

降雨量和水土保持对皇甫川输沙量变化的贡献率分析

尚海鑫¹, 胡春宏^{1,2}, 夏军强¹, 周美蓉¹

(1.武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室,武汉 430072;

2.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)

摘要:为探究黄河支流输沙量减少与流域内降雨量变化及水土保持措施的定量关系。以黄河中游皇甫川流域为研究区域,基于 1960—2015 年准格尔气象站日降水量、皇甫水文站年径流量和年输沙量数据,分析对皇甫川流域年径流量与年输沙量有影响的降雨量参数。通过双累积曲线法和突变点检验法确定输沙量变化的 3 个典型时期:Per1(1960—1986 年)、Per2(1987—1999 年)和 Per3(2000—2015 年);计算了降雨量变化、植被恢复和工程措施对该流域不同时期输沙量变化的贡献率。结果表明:(1)1960—2015 年皇甫川流域降雨强度超过 25 mm/d 的降雨减少,径流量和输沙量呈显著减少趋势(M—K 检验 $Z < 0$, $p < 0.01$);(2)因水土保持引起流域下垫面条件的改变,当 Per3 与 Per1 时期中有相似降雨量的年份,Per3 时期这些年份的输沙量比 Per1 时期显著减少,减小范围为 50.2%~98.6%;(3)1987—1999 年植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 73.0%和 38.4%,2000—2015 年降雨量变化、植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 11.5%,69.8%和 18.7%。研究结果定量计算了降雨量变化和水土保持对皇甫川流域输沙量减少的贡献率,有助于阐明黄河中游沙量锐减的原因。

关键词:降雨;水土保持;径流量;输沙量;减沙贡献率;皇甫川流域

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)02-0199-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.023

Contributions of Rainfall and Soil and Water Conservation to the Variation in Sediment Discharge of the Huangfuchuan River Basin

SHANG Haixin¹, HU Chunhong^{1,2}, XIA Junqiang¹, ZHOU Meirong¹

(1.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of

Water Cycle in River Basin Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048)

Abstract: The Huangfuchuan River Basin was taken as the study area to explore the quantitative relationship between the sediment discharge reduction and rainfall variation, as well as soil and water conservation measures in tributaries of the middle Yellow River. Based on the data of daily precipitation at the Jungar meteorological station and annual runoff and sediment discharge at the Huangfu hydrological station from 1960 to 2015, the precipitation parameters affecting the annual runoff and sediment discharge in the Huangfuchuan River Basin were analyzed. Three typical periods of sediment discharge variation were Per1 (1960—1986), Per2(1987—1999), Per3(2000—2015) using the double mass curve analysis and the Pettitt test, and the contribution rate of rainfall change, vegetation restoration and soil and water conservation measures to the variation in sediment discharge in different periods is calculated. The results showed that: (1) During the period of 1960—2015, the daily rainfall intensity exceeded 25mm/d reduced in Huangfuchuan River Basin, and the runoff and sediment discharge also displayed a decreasing trend (with the parameter $Z < 0$ and $P < 0.01$ using the M—K trend tests); (2) Due to the change in the underlying surface caused by water and soil conservation measures, when the years with similar rainfall in Per3 and Per1 periods, the sediment discharge in these years in Per3 period was significantly reduced compared with that in Per1 period,

收稿日期:2022-07-15

资助项目:国家自然科学基金项目(51725902)

第一作者:尚海鑫(1995—),男,博士研究生,主要从事河流流体力学研究。E-mail: shanghx@whu.edu.cn

通信作者:夏军强(1974—),男,教授,主要从事河流流体力学研究。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

with a reduction range of 50.2%~98.6%; (3) During the period of 1987—1999, the contribution rates of vegetation restoration and soil and water conservation measures to the reduction of sediment discharge were 73.0% and 38.4%, respectively. during the period of 2000—2015, the contribution rates of rainfall change, vegetation restoration and soil and water conservation measures were 11.5%, 69.8% and 18.7%, respectively. The results of this study quantitatively calculate the contribution rate of rainfall variation and soil and water conservation measures to the reduction of sediment discharge in the Huangfuchuan River Basin, which is helpful to identify the causes for the sharp reduction of sediment discharge in the middle Yellow River.

Keywords: rainfall; soil and water conservation; runoff; sediment discharge; contribution rate of sediment reduction; Huangfuchuan River Basin

黄土高原是黄河泥沙的主要来源区,大量泥沙被侵蚀输运进入黄河中游河道。经过近 70 年科学治理和综合防治,黄土高原入黄泥沙量发生了显著变化,干流潼关水文站输沙量由 1919—1959 年的 16 亿 t/a 减少至 2001—2018 年的 2.44 亿 t/a^[1-3]。黄河一级支流皇甫川地处黄土高原多沙粗沙区,地形破碎坡陡沟深且生态脆弱,同时该流域又位于河龙区间暴雨中心之一,极易发生水土流失^[4]。皇甫川多年平均(1970—1995 年)泥沙量占到河龙区间的 8.3%,是黄河泥沙主要来源区之一^[5]。皇甫川特殊的自然地理条件和水土流失治理使流域下垫面发生显著变化,在黄土高原地区具有代表性。自 1983 年被列为国家治理重点支流至今,皇甫川流域水土流失治理取得明显成效。出口控制站皇甫水文站年均输沙量由 1960—1970 年的 0.513 亿 t/a 减少至 2000—2015 年的 0.076 亿 t/a。因此,定量分析引起皇甫川流域输沙量变化的影响因素,有助于揭示黄河中游支流入黄泥沙减少的原因。

