

不同时间尺度濂水流域水沙变化及其驱动因素分析

盛菲^{1,2}, 刘士余^{1,2}, 余敏琪^{1,2}, 戴余典^{1,2}

(1.江西农业大学国土资源与环境学院,南昌 330045;2.江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,南昌 330045)

摘要:为深入分析流域水沙变化特征及其驱动因素,揭示水沙变化机理机制。以赣南濂水流域为研究区,基于 1965—2020 年的水文气象数据和土地利用数据,在年尺度和场次暴雨尺度,利用 Mann-Kendall 检验法、累积距平法、水沙关系曲线、经验统计分析法等,分析水沙变化特征,建立不同时期水沙关系,并定量评估降雨变化和人类活动对水沙变化的贡献率。结果显示:(1)在年尺度,流域径流深、输沙量分别呈非显著下降和极显著上升趋势,突变年份分别为 1998 年和 1995 年。(2)与基准期相比,变化期不同时间尺度的径流深和输沙量波动更大,且水沙相关性均增强,表征外界人为干扰的参数(a)和河流本身输沙能力的参数(b)均增大。(3)在年尺度和场次暴雨尺度,降雨变化和人类活动对径流减少的贡献率分别为 -1.1% , 101.1% 和 30.2% , 69.8% ,对输沙增加的贡献率分别为 0.5% , 99.5% 和 -2.0% , 102.0% 。研究成果可为流域的水沙合理调控及生态可持续发展奠定基础。

关键词: 年尺度; 场次暴雨尺度; 水沙变化; 水沙关系; 驱动因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0201-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.026

Analysis of Runoff and Sediment Variation and Its Driving Factors in Lianshui Watershed at Different Time Scales

SHENG Fei^{1,2}, LIU Shiyu^{1,2}, YU Minqi^{1,2}, DAI Yudian^{1,2}

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045;

2.Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045)

Abstract: In order to deeply analyze the characteristics and driving factors of runoff and sediment variation in watershed, and reveal the mechanism of runoff and sediment variation, the Lianshui watershed located in southern Jiangxi province was selected as the research area. Based on the hydro-meteorological and land use data from 1965 to 2020, at the annual scale and single rainstorm scale, we used the Mann-Kendall test method, cumulative anomaly method, runoff-sediment relationship curve and empirical statistical analysis method to analyze the characteristics of runoff and sediment variation, then established runoff-sediment relationship in different periods, and quantitatively evaluated the contribution rate of precipitation variation and human activities to the change of runoff and sediment. The results showed that at the annual scale, the runoff depth and sediment discharge showed a non-significant downward and extremely significant upward trend, respectively, and the abrupt change years were 1998 and 1995, respectively. Compared with the baseline period, the runoff depth and sediment discharge in different time scales of the changing period fluctuated more greatly, and the correlation between runoff and sediment was increased. The parameter a representing external human interference and the parameter b representing the sediment transport capacity of the river were increased. At the annual scale and single rainstorm scale, the contribution rate of precipitation variation and human activities to the decrease of runoff were -1.1% , 101.1% and 30.2% , 69.8% , respectively, while to the increase of sediment discharge were 0.5% , 99.5% and -2.0% , 102.0% , respectively. The research results could provide a basis for reasonable regulation of runoff and sediment, as well as the sustainable ecological development of watershed.

收稿日期: 2022-10-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(31960331)

第一作者: 盛菲(1996—),女,博士研究生,主要从事水土保持与森林水文研究。E-mail: 438000270@qq.com

通信作者: 刘士余(1975—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事水土保持与森林水文研究。E-mail: 397013250@qq.com

Keywords: annual scale; single rainstorm scale; runoff and sediment variation; runoff-sediment relationship; driving factors

近年来,在全球气候变化和人类活动干扰背景下,许多流域水沙过程发生显著变化^[1]。气候变化和人类活动主要通过改变降雨、气温及下垫面条件等影响流域产汇流和泥沙输移过程^[2],进而导致洪涝灾害发生频率增加以及泥沙严重淤积。流域水沙变化及其驱动因素探究成为生态水文领域的热点问题。

水沙关系反映流域水沙变化的重要方面,有助于深入分析水沙变化规律及其驱动因素^[3],目前,相关研究采用的方法多为水沙关系曲线,黎铭等^[4]在皇甫川流域、夏绍钦等^[5]在涪江流域建立年尺度上的水沙关系曲线均指出,退耕还林还草、水利水保工程等外界因素对流域产流产沙的影响逐渐增大,而流域本身的输沙能力逐渐下降;Hu 等^[6]构建年尺度上长江流域不同时期的水沙关系曲线得出,三峡大坝的建设改变流域的泥沙输移过程;Zhao 等^[7]在延河流域的研究显示,由于水土保持措施的大规模实施,流域次洪条件下的水沙相关性明显下降。同时,为定量区分气候变化和人类活动对流域水沙变化的影响,学者们也开展大量研究,冉大川等^[8]通过水文法得到,降雨变化和人类活动对西柳沟流域减水减沙的贡献率分别为 54.9%,45.1%和 63.3%,36.7%;刘强等^[9]在延河流域采用双累积曲线法计算的降雨和土地利用变化对径流、输沙减少的贡献率分别为 19.4%,80.6%和 8.1%,91.9%;Miao 等^[10]采用水文法在黄河流域的研究显示,气候变化和人类活动对黄河上游地区水沙减少的贡献率分别为 17.0%,83.0%和 14.0%,86.0%,对中游地区的贡献率分别为 71.0%,29.0%和 48.0%,52.0%;金双彦等^[11]利用降雨—水量—沙量模型计算的降雨变化和人类活动对孤山川流域场次洪水量、沙量减少的贡献率分别为 65.7%,34.3%和 72.9%,27.1%。

