 | 0.49 |
| | 占全部比例/% | 39.98 | 59.01 | 24.02 | 8.26 | 0.21 |
| | 输沙量/($\times 10^4 t$) | 9.83 | 61.74 | 0.45 | 10.79 | 1.10 |
| | 占全部比例/% | 86.29 | 98.95 | 64.31 | 9.79 | 0.11 |
| 1984—1995年 | 极端降雨量/mm | 721.85 | 1162.96 | 264.36 | 286.18 | 0.40 |
| | 占全部比例/% | 44.73 | 58.56 | 24.64 | 10.68 | 0.24 |
| | 径流量/($\times 10^6 m^3$) | 209.21 | 382.32 | 40.06 | 92.63 | 0.44 |
| | 占全部比例/% | 43.42 | 59.01 | 24.02 | 10.23 | 0.24 |
| | 输沙量/($\times 10^4 t$) | 3.65 | 7.14 | 0.45 | 1.99 | 0.55 |
| | 占全部比例/% | 87.79 | 98.95 | 67.53 | 10.06 | 0.11 |
| 1996—2020年 | 极端降雨量/mm | 759.27 | 1384.99 | 417.28 | 232.52 | 0.31 |
| | 占全部比例/% | 46.53 | 64.00 | 33.91 | 8.14 | 0.17 |
| | 径流量/($\times 10^6 m^3$) | 165.23 | 443.70 | 49.64 | 82.65 | 0.50 |
| | 占全部比例/% | 38.33 | 50.21 | 26.58 | 6.51 | 0.17 |
| | 输沙量/($\times 10^4 t$) | 12.80 | 61.74 | 0.74 | 11.96 | 0.93 |
| | 占全部比例/% | 85.58 | 97.48 | 64.31 | 9.58 | 0.11 |

别为46.53%、38.33%和85.58%。但3种时期的统计结果均表明极端降雨对输沙量的贡献率大于其对径流量的贡献率,相比于1984—1995年,1996—2020年极端降雨所产生的径流量和输沙量占比有缩小趋势,分别表现为从前期的43.42%、87.79%下降为后期的38.33%、85.55%。

2.3 极端降雨对濂江流域水沙变化的影响

事件尺度下降雨量、径流量和输沙量的指标内容如表3,Spearman相关性结果如图4。从图4可以看出,不同类别的指标之间均存在正相关关系;BP5与TR的相关性强于RF与TR的相关性,RF与TS的相关性强于BP5与TS的相关性。极端降雨情景下RF与TR和TS的相关系数为0.494和0.380,分别大于普通降雨情景下RF与TR和TS的相关系数0.234和0.094;极端降雨情景下BP5与TR和TS的相关系数为0.524和0.276,分别大于普通降雨情景下BP5与TR和TS的相关系数0.263和0.086。也就是说,极端降雨事件与场次径流量和输沙量的关系更紧密。

表3 事件尺度下水沙指标的标签和内容

Tab.3 Event scale labels and contents of sediment indicators

| 类别 | 指标标签 | 指标内容 |
|-----|------|-----------------------|
| 降雨量 | RF | 此次降雨事件的降雨量 |
| | BP5 | 前期降雨量,此次降雨事件前5天的累积降雨量 |
| 径流量 | TR | 一次降雨事件产生的总径流量 |
| 输沙量 | TS | 一次降雨事件产生的总输沙量 |