黄河干流及其主要支流的输沙量近年来显著减少^[6],众多学者对引起这一现象的原因开展了研究。高海东等^[7]分析了年降雨量与人类活动对河龙区间输沙量锐减的贡献率;孙倩等^[8]研究了年降雨量和人类活动对多沙粗沙区水沙变化的影响;赵广举等^[9]研究了年降雨量和人类活动对皇甫川径流和输沙量变化的影响;王金花等^[10]采用水文法及水保法计算了 1997—2006 年皇甫川流域水土保持措施的减沙效益。随着黄土高原水土流失治理程度提高,在分析降雨量变化对黄土高原产流产沙的影响时,还需要关注植被覆盖度增加对产流和侵蚀产沙的降雨量阈值的影响。然而已有研究在进行流域输沙量变化归因分析时大多使用年降雨量作为降雨量变化的参数,这可能会在输沙量变化归因分析中高估降雨量的影响。

人类活动是引起黄河干支流输沙量减小的另一重要原因,水土保持措施在减少入黄泥沙方面发挥了关键作用^[11-12],众多研究成果量化了气候变化和人类

活动对黄土高原流域产输沙量减少的贡献^[13-16],但仍不能确定植被恢复和淤地坝等工程措施各自所占的减沙占比。因此分析近期皇甫川输沙量减少的原因及客观评价水土流失治理的成效,还需进一步确定植被恢复和工程措施对减沙的贡献率。

本文以黄河中游皇甫川流域为研究区域,基于 1960—2015 年准格尔气象站日降水量、皇甫水文站年径流量和年输沙量数据,分析并选取对皇甫川流域径流量和输沙量有影响的降雨参数;结合水文法与水土保持措施减沙统计结果,计算降雨量和水土保持(植被恢复和工程措施)对皇甫川流域输沙量变化的贡献率;最后分析降雨量变化和水土保持对输沙量贡献率变化的影响机理。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域

皇甫川流域(39.02°—39.09°N,110.03°—111.02°E)地处黄河中游河口镇至龙门区间的上段右岸一侧,是黄河中游多沙粗沙区的一条代表性河流^[5](图 1)。皇甫川流域面积 3 246 km²,干流全长 137 km,包括纳林川和十里长川两大支流。皇甫川流域属砒砂岩丘陵沟壑区,产流以超渗产流为主要形式。流域多年平均降水量 380 mm,降雨以暴雨为主,且多集中在 6—9 月,约占全年降水量的 80%以上^[17]。流域具有暴雨强度大且历时短、洪水含沙量高、水土流失严重等特点,但近年来皇甫川流域的输沙量明显减少。皇甫水文站 1960—1999 年的年均输沙量为 0.453 亿 t/a,2000—2015 年的年均输沙量为 0.076 亿 t/a,年均输沙量减少 83.2%。

1.2 数据收集

皇甫川流域输沙量数据采用皇甫水文站 1960—2015 年实测数据,降水量数据采用同期国家气象科学数据中心准格尔气象站(国家一般气象站)降水日统计数据。准格尔气象站为国家一般气象站,该站在站点布设时考虑到所在区域的地形、地貌、气候特征的代表性,其所记录的气象测量值可以代表测站周围

较大范围内的平均状况,能较好地反映较长时间尺度的降雨量变化趋势。流域内 NDVI 数据采用 GIMMS/NDVI 数据集(1982—1999 年,空间分辨率 8 km)和 MOD13Q1 数据集(2000—2015 年,空间分

辨率 250 m),这些 NDVI 数据获取时间约为每年 8 月中旬。同时还收集皇甫川流域土地利用(表 1)、水土保持(表 2)的代表性研究成果^[18-21],经过对比汇总得到不同时期流域内的林草和工程措施资料。