综上可知,在退耕还林还草、水利水保工程等外界因素的作用下,流域水沙关系发生显著改变,且在定量分析水沙变化驱动因素的作用程度时,由于研究区域、研究方法等的差异,其主导因素及贡献率大小均不尽相同。暴雨作为产流产沙的主要驱动力,对流域径流汇集和泥沙输移过程影响显著^[12],在暴雨洪水频发的南方地区开展相关研究至关重要。同时,我国赣南地区近 30 年进行规模化果园开发,导致水土流失严重、产流产沙过程发生显著变化。因此,以赣南濂水流域为研究对象,基于 1965—2020 年的水文气象数据和土地利用数据,在年尺度和场次暴雨尺度,分析流域径流、输沙的变化特征,建立不同时期水沙关系,定量计算降雨

变化和人类活动对水沙变化的贡献率,并探讨不同时间尺度贡献率差异的机理机制。旨在为流域生态环境建设、水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

濂水为赣江上游支流,流经安远、于都、会昌 3 县,发源于赣州市安远县欣山镇,在会昌县庄口镇流入贡江,随后汇入赣江(图 1)。该流域气候类型属亚热带湿润季风气候,具有雨量充沛、气候温和、日照充足等特点。年均降水量为 1 596.5 mm,降水主要集中在 3—9 月。年均径流深为 787.1 mm,洪水多发生在 4—6 月。地形以低山丘陵为主,东南西高、北低,海拔为 97~1 078 m。土壤类型主要为红壤,植被类型以马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为主。

羊信江水文站(25°18'21"N,115°23'15"E)设立于 1958 年,位于安远县版石镇竹篙仁村,是濂水流域的主要控制站点,研究区为该水文站的控制范围,集水面积为 569 km²,全部位于安远县境内。安远县生态环境优越,森林覆盖率达 84%。同时,由于退耕还林工程的实施、果园的持续开发、城镇化建设等,景观格局变化十分显著,为开展研究奠定重要基础。

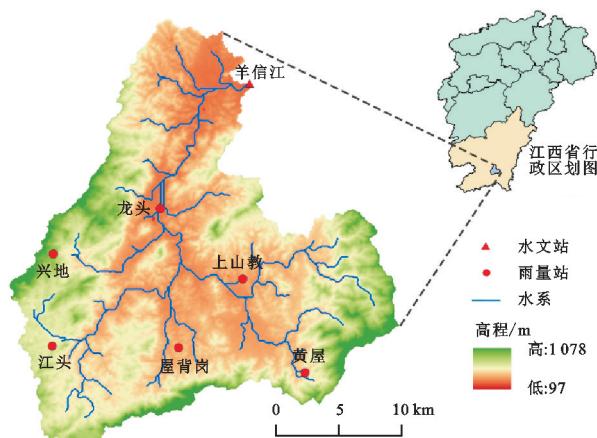


图 1 濂水流域示意

1.2 数据来源

1965—2020 年逐日降雨数据和降雨量摘录表来源于江西省水文局羊信江水文站及黄屋、上山教、屋背岗、江头、兴地、龙头 6 个配套雨量站,面降雨量采用泰森多边形法加权平均得到;逐日径流、输沙数据以及洪水水文要素摘录表、洪水含沙量摘录表来源于羊信江水文站。根据中国气象局规定,24 h 降雨量达到 50 mm 或 12 h 降雨量达到 30 mm 以上的强降

雨称为“暴雨”^[13],在暴雨场次的划分过程中,将降雨间歇时间 6 h 作为 2 次降雨的分界。洪水过程指自基流起涨至最大流量,并回落至接近涨水前流量的过程。据此整理得到 1965—2020 年 120 场暴雨的降雨、径流及输沙数据。

土地利用数据(1980 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心数据平台(<http://www.resdc.cn>)。在景观类型提取过程中,结合研究区情况,将濂水流域景观类型分为耕地、有林地、灌木林、疏林地、其他林地、草地、水域、建设用地和未利用地 9 种。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势检验和突变分析 时间序列的趋势检验采用 Mann-Kendall(M-K)检验法,当检验统计量 Z 的绝对值 $>1.96(2.58)$ 时,表明趋势达到 0.05(0.01)显著性水平^[14]。

径流深和输沙量的突变分析采用累积距平法和滑动 t 检验。累积距平法可通过曲线变化反映时间序列的变化状态,当曲线发生连续性明显偏转时,则认为开始发生偏转的点可能为突变点,并应用滑动 t 检验分析该点的 t 统计量是否超过置信区间,据此判定突变点^[14]。