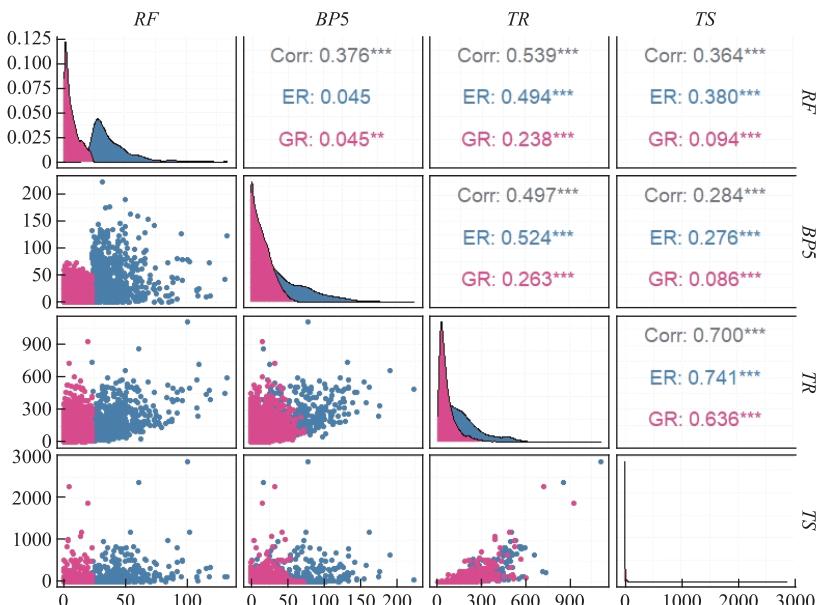


图4 极端和普通降雨事件与场次径流、输沙量的相关性分析
(下三角为散点图,对角线表示对应数据的分布状况,上三角表示相关系数及相关性水平,
Corr为全部降雨事件下对应指标的相关性水平及相关系数;ER为极端降雨事件,
GR为普通降雨事件; *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$, ***代表 $P<0.001$)

Fig.4 Correlation analysis of extreme andnormal rainfall events with runoff and sediment
(The lower triangle area shows the scatter plots, the diagonal line indicates the distribution status of the corresponding data; and the upper triangle area indicates the correlation coefficient and the level of correlation, Corr is for all rainfall events, ER is for extreme rainfall events, GR is for normal rainfall events * represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$, *** represents $P<0.001$)

通过对 2622 场次降雨事件中的降雨量 (*RF*) 和前期降雨量 (*BP5*) 与场次径流量 (*TR*) 和场次输沙量 (*TS*) 进行拟合, 得到表 4 所示的回归方程。该方程通过 *F* 检验, 且 *P*<0.001, 即 *RF* 和 *BP5* 能够正向影响 *TR* 和 *TS*。此外, 可以利用回归方程分析不同时期和降雨情景下 *RF* 和 *BP5* 对 *TR* 和 *TS* 的影响程度。相比普通降雨事件, 极端降雨事件的 *RF* 和 *BP5* 与场次径流的 *R²* 更大, 在 1984—1995 年为 0.38(普通降雨为 0.14), 在 1996—2020 年为 0.30(0.10); 极端降雨事件的 *RF* 和 *BP5* 与场次输沙的 *R²* 也要大于普通降雨事件, 具体在 1984—1995 年为 0.33(0.03), 在 1996—2020 年为 0.17(0.03)(表 4)。从表 4 还可以看出, 极端降雨事件中 *RF* 为场次径流、场次输沙的主要影响因素, 1984—1995 年标准化系数为 0.54、0.57, 1996—2020 年分别为 0.44、0.39, 而普通降雨事件中场次径流和场次输沙总体上受 *BP5* 影响更多。

表 4 极端和普通降雨事件下径流量和输沙量的标准化回归系数

Tab.4 Standardized regression coefficients of runoff and sediment transport under extreme and ordinary rainfall events