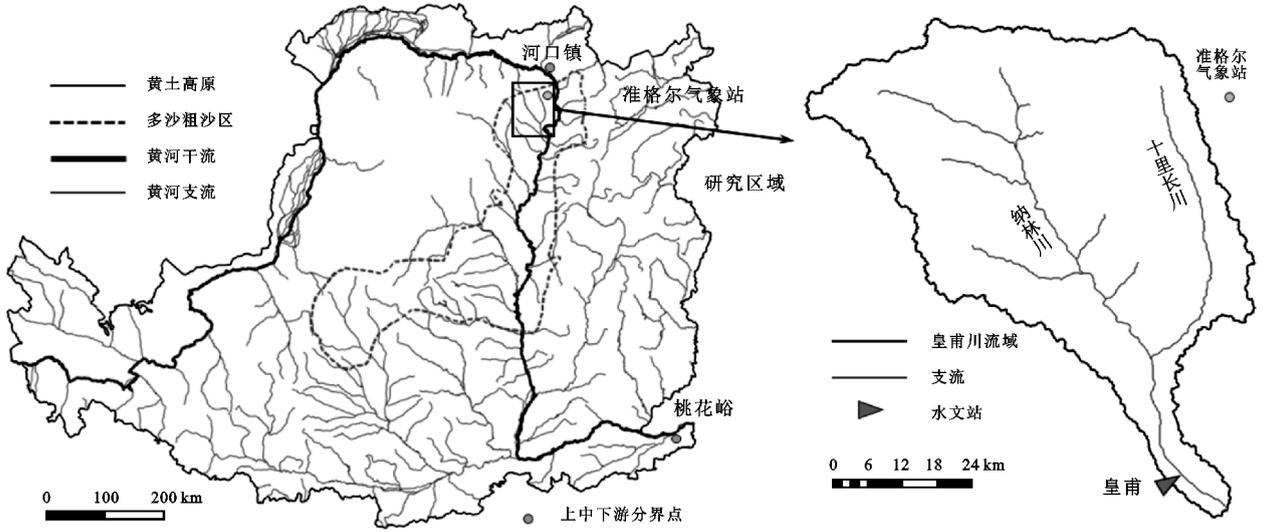


图 1 黄河中游皇甫川流域示意

表 1 皇甫川流域不同时期土地利用情况

年份	草地		林地		裸地		沙地	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
1978	2584.14	79.47	27.49	0.85	250.94	7.72	167.71	5.16
1990	1976.32	60.90	64.72	2.00	563.41	17.40	273.56	8.40
2000	2439.71	75.20	34.47	1.10	385.01	11.90	152.65	4.70
2006	2528.62	77.90	24.09	0.70	345.45	10.60	51.28	1.60

注:占比指土地利用类型在总流域面积中所占的比例;表格内容引用自参考文献^[18-19]。

表 2 皇甫川流域不同时期水土保持工程措施情况

年份	淤地坝坝控	坝控面积	淤地坝拦沙量/	梯田面积/	梯田面积
	面积/km ²	占比/%	(万 t · a ⁻¹)	km ²	占比/%
1960—1969	58.4	1.8	36.5	3.4	0.1
1970—1979	334.3	10.3	219.1	15.6	0.5
1980—1989	616.7	19.0	630.2	32.2	1.0
1990—1999	1171.7	36.1	740.8	30.5	0.9
2000—2009	1820.8	56.1	512.4	19.6	0.6
2010—2015	1820.8	56.1	1138.8	24.9	0.8

注:坝控面积占比和梯田面积占比指二者在流域总面积中所占的比例;表格内容引用自参考文献^[20-21]。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨量及输沙量趋势分析 在黄土高原地区并非所有降雨都会产沙,大暴雨对黄河中游主要支流的产沙量变化起关键作用^[22]。姚文艺等^[23]、刘晓燕等^[24]研究表明,在黄土高原地区的黄河主要产沙区,24 h 内降雨量在 10~50 mm 的降雨是流域产流产沙的重要驱动力之一。统计数据^[18-21]表明,随水土流失治理程度提高,皇甫川流域植被覆盖度在 1985—2015 年期间显著增加,流域内可引起明显产沙的降雨量阈值相应提高;刘晓燕等^[24]研究结果表明,皇甫川流域纳林川一带的场次降雨量阈值约为 25 mm;

Zhang 等^[13]通过筛选 16 个与气候变化相关的参数后发现,日降雨量 > 1, 12, 25 mm 的年降雨总量等指标对皇甫川流域产沙量变化起关键作用。以上研究结果均表明降雨量 > 25 mm 的降雨与皇甫川产流产沙量变化具有因果关系,是影响皇甫川输沙量变化的关键降雨指标。

24 h 降雨量 > 1 mm 为湿润天气的标准^[25],次降雨量 > 12 mm 为坡面侵蚀性降雨标准^[26],24 h 降雨量 > 25 mm 的降雨为大雨^[27]。本研究中的降雨量参数: P、P₁、P₁₂ 和 P₂₅ 分别为年降雨总量、24 h 降雨量 > 1, 12, 25 mm 的年降雨总量。研究采用 Mann-

Kendall(M—K)趋势检验判断 P 、 P_1 、 P_{12} 、 P_{25} 等降雨量指标与径流量、输沙量序列是否有相同的增减趋势,并用 Pettitt 检验对这些参数进行突变点分析。

1.3.2 降雨量和水土保持对输沙量变化的贡献率

双累积曲线可以揭示输沙量是否有趋势性变化,按时间进程对降雨量和输沙量数据进行累加,有对时间序列削弱随机噪声的效果,显现序列变化的趋势性。通过双累积曲线法和 Pettitt 突变点检验确定 1960—2015 年皇甫川累积输沙量和累积降雨量序列的突变点并确定基准期和变化期,以此为基础计算流域降雨量变化和水土保持对输沙量变化的影响。