水沙关系的突变分析采用双累积曲线法。该方法通过曲线斜率的变化反映水沙关系的变化,当曲线斜率发生明显偏转时,则认为开始发生偏转的点为突变点^[14]。

1.3.2 水沙关系曲线 水沙关系曲线是用于评价流域水沙关系的常用手段^[4-5],其表达式为:

$$C_s = aQ^b \quad (1)$$

式中: C_s 为输沙量(10^4 t)或含沙量(kg/m^3); Q 为径流深(mm)或流量(m^3/s); 参数 a 为流域产流产沙特性,该值越大,说明流域水沙变化受人类活动的干扰越大; 参数 b 为河流自身的输沙能力,反映水流挟沙能力的大小,受流速、流量、泥沙级配比等内部因素影响,与河床形态、河流断面有关。

1.3.3 贡献率计算 采用经验统计分析法计算降雨变化和人类活动对水沙变化的贡献率。具体计算过程为^[15]:

(1) 设基准期 and 变化期的实测平均降雨量分别为 $\overline{P_1}$ 、 $\overline{P_2}$, 实测平均径流深分别为 $\overline{R_1}$ 、 $\overline{R_2}$, 则降雨变化和人类活动所引起的径流变化总量 ΔR 为:

$$\Delta R = \overline{R_1} - \overline{R_2} \quad (2)$$

(2) 建立基准期降雨量与径流深之间的经验统计方程为:

$$R = f(P) \quad (3)$$

将变化期实测平均降雨量($\overline{P_2}$)代入式(3)中得到变化期降雨在基准期条件下的模拟平均径流深($\overline{R_1'}$);

(3) 降雨变化和人类活动引起的径流变化量 ΔR_P 、 ΔR_L 分别为:

$$\Delta R_P = \overline{R_1} - \overline{R_1'} \quad (4)$$

$$\Delta R_L = \overline{R_1'} - \overline{R_2} \quad (5)$$

进而计算降雨变化和人类活动对径流变化的贡献率 C_P 、 C_L 分别为:

$$C_P = \frac{\Delta R_P}{\Delta R_P + \Delta R_L} \times 100\% \quad (6)$$

$$C_L = \frac{\Delta R_L}{\Delta R_P + \Delta R_L} \times 100\% \quad (7)$$

同理,计算降雨变化和人类活动对输沙变化的贡献率。

1.3.4 景观格局演变分析 采用转移矩阵反映各景观类型的相互转化情况,选取斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)和景观蔓延度指数(CONTAG)反映景观水平上的景观格局演变特征^[16]。

2 结果与分析

2.1 水沙变化特征

为分析流域不同时期的水沙变化特征,结合累积距平法和滑动 t 检验对径流输沙序列进行突变分析(图 2)。可知,年径流深累积距平曲线在 1972—1998 年呈上升趋势,在 1965—1972 年和 1998—2020 年呈下降趋势,1972 年和 1998 年曲线发生明显偏转,且 t 统计量在 1998 年超过置信区间,据此判定径流深的突变点为 1998 年,在此基础上将径流序列划分为 1965—1998 年(基准期)和 1999—2020 年(变化期); 年输沙量累积距平曲线在 1965—1995 年和 1997—2020 年分别呈下降、上升趋势,1995 年和 1997 年曲线发生明显偏转,且 t 统计量在 1995 年超过置信区间,据此判定输沙量的突变点为 1995 年,在此基础上将输沙序列划分为 1965—1995 年(基准期)和 1996—2020 年(变化期)。年径流深和年输沙量的突变年份不一致,可能是在人类活动干扰加剧的情况下,流域地表扰动面积增大,裸露的土壤和其他风化物增多,土壤侵蚀加剧,进而导致输沙量急剧上升^[17],其突变年份与径流深不同步。

2.1.1 年尺度 由濂水流域 1965—2020 年径流深和输沙量变化趋势(图 3)可知,流域年径流深、输沙量分别表现出非显著下降和极显著上升趋势,年均变

率分别为 0.212 mm/a, 0.289×10^4 t/a; 年径流深的多年平均值为 773.7 mm, 最大值(1 661.7 mm)出现在 2016 年, 最小值(218.5 mm)出现在 2009 年, 极值比和变差系数(CV)分别为 7.6 和 0.38; 年输沙量的

多年平均值为 9.08×10^4 t, 最大值(64.31×10^4 t)出现在 2016 年, 最小值(0.57×10^4 t)出现在 1991 年, 极值比和变差系数(CV)分别为 112.80 和 1.13。由此可知, 输沙量的年际变化幅度远高于径流深。