| 因变量 | 降雨类型 | 时期 | 回归方程 | 标准化系数 | | <i>R²</i> | <i>F</i> | <i>P</i> | 样本数 |
|-----|------|-----------|--|-----------|------------|----------------------|----------|----------|------|
| | | | | <i>RF</i> | <i>BP5</i> | | | | |
| 径流量 | 普通降雨 | 1984—1995 | <i>TR</i> =3.72 <i>RF</i> +2.55 <i>BP5</i> +48.80 | 0.22 *** | 0.29 *** | 0.14 | 55.803 | <0.001 | 681 |
| | 降雨 | 1996—2020 | <i>TR</i> =3.23 <i>RF</i> +2.16 <i>BP5</i> +43.37 | 0.19 *** | 0.26 *** | 0.10 | 81.457 | <0.001 | 1394 |
| | 极端降雨 | 1984—1995 | <i>TR</i> =3.90 <i>RF</i> +1.42 <i>BP5</i> -11.76 | 0.54 *** | 0.33 *** | 0.38 | 56.862 | <0.001 | 181 |
| | 降雨 | 1996—2020 | <i>TR</i> =3.79 <i>RF</i> +1.55 <i>BP5</i> -34.35 | 0.44 *** | 0.36 *** | 0.30 | 79.986 | <0.001 | 366 |
| 输沙量 | 普通降雨 | 1984—1995 | <i>TS</i> =46.02 <i>RF</i> +19.68 <i>BP5</i> +344.71 | 0.13 ** | 0.10 ** | 0.03 | 9.866 | <0.001 | 681 |
| | 降雨 | 1996—2020 | <i>TS</i> =164.23 <i>RF</i> +167.73 <i>BP5</i> +75.69 | 0.08 ** | 0.16 *** | 0.03 | 23.674 | <0.001 | 1394 |
| | 极端降雨 | 1984—1995 | <i>TS</i> =122.08 <i>RF</i> +15.46 <i>BP5</i> -2584.79 | 0.57 *** | 0.12 * | 0.33 | 45.005 | <0.001 | 181 |
| | 降雨 | 1996—2020 | <i>TS</i> =546.40 <i>RF</i> +118.10 <i>BP5</i> -15388.00 | 0.39 ** | 0.17 *** | 0.17 | 38.090 | <0.001 | 366 |

* 代表 *P*<0.05, ** 代表 *P*<0.01, *** 代表 *P*<0.001。

3 讨论

3.1 极端降雨对流域径流量和输沙量的贡献

极端降雨是一种破坏性较大的降雨, 对流域生态环境具有更大的威胁性。南方红壤区降雨季节分布极其明显, 径流、输沙在降雨时期表现得也十分突出。已有学者注意到雨季极端降雨增加的问题, 并将极端降雨的增加与径流、输沙联系起来^[32]。我国南方降雨多、河道密集, 围绕南方红壤区展开极端降雨对径流和输沙变化的研究格外重要。通过分离极端降雨和普通降雨, 发现 37 年间极端降雨情景下的降雨量、径流量和输沙量分别占全部降雨量、径流量和输沙量的 45.95%、39.98% 和 86.29%(表 2), 即极端降雨对输沙量的贡献率大于径流量。这一研究结果在国内外也被广泛认同, 如 Duan 等在鄱阳湖水系燕沟流域的研究中发现极端降雨的径流系数和土壤流失量分别是普通降雨的 2.8 倍和 11.1 倍^[11], 段剑等在赣江的一级支流梅江流域的研究中发现大雨量、短历时的降雨产生的径流和侵蚀量最多占总径流和侵蚀量的比例分别是 69.58% 和 91.84%^[33], 宋月君等在赣中吉泰盆地老虎山流域马尾松林的研究中发现大雨以上降雨类型的径流系数和单位面积侵蚀量占比分别为 56.09% 和 61.20%^[34], 以上研究区与本文研究区都位于南方红壤区的鄱阳湖水系, 且都是通过不同降雨类型对比体现出极端降雨对径流量和输沙量的异同影响, 最终结果与本研究呈现相同趋势。降雨是侵蚀发生的主要驱动因素^[35], 而大雨强的极端降雨对地表的打击程度更强, 也就会产生更严重的水土流失。极端降雨大幅增加降雨势能, 导致土壤侵蚀剧增, 同时极端降雨增加的坡面产流进一步加剧了表土冲刷, 导致坡面产沙增多; 坡面产流增加导致坡面携沙能力增强, 增加了侵蚀泥沙入河的概率, 而坡面产流增加导致的河川径流增加, 又进一步增大了河流的输沙能力。在多重影响下, 极端降雨显著增加了河流输沙, 且其对输沙的影响远大于对径流的影响。