将双累积曲线发生突变临界年份之前的时期作为基准期,将发生突变临界年份之后的时期作为变化期。建立基准期的双累积曲线的回归方程:

$$\sum S_{\text{ref}} = a \sum P_{\text{ref}} + b \quad (1)$$

式中: $\sum S_{\text{ref}}$ 为基准期降雨量—输沙量函数; $\sum P_{\text{ref}}$ 为基准期的降雨量参数; a 为函数 $\sum S_{\text{ref}}$ 的斜率; b 为函数 $\sum S_{\text{ref}}$ 的截距。在仅有降雨量改变的条件下,变化期的降雨量—输沙量函数与公式(1)有相同的斜率和截距,根据公式(1)系数可建立变化期的降雨量—输沙量函数(S_{fit}):

$$S_{\text{fit}} = aP_{\text{ref}} + b \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为变化期的降雨量参数。将变化期各年降雨量数据代入公式(2)得到变化期计算年输沙量。不同时期计算值之差 ΔS_{ref} 为降雨量变化对输沙量的影响量:

$$\Delta S_{\text{ref}} = \bar{\Delta S}_{\text{ref}} - \bar{S}_{\text{fit}} \quad (3)$$

式中: ΔS_{ref} 为降雨量变化引起的输沙量变化值(亿 t); $\bar{\Delta S}_{\text{ref}}$ 为无降雨影响的变化期计算输沙量(亿 t); \bar{S}_{fit} 为降雨量变化条件下变化期的计算输沙量(亿 t)。而同时期计算值与实测值之差 ΔS_{mea} 为水土保持措施引起的减沙量(亿 t):

$$\Delta S_{\text{mea}} = \bar{S}_{\text{fit}} - \bar{S} \quad (4)$$

式中: \bar{S} 为变化期实测输沙量(亿 t)。

皇甫川流域梯田面积占比不足 1%,根据已有研究^[28]成果,黄土高原地区林草地拦蓄径流量都在 40%以上。水平梯田的减沙作用在汛期降雨 < 486 mm 时可达 90%以上,考虑到部分梯田的质量不高,或者某些地区的降雨强度太大等原因,保守估算梯田对径流泥沙的拦蓄能力至少有 50%。由于流域梯田面积在皇甫川流域内占比极少,梯田与林草植被对径流泥沙的拦蓄能力相当,且目前部分梯田已退耕^[29],故此处将流域内梯田的拦沙作用划归为植被恢复的减沙作用。用水土保持措施的总减沙量减去淤地坝的拦沙量得到植被恢复的减沙量。最后分别计算降雨量变化、植被恢复和工程措施对皇甫川输沙量变化的贡献率:

$$\Delta S_{\text{veg}} = \Delta S_{\text{mea}} - S_{\text{d}} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{rf}} = \frac{\Delta S_{\text{rf}}}{S_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_{\text{veg}} = \frac{\Delta S_{\text{veg}}}{S_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\eta_{\text{d}} = \frac{\Delta S_{\text{d}}}{S_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: ΔS_{veg} 为植被恢复的减沙量(亿 t); S_{d} 为淤地坝拦沙量(亿 t)。淤地坝拦沙量 S_{d} 采用表 2 的中研究结果; η_{rf} 为降雨量变化对输沙量变化的贡献率(%); η_{veg} 为植被恢复对输沙量变化的贡献率(%); η_{d} 为工程措施对输沙量变化的贡献率(%)。

2 降雨量、水土保持和输沙量变化分析

2.1 降雨量变化和水土保持实施

对皇甫川流域 1960—2015 年长序列降雨量指标 P 、 P_1 、 P_{12} 和 P_{25} 进行分析。M—K 趋势检验显示,皇甫川流域 P 和 P_1 的统计检验量 Z 值分别为 1.109 6 和 1.081 3,年降雨总量和湿润天气降雨量均呈增加趋势(表 3)。 P_{12} 和 P_{25} 的统计检验量 Z 值分别为 0.544 2 和 -0.217 8, P_{12} 呈增加趋势, P_{25} 呈减小趋势(图 2)。Pettitt 检验结果显示, P 、 P_1 和 P_{12} 在 1987 年均发生突变,在 1987 年后 P 和 P_1 仍呈增加趋势但增幅减小, P_{12} 和 P_{25} 在这一时期均呈减小趋势。

在分析流域内降雨量变化的影响时,所选择降雨量参数应能体现流域尺度的降雨量变化趋势。本研究选用准格尔气象站(国家一般气象站)的降雨量数据作为皇甫川流域降雨量参数的代表,是因为国家一般气象站记录的气象数据能较好地反映测站周围较大范围内的平均气候状况,并且气象站观测由多站组成网进行的,其记录的雨量数据可以代表一定空间范围的降雨量变化情况。皇甫川流域内布设了十余个雨量站,参考诸多研究^[9,17]对多个雨量站数据的处理方法,需要使用泰森多边形法对流域内各站的降雨量数据取平均值。泰森多边形法所得到的结果为流域内的平均降雨量,单个气象站记录的降雨量数据代表周围较大范围内的平均状况,故在较大的时空尺度上与单个气象站测量的降雨数据有基本相同的变化趋势。

自 20 世纪 50 年代起皇甫川流域开展了水土保持综合治理,流域治理度由 20 世纪 70 年代前的 6.7% 增至 1989 年年底的 17.1%,水土保持的实施效果逐渐显现。1993—1997 年流域治理度增至 28.2%,截至 2006 年年底皇甫水文站以上流域治理面积占流域总面积 54.4%^[25]。根据遥感图像和对皇甫川流域土地利用、水土保持措施研究的成果,流域下垫面在水土保持影响下发生明显变化。