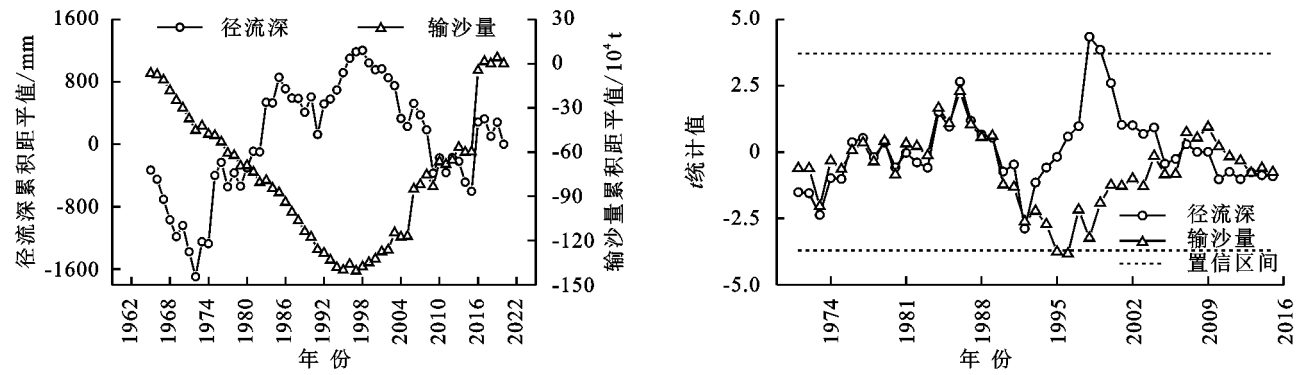


图 2 濂水流域 1965—2020 年径流深、输沙量累积距平曲线及滑动 t 检验

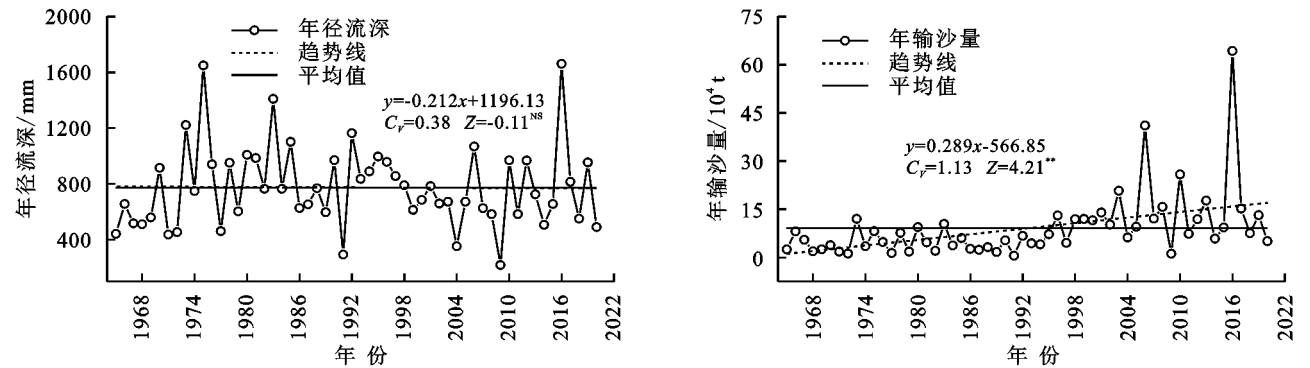


图 3 濂水流域 1965—2020 年径流深、输沙量变化趋势

基于突变分析结果,统计年尺度不同时期的水沙特征值(表 1)。与基准期相比,变化期径流深平均值减少11.1%,极值比和变差系数(CV)分别增加 35.7%, 13.9%, 而输沙量平均值、极值比和变差系数(CV)分

别增加 222.1%, 162.6%, 48.3%, 且在不同时期, 输沙量的极值比和变差系数(CV)均高于径流深。可知, 相对于基准期, 变化期径流深和输沙量的年际波动更大, 且输沙量的变化比径流深强烈。

表 1 年尺度不同时期水沙特征值

水文要素	时期	平均值	极值比	变差系数(CV)
径流深/mm	基准期(1965—1998 年)	809.00	5.6	0.36
	变化期(1999—2020 年)	719.00	7.6	0.41
	变化期相对基准期的变化率/%	-11.10	35.7	13.90
输沙量/ 10^4 t	基准期(1965—1995 年)	4.56	21.1	0.60
	变化期(1996—2020 年)	14.69	55.4	0.89
	变化期相对基准期的变化率/%	222.10	162.6	48.30

2.1.2 场次暴雨尺度 基于濂水流域 1965—2020 年 120 场暴雨对应的径流深和输沙量数据得到, 场次暴雨尺度不同时期的水沙特征统计结果(表 2)。与基准期相比, 变化期径流深平均值和极值比分别降低 13.2%, 13.1%, 变差系数(CV)上升 11.9%; 输沙量平均值、极值比和变差系数(CV)分别上升 234.9%, 241.6%, 4.0%, 且在整个时段、基准期和变化期, 输沙量的极值比和变差系数(CV)均远高于径流深。说明在场次暴雨尺度上, 变化期径流深和输沙量的离散程度较高, 且输沙量比径流

深波动更强烈, 与年尺度上的水沙变化特征相似。

2.2 水沙关系变化

为分析流域不同时期水沙关系的变化, 建立年径流深与年输沙量的双累积曲线(图 4)。曲线斜率在 1995 年发生明显偏转, 即可判定水沙变化的突变点为该年份。与年输沙量的突变点一致, 可能是输沙量剧烈变化所致。

由图 5 可知, 在年尺度和场次暴雨尺度, 流域的径流深和输沙量在不同时期均满足幂函数关系, 拟合

效果较好,且变化期水沙相关性强于基准期;在径流深相同的条件下,变化期输沙量高于基准期。

基于日径流深和日输沙量数据,逐年建立水沙关系曲线,得到不同年份的参数 a 和 b ;基于每场暴雨洪水的流量和含沙量数据,逐场建立水沙关系曲线,得到不同场次的参数 a 和 b 。在年尺度和场次暴雨尺度分别建立不同时期参数 a 和 b 的关系曲线(图 6)可知,相对于基准期,变化期的 a 值和 b 值明显增大,表明流域产流产沙特性受外界人类活动的影响增大,且河流本身的输沙能力增强;当 b 值相同时,变化