3.2 人类活动对流域径流量和输沙量变化的影响

Du 等的研究中都发现径流量和输沙量的突变年份具有一致性^[36], 而濂江上游流域径流量和输沙量却

不同步。输沙量的突变年份(1995年)早于径流量(1997年),可能与人类活动(如园地扩张)对径流量和输沙量的影响有所不同有关。相比于1984—1995年,1996—2020年径流量有所减少但输沙量出现大幅增加,即径流量和输沙量在年际变化上呈相反趋势(图4)。如表4所示,普通和极端降雨事件中,降雨对径流量和输沙量的回归模型中的 R^2 较小(最大值为0.38),即回归模型对径流量和输沙量的解释程度较低^[37],说明濂江上游流域降雨对径流、输沙量增加的作用有限,较大部分的水沙变化是受到人类活动的影响。

濂江上游流域所在的安远县从1995年开始进行大规模园地开发,流域内园地面积由1996年的48.82 km²增加到顶峰时期2014年的192.52 km²(图5),建设用地面积在此期间也由1990年的6.24 km²增长至2020年的12.33 km²,林地由482.73 km²减少至439.11 km²。受人类活动影响,1996—2020年濂江流域年输沙量出现显著增加的状态(图3),多年平均输沙量为 12.80×10^4 t,远大于1984—1995的多年平均输沙量 3.65×10^4 t(表2)。Niu等在对全球柑橘园的综述中也表明柑橘园的快速扩张加速了土壤侵蚀^[38],Taguas等也认为山区或丘陵的果园是流域输沙量的主要来源^[39]。总之,园地扩张是濂江上游流域1996—2020年间“径流减少,泥沙增多”的重要原因。这是因为,地表植被被状况^[40]改变了原有水沙运移规律,地表植被对降雨的截流削减汇入江河湖泊的水量,直接减少降雨对地表的打击和冲刷,使得水沙源头被扼制。

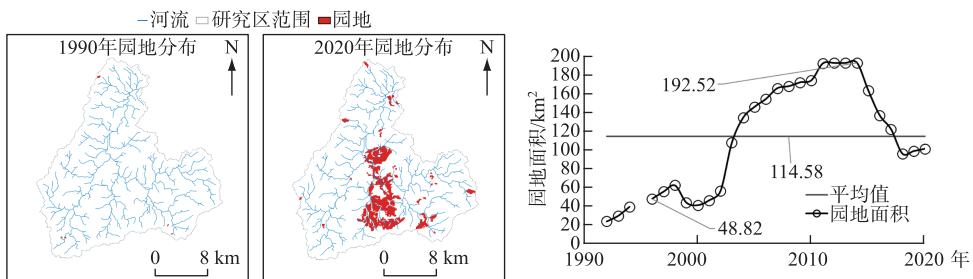


图5 濂江上游流域果园空间分布及面积变化情况

Fig.5 Spatial distribution and area changes of orchards in Upper Lianjiang Basin

3.3 不同时期极端降雨对流域水沙变化的影响解析

气候变暖、极端事件频发已经是一种共识,而径流、输沙变化对极端降雨的响应十分敏感,这势必会影响径流量和输沙量演化的进程和方向^[32]。对不同时期的径流、输沙展开研究能更好地表达极端降雨对南方红壤区径流、输沙变化的影响。