表 3 皇甫川流域降雨量指标趋势及突变点分析

降雨量 指标	时间段	M-K 趋势检验			Petitt 突变点	时间段	M-K 趋势检验			Petitt 突变点
		Z 值	n	p			Z 值	n	p	
P	1960—2015	1.1096	56	—	1987	1987—2015	0.3939	56	—	2011
P ₁	1960—2015	1.0813	56	—	1987	1987—2015	0.4314	56	—	2011
P ₁₂	1960—2015	0.5442	56	—	1987	1987—2015	-0.4690	56	—	1998
P ₂₅	1960—2015	-0.2178	56	—	2004					

注: p 为一表示参数变化趋势无统计显著性。

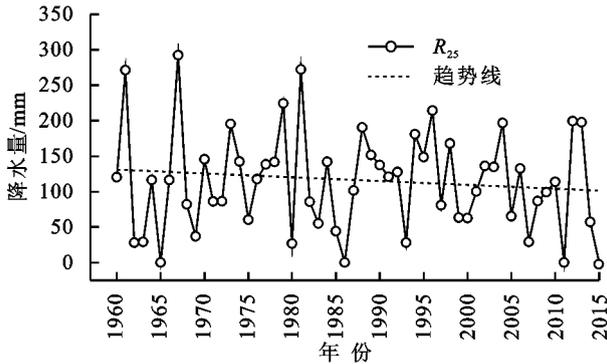


图 2 准格尔气象站 P₂₅变化过程

NDVI 值是反映植被生长状态及植被覆盖状况时空变化的有效指示因子,其与植被覆盖程度呈线性相关关系。流域内 NDVI 指数随水土流失治理明显

增加,1985—2015 年流域内 NDVI 指数呈增加趋势, NDVI 均值由 1985 年的 0.257 增至 2015 年的 0.322。植被覆盖程度有明显增加趋势。20 世纪 50 年代开始的水土流失治理和 1999 年开始的“退耕还林”工程达到恢复林草植被覆盖的目的。流域植被覆盖的空间分布状况也随水土流失治理发生变化。皇甫川流的 NDVI 值分布呈现出支流河川地高,沟道和坡面低的现象。2005 年沿支流十里长川和纳林川及流域内支流附近的 NDVI 值较高,其他地区植被覆盖状况较差,在远离支流河川地的坡面 NDVI 值最低;2015 年流域内远离支流河川地的坡面 NDVI 值显著上升,高 NDVI 值的区域面积明显增大(图 3)。

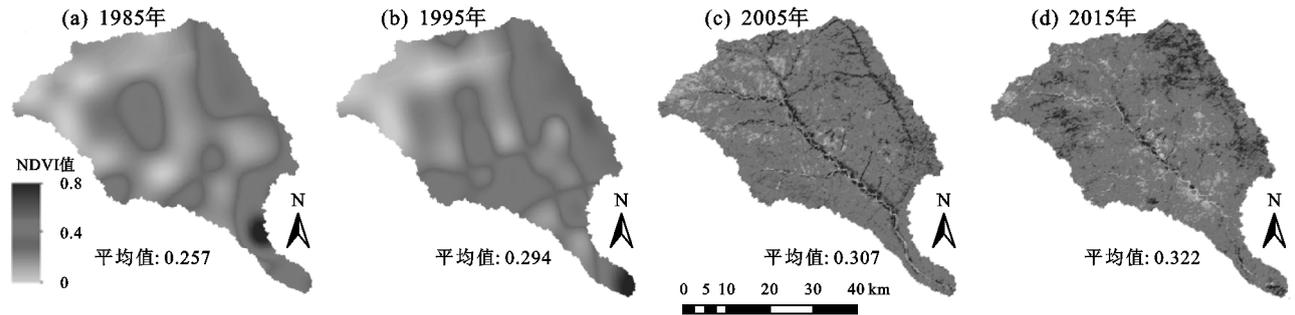


图 3 皇甫川流域不同时期 NDVI 值变化

比较 1990 年、2000 年和 2006 年 3 个时期的土地利用面积(图 4),流域中林地和草地面积占比显著增加,林草面积总和由 62.9% 增加至 78.6%。相应地,裸地面积在流域中占比由 1990 年的 17.4% 减少至 2006 年的 10.6%;沙地面积在流域中占比由 1990

年的 8.4% 减少到 2006 年的 1.6%。由于皇甫川流域内工程措施的建设,淤地坝坝控面积由 1960 年代的 58.4 km² 增加至 2000 年以后的 1820.8 km² (表 2)。淤地坝年均拦沙量增加 1 102.3 万 t/a, 2010—2015 年的年均拦沙量是 1960 年代的 31.2 倍。