期 a 值明显增加,说明河流本身的输沙能力保持不变时,外界人类活动对流域的作用增强。此外,变化期 a 值相对基准期的增量随着 b 值的增加而逐渐下降,说明河流本身的输沙能力增强时,外界人为因素对流域产流产沙的影响逐渐减弱。表明河流泥沙的来源为流域侵蚀和河道冲刷,前者主要受外界人为因素的影响,后者主要与河道形态因子有关^[17]。当河道冲刷作用加剧、河流本身的输沙能力增强时,由外界人为因素作用产生的泥沙量占总泥沙量的比例下降,水沙关系随之改变,其影响逐渐减弱。

表 2 场次暴雨尺度不同时期水沙特征值

水文要素	时期	平均值	极值比	变差系数(CV)
径流深/mm	整个时段(1965—2020 年)	38.00	27.4	0.62
	基准期(1965—1998 年)	40.20	26.8	0.59
	变化期(1999—2020 年)	34.90	23.3	0.66
	变化期相对基准期的变化率/%	−13.20	−13.1	11.90
输沙量/ 10^4 t	整个时段(1965—2020 年)	1.82	700.1	1.56
	基准期(1965—1995 年)	0.86	202.6	1.24
	变化期(1996—2020 年)	2.88	692.1	1.29
	变化期相对基准期的变化率/%	234.90	241.6	4.00

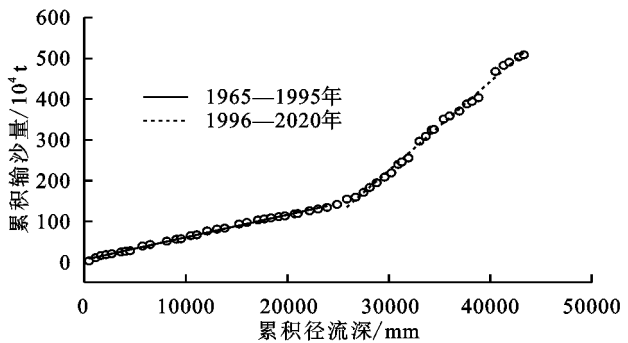


图 4 濠水流域年径流深与年输沙量的双累积曲线

2.3 水沙变化贡献率计算

由径流深突变分析结果可知,在年尺度和场次暴雨尺度对基准期(1965—1998 年)的降雨量和径流深

进行回归分析,得到回归方程分别为 $y = 0.961\ 7x - 713.04(r = 0.932)$, $y = 0.467\ 9x + 0.687\ 2(r = 0.811)$ 。在年尺度和场次暴雨尺度,基准期径流深实测平均值分别为809,40.2 mm,变化期径流深实测平均值分别为719.0,34.9 mm,将变化期不同时间尺度的平均降雨量1 583.7,81.0 mm代入相应方程中得到的径流深模拟平均值分别为810.0,38.6 mm,进而计算得到降雨变化和人类活动对径流减少的贡献率分别为−1.1%,101.1%和30.2%,69.8%(表 3)。同时,相对于基准期,变化期的平均径流深分别减少90.0,5.3 mm,平均降雨量分别增加0.07%和减少4.14%,因而降雨变化对径流减少的贡献率分别为负、正。

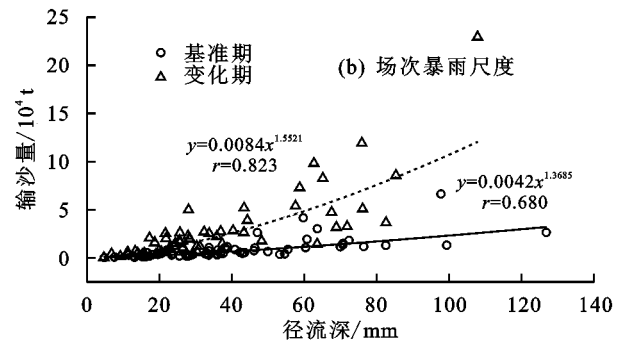
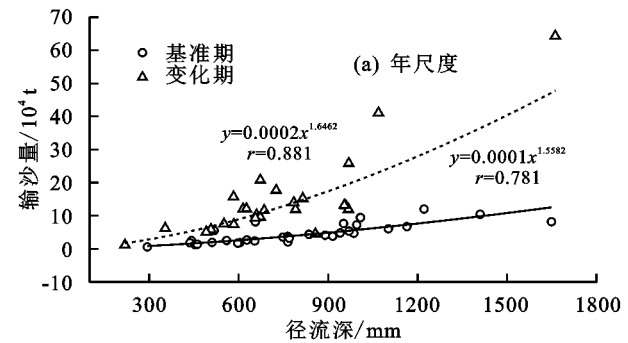