在濂江上游流域,1984—1995年内极端降雨量占总降雨量和总径流量的比例分别为44.73%和43.42%(表2),相差不大。1996—2020年内极端降雨量占总降雨量和总径流量的比例分别为46.53%和38.33%(表2),相较于1984—1995年,极端降雨量占总降雨量的比例有所上升而径流量占总径流的比例有所下降。与普通降雨事件相比,极端降雨事件对径流量和输沙量的解释度(R^2)更高,极端降雨事件中RF是影响水沙变化的主要因素,BP5发挥的作用有所下降;普通降雨则与极端降雨相反(表4)。普通降雨的多年平均雨强较低(表1),难以对表层土壤发生强烈侵蚀,而前期降雨能够增加土壤湿度,增加侵蚀发生的可能性^[41]。如表4所示,与普通降雨相比,极端降雨情景下BP5对TR和TS的标准化回归系数在1996—2020年略有增加,分别为0.36(普通降雨为0.26)和0.17(普通降雨为0.16)。前期降雨对径流量和输沙量产生显著影响,是因为前期降雨储存在土壤中增加土壤湿度,超过土壤容纳水量后能形成地表径流,能明显影响径流产量^[42]。而对于输沙过程来讲,径流将降雨击溅破碎的土壤颗粒搬移进入河流,在运输土壤颗粒的过程中也在冲刷土壤^[20]。此外,相比于1984—1995年,1996—2020年极端降雨情景下,前期降雨量对径流量和输沙量的作用程度略有增加,标准化回归系数均有所上升,分别为0.36(1984—1995年为0.33)和0.17(1984—1995年为0.12),即“径流减少,泥沙增多”的时期,前期降雨对径流量和输沙量的作用更明显。

4 结论

本文基于长时间序列水文数据,分析了1984—2020年南方红壤区鄱阳湖水系赣江上游濂江流域的径流

量和输沙量变化特征及影响因素,得出以下结论:

- 1) 在研究期内,极端降雨对输沙量的贡献率达 85% 以上,说明发生极端降雨事件的时期是流域泥沙输出的关键时期,而极端降雨对径流量的贡献弱于输沙量,贡献率达 38% 以上。
- 2) 漓江上游流域年径流量从 1984—1995 年到 1996—2020 年出现明显的下降趋势,而年输沙量从 1984—1995 年到 1996—2020 年却处于增加趋势。相比于 1984—1995 年期间,1996—2020 年期间极端降雨所产生的径流量和输沙量占比有缩小趋势。
- 3) 极端降雨情景下降雨量是影响径流量和输沙量的主要因子,而普通降雨情景下则受到前期降雨量的影响更多。但相比于 1984—1995 年,1996—2020 年极端降雨情景下前期降雨量对径流量和输沙量的标准回归系数均有所上升,即前期降雨量对“径流减少,泥沙增多”时期径流量和输沙量的影响更加明显。