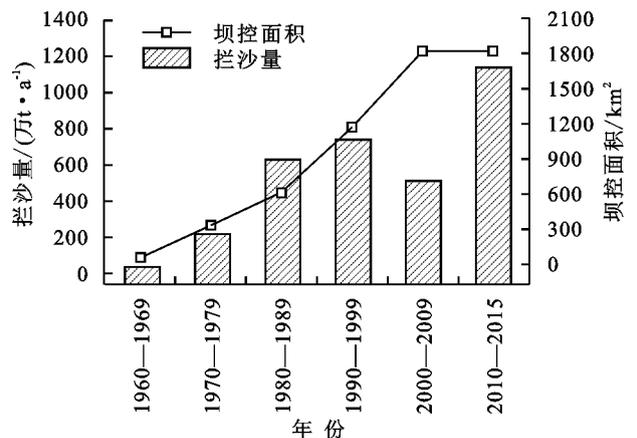
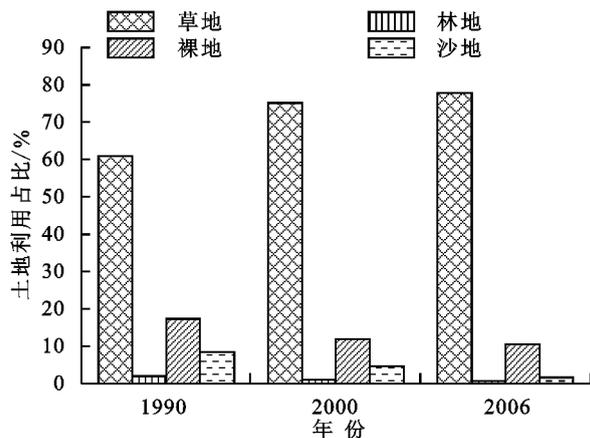


图 4 皇甫川流域不同时期水土保持措施实施情况

2.2 径流量、输沙量变化及其影响因素

根据皇甫水文站 1960—2015 年实测数据,该时期皇甫川年径流量变化范围为 0.01~4.36 亿 m^3/a , M-K 趋势检验显示,年径流量呈显著减少趋势($Z=-5.03, p<0.001$) (图 5)。Pettitt 突变点检验显示,皇甫川年径流量在 1996 年发生突变($p<0.01$), 1996—2015 年径流量比 1960—1995 年年径流量显著减小。1960—1995 年年均径流量为 1.47 亿 m^3/a , 1996—2015 年年均径流量为 0.48 亿 m^3/a 。1996—2015 年的年径流量平均值较 1960—1995 年减小 0.99 亿 m^3/a , 减小幅度为 67.3%。1960—2015 年间皇甫川年输沙量变化范围为 0.01~1.54 亿 t/a , M-K 趋势检验显示,年输沙量呈

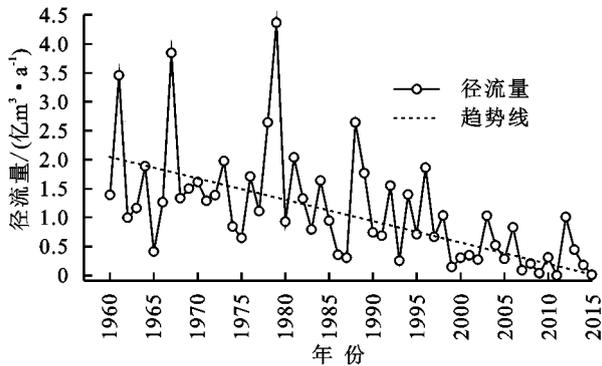
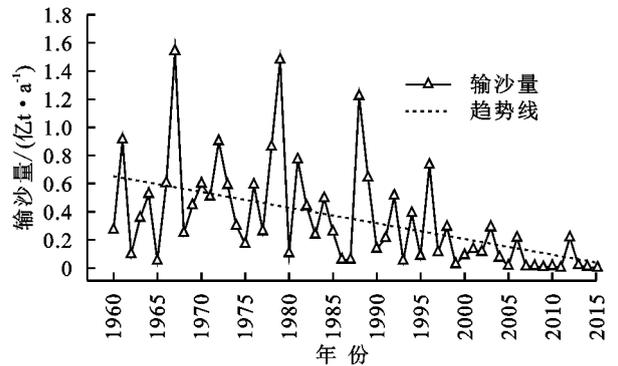


图 5 皇甫水文站年径流量和输沙量变化过程

对比 P 、 P_1 、 P_{12} 和 P_{25} 在径流量序列突变年份前后的变化,皇甫川流域 P_{12} 、 P_{25} 和年径流量在突变点年份后均减小,可认为 P_{12} 、 P_{25} 减少是造成径流量呈减少趋势的原因之一。对比皇甫川年径流量发生突变的 1996 年前后的降雨量。1960—1995 年和 1996—2015 年的 P_{25} 平均值分别为 124.8、118.3 mm。1996—2015 年的 P_{25} 平均值比 1960—1995 年减小 6.5 mm (图 6)。将流域年径流量换算为径流深,计算径流深与 P_{25} 的比值。该比值在 1960—1995 年时期内为 0.432,在 1996—2015 年时期内为 0.116。这一变化表明 P_{25} 在 1960—1995 年时期内比 1996—2015 年更易转化为径流。结合皇甫川流域水土流失治理情况,流域治理程度由 1970 年代的 6.7% 增加至 1990 年代的 28.2%,流域内部分降雨被植被和水土保持工程措施拦蓄,这也是造成径流量减少的另一原因。