图 5 年尺度和场次暴雨尺度不同时期水沙关系曲线

根据输沙量突变分析结果,在年尺度和场次暴雨尺度对基准期(1965—1995 年)的降雨量和输沙量进行回归分析,得到回归方程分别为 $y = 0.007\ 2x - 6.845\ 9(r = 0.729)$, $y = 0.01x + 0.011\ 6(r = 0.401)$ 。在年

尺度和场次暴雨尺度,基准期输沙量实测平均值分别为 4.56×10^4 , 0.86×10^4 t,变化期输沙量实测平均值分别为 14.69×10^4 , 2.88×10^4 t,将变化期不同时间尺度的平均降雨量1 591.6,81.2 mm代入相应方程中得到输沙量

模拟平均值分别为 4.61×10^4 , 0.82×10^4 t, 进而计算降雨变化和人类活动对输沙增加的贡献率分别为 0.5%, 99.5% 和 -2.0%, 102.0% (表 3)。同时, 相对于基准期, 变化期的平均输沙量分别增加 10.13×10^4 , 2.02×10^4 t, 平均降雨量分别增加 0.98% 和减少 4.02%, 因而降雨变化对输沙增加的贡献率分别为正、负。

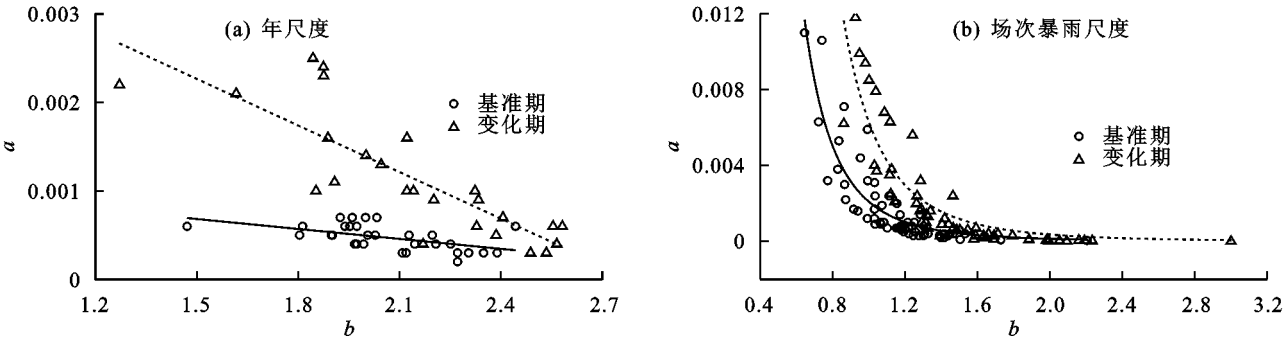


图 6 年尺度和场次暴雨尺度不同时期参数 a 和 b 的变化

表 3 不同时间尺度降雨变化和人类活动对水沙变化的贡献率

时间 尺度	径流减少				输沙增加			
	降雨变化		人类活动		降雨变化		人类活动	
	变化量/mm	贡献率/%	变化量/mm	贡献率/%	变化量/ 10^4 t	贡献率/%	变化量/ 10^4 t	贡献率/%
年尺度	-1.00	-1.1	91.00	101.1	-0.05	0.5	-10.08	99.5
场次暴雨尺度	1.60	30.2	3.70	69.8	0.04	-2.0	-2.06	102.0

3 讨论

濂水流域径流深和输沙量分别呈下降和上升趋势, 且输沙量变化极显著, 同时, 水沙关系也发生明显变化。降雨变化和人类活动是流域水沙变化的重要驱动因素。降雨是流域产水产沙的外力, 是影响水沙变化的直接因素; 流域内退耕还林工程的实施、果园的规模化开发、城镇化建设等主要人类活动导致景观格局发生显著变化, 进而影响流域的产汇流和侵蚀产沙机制。

对于径流变化, 场次暴雨尺度的降雨变化贡献率远高于年尺度, 可能是由于濂水流域气候湿润, 场次暴雨特征在一定程度上决定产流过程的变化, 其作用

由表 3 可知, 在不同时间尺度, 人类活动是流域水沙变化的主导因素, 与刘强等^[9]在延河流域、Miao 等^[10]在黄河上游地区、谢敏等^[18]在北洛河流域的研究结果一致, 可能是流域内土地利用变化、水利水电工程的实施等人类活动的干扰加剧, 进而对水沙变化产生显著影响并占据主导地位。

更为直接^[19]; 而流域年降雨量呈非显著上升趋势且变化幅度较小, 因而导致年尺度的降雨变化贡献率较低。同时, 人类活动对流域不同时间尺度的径流变化起主导作用。由表 4 可知, 林地是流域内的景观基质, 总面积由 1980 年的 $48\,358.36\text{ hm}^2$ 上升至 2020 年的 $49\,421.91\text{ hm}^2$, 林地植被通过林冠层截留降雨、减少降雨动能, 枯枝落叶层吸收降雨、分散和滞缓地表径流^[20], 导致径流量减少; 而在景观水平上 (图 7), 流域内各景观类型相互转化, 景观破碎度和异质性提高、优势斑块类型的连通性降低、空间分布逐渐均衡、形状趋于复杂, 增强地表景观对径流的阻滞作用, 增加降雨入渗, 使径流量减少^[16,21]。