5 参考文献

- [1] Ummenhofer CC, Sen Gupta A, England MH *et al.* How did ocean warming affect Australian rainfall extremes during the 2010/2011 La Niña event? *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(22): 9942-9951. DOI: 10.1002/2015gl065948.
- [2] Fang NF, Shi ZH, Yue BJ *et al.* The characteristics of extreme erosion events in a small mountainous watershed. *PLoS One*, 2013, **8**(10): e76610. DOI: 10.1371/journal.pone.0076610.
- [3] Bezak N, Sraj M, Mikos M. Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides. *Journal of Hydrology*, 2016, **541**: 272-284. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.058.
- [4] Liang Y, Li DC, Lu XX *et al.* Soil erosion changes over the past five decades in the red soil region of Southern China. *Journal of Mountain Science*, 2010, **7**(1): 92-99. DOI: 10.1007/s11629-010-1052-0.
- [5] Wen TF, Zhang FP, Hu JM *et al.* Spatiotemporal variation of rainfall erosivity during the period 1958–2014 in Ganjiang River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 7-14, 20. [温天福, 张范平, 胡建民等. 1958—2014 年赣江流域降雨侵蚀力时空变化特征. 水土保持研究, 2020, **27**(1): 7-14, 20.]
- [6] Huang JG, Liu HY. Precipitation characteristics of Gongshui Basin in the primary source of Ganjiang Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(3): 91-100. [黄建刚, 刘惠英. 赣江主源贡水流域 1957—2016 年降雨特性. 水土保持研究, 2020, **27**(3): 91-100.]
- [7] Zhang Q, Sun P, Jiang T. Changing properties causes and impacts of extreme streamflow in Lake Poyang basin, China. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 445-453. DOI: 10.18307/2011.0319. [张强, 孙鹏, 江涛. 鄱阳湖流域水文极值演变特征、成因与影响. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 445-453.]
- [8] Yin CY, Wang JY, Yu X *et al.* Definition of extreme rainfall events and design of rainfall based on the *Copula* function. *Water Resources Management*, 2022, **36**(10): 3759-3778. DOI: 10.1007/s11269-022-03229-7.
- [9] Agilan V, Umamahesh NV, Mujumdar PP. Influence of threshold selection in modeling peaks over threshold based nonstationary extreme rainfall series. *Journal of Hydrology*, 2021, **593**: 125625. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125625.
- [10] Thibaud E, Mutzner R, Davison AC. Threshold modeling of extreme spatial rainfall. *Water Resources Research*, 2013, **49**(8): 4633-4644. DOI: 10.1002/wrcr.20329.
- [11] Duan J, Liu YJ, Yang J *et al.* Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of Southern China. *Journal of Hydrology*, 2020, **582**: 124290. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124290.
- [12] Bennett B, Leonard M, Deng Y *et al.* An empirical investigation into the effect of antecedent precipitation on flood volume. *Journal of Hydrology*, 2018, **567**: 435-445. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.025.
- [13] Wasko C, Nathan R, Stein L *et al.* Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 126994. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126994.
- [14] Du J, Cheng LL, Zhang Q. Spatiotemporal variability and trends in the hydrology of the Xiang River Basin, China: Extreme precipitation and streamflow. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, **12**(18): 1-12. DOI: 10.1007/s12517-019-4731-3.
- [15] Ran QH, Zong XY, Ye S *et al.* Dominant mechanism for annual maximum flood and sediment events generation in the Yellow River Basin. *CATENA*, 2020, **187**: 104376. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104376.
- [16] Hung C, Lin GW, Kuo HL *et al.* Impact of an extreme typhoon event on subsequent sediment discharges and Rainfall-Driven Landslides in affected mountainous regions of Taiwan. *Geofluids*, 2018: 1-11. DOI: 10.1155/2018/8126518.
- [17] Liang Y, Jiao JY, Tang BZ *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. *Journal of Hydrology*, 2020, **584**: 124694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124694.
- [18] Zhao Y, Cao WH, Hu CH *et al.* Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events. *CATENA*, 2019, **177**: 31-40. DOI: 10.1016/j.catena.2019.02.001.
- [19] Cea L, Fraga I. Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 2018, **54**(11): 8774-8791. DOI: 10.1029/2018wr023194.