对比分析皇甫川流域 P_{25} 、年径流量和年输沙量序列,三者 在 1960—2015 年均呈显著减少趋势。2011 年和 2015 年未出现单日降雨量超过 25 mm 的降雨天气,同年皇甫水文站实测输沙量几乎为 0。以上数据表明, P_{25} 是皇甫川流域地表径流的主要来源, P_{25} 减少和水土保持不仅导致河流径流量减少,而且导致降雨侵蚀减弱。同时径流减少也减弱坡面侵蚀、沟道侵蚀和河道冲刷等后续产沙输沙过程。故 P_{25} 减少和水土保持是皇甫川流域近年来年输沙量减少

显著减少趋势($Z=-5.00, p<0.001$) (图 5)。Pettitt 突变点检验显示,皇甫川年输沙量在 1989 年和 1998 年年发生突变($p<0.01$), 1960—1989 年年均输沙量为 0.52 亿 t/a , 1990—1998 年年输沙量为 0.32 亿 t/a , 1998—2015 年年均输沙量为 0.08 亿 t/a , 1990—1998 年、1998—2015 年 2 个时间段的年均输沙量比 1960—1989 年分别减少 0.20、0.44 亿 t/a , 减小幅度分别为 38.5% 和 84.6%。1996—2015 年的年径流量平均值较 1960—1995 年减小 0.99 亿 m^3/a , 减小幅度为 67.3%。由皇甫川径流量和输沙量的趋势分析可见,二者在 1960—2015 年均呈显著减小趋势,该时期内径流量和输沙量呈显著线性相关关系 (Pearson's $r=0.947$)。



的主要原因。

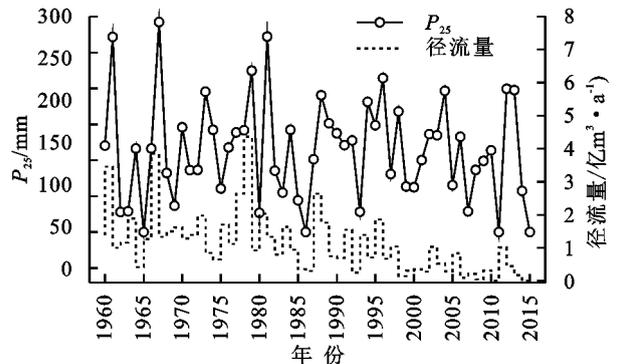


图 6 皇甫川流域 P_{25} 和径流量的逐年变化过程

采用双累积曲线法和 Pettitt 突变点检验法,分析 1960—2015 年皇甫川流域 P_{25} 累积值一年输沙量累积值曲线的变化趋势和突变点 (图 7)。通过对皇甫川年输沙量累积值进行 Pettitt 突变点检验,结果显示流域 P_{25} 和年输沙量的累积关系序列在 1987 年和 2000 年前后发生 2 次突变。1960—1986 年 P_{25} 累积值与年输沙量累积值关系稳定无明显变化, 1987—1999 年年输沙量累积值呈减小趋势, 2000—2015 年年输沙量累积值减小趋势更加明显。

结合皇甫川流域降雨量变化和水土保持措施实施情况,皇甫川累积年输沙量序列可分为 3 个时期 (图 7): 1960—1986 年为基准期 (Per1), 这一时期流域 P_{25} 无明显变化趋势, 水土流失治理程度低, 输沙

量较大,年均输沙量约 0.506 亿 t/a;1987—1999 年为工程措施影响期(Per2),这一时期皇甫川流域被列为国家重点治理支流,流域治理程度提高,治理速度加快,受植被恢复及淤地坝等水土保持措施影响,年输沙量呈现减小趋势,年均输沙量 0.295 亿 t/a。2000—2015 年为降雨量变化与水保措施综合影响期(Per3),这一时期的 P_{25} 较 Per1 和 Per2 有减少趋势,受 P_{25} 减少、植被恢复和工程措施综合影响,皇甫川输沙量明显减少,年均输沙量约 0.076 亿 t/a。相比于 Per1 时期,Per2 和 Per3 时期的输沙量分别减少 41.7% 和 85.0%,Per3 时期输沙量减幅远高于 Per2 时期输沙量减幅。

对比 2000 年前后 P_{25} 相似年份的输沙量,可更准确体现水土保持措施的减沙效果。2000 年后在 P_{25} 减少和水土保持措施增加的综合影响下流域输沙量远

低于对比年份。表 4 选取 Per3 与 Per1 时期内有相似 P_{25} 的年份,Per3 时期内这些年份的输沙量比 Per1 时期有显著减少,减小范围为 50.2%~98.6%。由此可见,当降雨量相似或略大于对比年份的条件下,在 Per3 时期流域的输沙量显著降低。