表 4 1980—2020 年濂水流域景观类型转移矩阵

单位: hm^2

类型	2020 年									
	草地	耕地	灌木林	建设用地	其他林地	疏林地	水域	未利用地	有林地	合计
1980 年	草地	69.02	36.24	1.55	8.47	1.37	1.82	0	0	560.08
	耕地	3.46	4747.28	484.50	1011.61	620.73	110.63	28.32	0.55	7434.33
	灌木林	44.62	14.75	4126.11	42.98	241.57	10.65	0.73	0	4624.21
	建设用地	0.36	15.21	3.10	506.72	7.74	5.83	0	0	544.14
	其他林地	0	0.09	7.38	0	5.01	0	0	0	39.79
	疏林地	2.19	154.79	670.07	127.66	1550.22	4544.51	0.46	12.11	7662.97
	水域	0	0.09	0	0	0	0.55	2.46	0	3.10
	有林地	85.68	425.50	1047.03	135.40	2421.99	491.96	1.37	0	36031.39
	合计	205.33	5393.95	6339.72	1832.83	4848.62	5165.95	33.33	12.66	56900.00

对输沙变化而言,年尺度和场次暴雨尺度的降雨变化贡献率均较低,可能由于流域输沙量变化剧烈,而变化期降雨量相对基准期的变化幅度相对较小,进而导致降雨变化对输沙变化的影响程度较低。同时,人类活动对流域不同时间尺度的输沙变化起主导作用。濂水流域位于我国赣南红壤丘陵区,近 30 年来,经历大面积规模化果园开发,流域内其他林地的面积

大幅增加,由 1980 年的 39.79 hm² 上升至 2020 年的 4 848.62 hm²(表 4),且流域内有林地主要为 20 世纪飞播造林的马尾松,林下树种单一、地表裸露严重,同时建设用地的扩张将直接破坏地表植被、增大扰动面积^[22],进而导致输沙量急剧增加;而景观水平上的整体变化加剧了流域内土壤侵蚀,增大径流的挟沙能力,使得输沙量大幅增加^[23]。

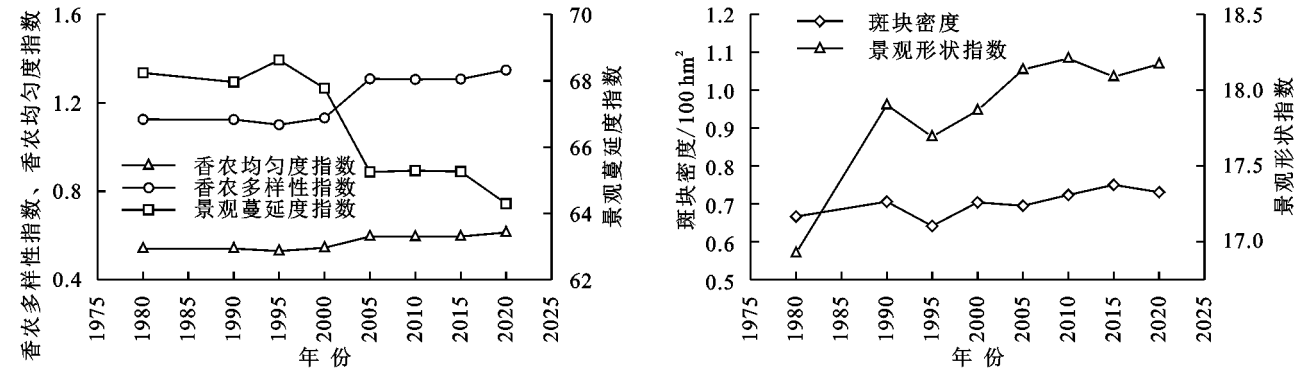


图 7 1980—2020 年濂水流域景观水平上景观格局指数变化特征

此外,在场次暴雨尺度,人类活动对输沙变化的贡献率远高于径流变化。可能是由于人类活动导致沙源供应充足,且流域场次暴雨条件下的侵蚀产沙严重,场次输沙量平均值占年输沙量平均值的 20.0%,而场次径流深平均值仅占年径流深平均值的 4.9%,因而人类活动对输沙变化的影响程度更高。

4 结论

(1)在年尺度,濂水流域的径流深和输沙量分别以 0.212 mm/a,0.289×10⁴ t/a 的速率呈非显著下降和极显著上升,其突变点分别为 1998 年和 1995 年。在变化期,不同时间尺度的径流深和输沙量波动较大,且输沙量变化尤为强烈,其平均值、极值比和变差系数(CV)在年尺度相对基准期分别上升 222.1%,162.6%,48.3%,在场次暴雨尺度分别上升 234.9%,241.6%,4.0%。

(2)年径流深与年输沙量的双累积曲线在 1995 年发生突变。在年尺度和场次暴雨尺度,外界人为因素对流域产流产沙特性的影响以及河流本身输沙能力均增大。

(3)在年尺度和场次暴雨尺度,以景观格局演变为主导的人类活动是流域水沙变化的主要影响因素,而降雨变化仅在场次暴雨尺度对径流变化的影响较大。

参考文献:

[1] Li L, Ni J R, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers[J].Science Bulletin,2020,65(1):62-69.
[2] Buendia C, Bussi G, Tuset J, et al. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean

catchment[J].Science of the Total Environment, 2016,540:144-157.
[3] Borrelli P, Marker M, Schutt B. Modelling post-tree-harvesting soil erosion and sediment deposition potential in the Turano River Basin (Italian Central Apennine) [J].Land Degradation and Development, 2015, 26 (4): 356-366.
[4] 黎铭,张会兰,孟铖铖.黄河皇甫川流域水沙关系特性及关键驱动因素[J].水利水电科技进展,2019,39(5):27-35.
[5] 夏绍钦,张会兰,郝佳欣,等.长江涪江小河坝站水沙关系特性及其驱动因素研究[J].长江流域资源与环境, 2021,30(7):1603-1613.
[6] Hu B Q, Wang H J, Yang Z S, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications [J].Quaternary International,2011,230:34-43.
[7] Zhao G J, Yue X L, Tian P, et al. Comparison of the suspended sediment dynamics in two loess plateau catchments, China[J].Land Degradation and Development,2017,28(4):1398-1411.
[8] 冉大川,张栋,焦鹏,等.西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):143-149.
[9] 刘强,穆兴民,赵广举,等.延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].干旱区资源与环境,2021, 35(7):129-135.
[10] Miao C, Ni J, Borthwick A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River[J].Global and Planetary Change,2011,76 (3/4):196-205.

- 磷积累的影响[J].生态学报,2018,38(13):4879-4887.
- [30] 王留芳,陈婵,朱小叶,等.中亚热带不同植被恢复阶段林地土壤磷库特征[J].水土保持学报,2019,33(1):178-185.
- [31] Fan Y X, Zhong X J, Lin F, et al. Responses of soil phosphorus fractions after nitrogen addition in a subtropical forest ecosystem: Insights from decreased Fe and Al oxides and increased plant roots[J].Geoderma, 2019,337:246-255.
- [32] Rifat H, Safdar A, Ummay A, et al. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: A review[J].Annals of Microbiology,2010,60(4):579-598.
- [33] 朱颖,库永丽,刘金良,等.黄土高原天然和人工油松林根际土壤解磷细菌群落特征及其功能[J].应用生态学报,2021,32(9):3097-3106.
- [34] 春雪,赵雨森,辛颖,等.大兴安岭重度火烧迹地恢复后土壤磷形态与解磷细菌分布特征[J].应用生态学报,2020,31(2):388-398.
- [35] 李黄维.不同林分土壤磷形态与磷转化微生物特征研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [36] 范跃新.氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤磷组分的影响及其调控机理[D].福州:福建师范大学,2019.
- [37] 高尚坤,肖文发,曾立雄,等.马尾松人工林干扰对土壤微生物群落结构的短期影响[J].林业科学,2018,54(12):92-101.
- [38] 徐凡迪,李帅锋,苏建荣.云南松林次生演替阶段土壤细菌群落的变化[J].应用生态学报,2021,32(3):887-894.
- [39] 翟婉璐,钟哲科,高贵宾,等.覆盖经营对雷竹林土壤细菌群落结构演变及多样性的影响[J].林业科学,2017,53(9):133-142.
- [40] 孟会生,洪坚平,杨毅,等.配施磷细菌肥对复垦土壤细菌多样性及磷有效性的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):3016-3022.
- [41] Fang X M, Zhang X L, Zong Y Y, et al. Soil phosphorus functional fractions and tree tissue nutrient concentrations influenced by stand density in subtropical Chinese fir plantation forests[J].PLoS One, 2017, 12(10):e0186905.
- (上接第207页)
- [11] 金双彦,蒋昕晖,钱云平,等.孤山川流域次洪水量和沙量影响因素分析[J].人民黄河,2016,38(3):1-4.
- [12] Zhang L T, Li Z B, Wang H, et al. Influence of intra-event-based flood regime on sediment flow behavior from a typical agro-catchment of the Chinese Loess Plateau[J].Journal of Hydrology,2016,538:71-81.
- [13] 中国气象局.降水量等级 GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [14] 蔡俐辰,李志威,游宇驰,等.1956-2016年拉萨河径流量变化及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):90-96.
- [15] 刘政,叶晶萍,欧阳磊,等.彭冲涧小流域植被恢复的水文效应及其对年降水量响应的临界值[J].应用生态学报,2018,29(11):3705-3711.
- [16] Wang J, Zhang R, Jin L, et al. Relationship between watershed landscape pattern change and runoff-sediment in wind-water erosion crisscross region[J].Journal of Landscape Research,2017,9(5):53-58.
- [17] 王红亚,吕明辉.水文学概论[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [18] 谢敏,张晓明,赵阳,等.北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(1):39-44.
- [19] 王国庆,翟然,万思成,等.清流河流域场次暴雨洪水特征及其对降水的响应关系[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):7-11.
- [20] 赵阳,余新晓,郑江坤,等.气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J].农业工程学报,2012,28(22):252-260.
- [21] 刘芳,熊伟,王彦辉,等.基于LUCC的泾河流域景观格局与径流的响应关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):137-142.
- [22] 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[J].水土保持学报,2019,33(3):36-42,50.
- [23] 徐炫清,陈裕婵,李青圃,等.五华河流域景观格局演变对径流泥沙的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):231-236,242.