- [20] Shi ZH, Song CQ. Water erosion processes: A historical review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(5): 1-10. DOI: 10.13870/j.cnki.stbexb.2016.05.001. [史志华, 宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 1-10.]
- [21] Nie XF, Zheng HJ, Tu AG et al. Long-term soil and water conservation in red soil region of Southern China significantly reduced riverine sediment load: A case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 935-946. DOI: 10.18307/2021.0326. [聂小飞, 郑海金, 涂安国等. 南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙——以鄱阳湖流域赣江上游平江为例. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 935-946.]
- [22] Hu HC, Wen JE, Peng ZY et al. High-frequency monitoring of the occurrence of preferential flow on hillslopes and its relationship with rainfall features, soil moisture and landscape. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, **64**(11): 1385-1396. DOI: 10.1080/02626667.2019.1638513.
- [23] Liao KT, Hu JM, Song YJ et al. Effects of vegetation landscape patterns on runoff and sediment in red soil hilly region of southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 36-42,50. [廖凯涛, 胡建民, 宋月君等. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系. 水土保持学报, 2019, **33**(3): 36-42,50.]
- [24] 江西省水利厅. 江西河湖大典. 武汉: 长江出版社, 2010.
- [25] Seleshi Y, Zanke U. Recent changes in rainfall and rainy days in Ethiopia. *International Journal of Climatology*, 2004, **24**(8): 973-983. DOI: 10.1002/joc.1052.
- [26] Wang DB, Hagen SC, Alizad K. Climate change impact and uncertainty analysis of extreme rainfall events in the Apalachicola River Basin, Florida. *Journal of Hydrology*, 2013, **480**: 125-135. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.015.
- [27] Wei W, Chen LD, Fu BJ et al. Extreme rainfall events and their effects on runoff and sediment yield in the loess hilly area. *Arid Land Geography*, 2007, **30**(6): 896-901. [卫伟, 陈利顶, 傅伯杰等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响. 干旱区地理, 2007, **30**(6): 896-901.]
- [28] Ignaccolo M, De Michele C. A point based Eulerian definition of rain event based on statistical properties of inter drop time intervals: An application to Chilbolton data. *Advances in Water Resources*, 2010, **33**(8): 933-941. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.04.002.
- [29] Marttila H, Kløve B. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. *Journal of Hydrology*, 2010, **388**(3/4): 414-425. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.05.026.
- [30] Römkens MJM, Helming K, Prasad SN. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *CATENA*, 2002, **46**(2/3): 103-123. DOI: 10.1016/S0341-8162(01)00161-8.
- [31] Pettitt AN. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 1979, **28**(2): 126. DOI: 10.2307/2346729.
- [32] Duan J, Liu YJ, Tang CJ et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations. *Journal of Environmental Management*, 2021, **278**: 111537. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111537.
- [33] Duan J, Wang LY, Xiao SS. Runoff and sediment control effects of typical soil and water conservation patterns in red sandstone erosion region. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(6): 227-233. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.35. [段剑, 王凌云, 肖胜生. 红砂岩侵蚀区典型水土流失治理模式减流减沙效应. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(6): 227-233.]
- [34] Song YJ, Huang YH, Yang J et al. The characteristics of soil and water loss in *Pinus massoniana* forest in red soil region of Jiangxi Province and the effect of soil and water conservation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(4): 119-125. [宋月君, 黄炎和, 杨洁等. 赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(4): 119-125.]
- [35] Panagos P, Ballabio C, Borrelli P et al. Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment*, 2015, **511**: 801-814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.01.008.
- [36] Du M, Mu XM, Zhao CJ et al. Changes in runoff and sediment load and potential causes in the Malian River Basin on the loess plateau. *Sustainability*, 2021, **13**(2): 443. DOI: 10.3390/su13020443.
- [37] Zhou C, Feng YD, Xiao KX et al. Research on water requirement in northeast area based on multiple linear regression model. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, **44**(1): 118-123. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2014.01.016. [周晨, 冯宇东, 肖匡心等. 基于多元线性回归模型的东北地区需水量分析. 数学的实践与认识, 2014, **44**(1): 118-123.]
- [38] Niu YH, Wang L, Wan XG et al. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide. *CATENA*, 2021, **206**: 105558. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105558.
- [39] Taguas EV, Moral C, Ayuso JL et al. Modeling the spatial distribution of water erosion within a Spanish olive orchard microcatchment using the SEDD model. *Geomorphology*, 2011, **133**(1/2): 47-56. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.018.
- [40] Guo H, Jiang T. Trend analysis of flood peak/dry season flowrate in Poyang Lake Basin. *Journal of Natural Disasters*, 2008, **17**(3): 75-80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2008.03.013. [郭华, 姜彤. 鄱阳湖流域洪峰流量和枯水流量变化趋势分析. 自然灾害学报, 2008, **17**(3): 75-80.]
- [41] Zhai XY, Guo L, Liu RH et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rainfall variability on flash flood warning index at catchment scale. *Geographical Research*, 2019, **38**(12): 2957-2965. DOI: 10.11821/dlyj20181338. [翟晓燕, 郭良, 刘荣华等. 前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估. 地理研究, 2019, **38**(12): 2957-2965.]
- [42] Li XY, Xie ZK, Yan XK. Runoff characteristics of artificial catchment materials for rainwater harvesting in the semiarid regions of China. *Agricultural Water Management*, 2004, **65**(3): 211-224. DOI: 10.1016/j.agwat.2003.09.003.