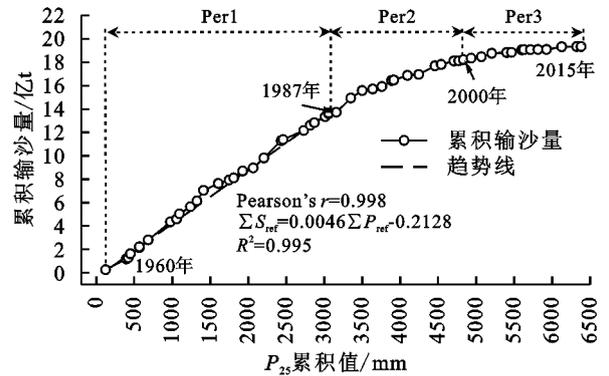


图 7 P_{25} 与年输沙量的双累积曲线

表 4 相似 P_{25} 条件下不同时期的输沙量变化

年份	降雨量/ mm	输沙量/ 亿 t	输沙量 变化率/%	年份	降雨量/ mm	输沙量/ 亿 t	输沙量 变化率/%
1993	28.2	0.052	-81.1	1987	101.4	0.060	-81.3
2007	28.9	0.010		2010	113.6	0.011	
1983	55.0	0.237	-97.0	1992	127.5	0.514	-58.2
2014	57.2	0.007		2006	132.6	0.215	
1999	63.4	0.028	-50.2	1970	145.7	0.598	-85.7
2005	65.3	0.014		1995	148.6	0.086	
1972	86.5	0.899	-98.6	1973	195.3	0.588	-87.6
2008	86.6	0.013		2004	196.7	0.073	

3 降雨量和水土保持对输沙量变化的贡献率

对 Per2(1987—1999 年)和 Per3(2000—2015 年)2 个时期的输沙量变化进行归因分析。建立 P_{25} 与输沙量的双累积曲线(图 7),得到二者在基准期的函数关系为 $\Sigma S_{ref} = 0.0046 \Sigma P_{ref} + 0.2128 (R^2 = 0.995)$ 。将 Per2 和 Per3 时期的 P_{25} 数据分别带入公式(2),得到 2 个时期 P_{25} 变化影响下的输沙量计算值。通过公式(3)计算 P_{25} 影响下的输沙量变化(ΔS_{ref})。Per2 和 Per3 时期的输沙量计算值(\bar{S}_{fit})减去实测值 \bar{S} 为水土保持的减沙量(ΔS_{mea}),再通过公式(5)分别计算植被恢复和工

程措施在各时期的减沙量。虽然 P_{25} 在 1960—2015 年呈减小趋势,但在 Per2 时期(1987—1999 年)的 P_{25} 与 Per1 时期相比偏大, P_{25} 增加引起皇甫川年输沙量增加 0.058 亿 t/a、植被恢复和工程措施分别减少输沙量 0.230 亿 t/a 和 0.062 亿 t/a。通过公式(6)~(8)计算得到 P_{25} 变化使输沙量计算值增加 11.4%,植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 73.0% 和 38.4%。Per3 时期(2000—2015 年) P_{25} 减少引起皇甫川年输沙量减少 0.058 亿 t/a、植被恢复和工程措施分别减少输沙量 0.313 亿 t/a 和 0.060 亿 t/a。 P_{25} 变化、植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 11.5%,69.8% 和 18.7%(表 5)。

表 5 P_{25} 和水保措施对输沙量变化的贡献率

时间段	实测输沙量/ (亿 t·a ⁻¹)	输沙量变化/ (亿 t·a ⁻¹)	P_{25} 变化		水土保持			
			输沙量变化/ (亿 t·a ⁻¹)	减沙 贡献率/%	植被恢复		工程措施	
					输沙量变化/ (亿 t·a ⁻¹)	减沙 贡献率/%	输沙量变化/ (亿 t·a ⁻¹)	减沙 贡献率/%
Per1 (1960—1986)	0.506							
Per2 (1987—1999)	0.295	-0.211	0.058	-11.4	-0.230	73.0	-0.062	38.4
Per3 (2000—2015)	0.076	-0.423	-0.058	11.5	-0.313	69.8	-0.060	18.7

皇甫川流域不同时期降雨量变化和水土保持对输沙量变化的影响程度均不同,1987—1999 年 P_{25} 变化引起输沙量计算值增加,其对输沙量减少的贡献率在 Per2 时期为负值;在 Per3 时期 P_{25} 变化对输沙量减少的贡献率为正值。由于 Per3 时期 P_{25} 减小使流域产沙和输沙量减少,工程措施对减沙的贡献率相对减小。Per3 和 Per2 时期植被恢复与工程措施减沙贡献率的比值分别为 3.73 和 1.90,在 Per3 时期,植被恢复的贡献率在水土保持措施中的比重较 Per2 时期更大。

1987—1999 年的 P_{25} 增加引起输沙量增加。Per2 时期年 P_{25} 较 Per1 时期更高,故由双累积曲线法计算得到的 Per2 时期输沙量计算值比 Per1 时期增加。 P_{25} 在 1960—2015 年呈下降趋势,Per3 时期的 P_{25} 年均值为 115.04 mm,小于基准期 P_{25} 年均值 122.28 mm;2011 年和 2015 年未出现单日降雨量 > 25 mm 的降雨天气, P_{25} 减少对输沙量减少起到正向作用。

在 Per2 和 Per3 时期,皇甫川流域植被覆盖面积显著增加,裸地和沙地面积相应减少。1987—1999 年的 P_{25} 年均值为 131.81 mm,大于基准期年均 P_{25} 降雨量 122.28 mm,而输沙量却比基准期减少 0.53 亿 t/a,说明由于植被覆盖增加使流域产沙的降雨量阈值提高,植被的保水固土作用削弱降雨侵蚀力作用。本研究只对不同时期淤地坝的拦沙量数据进行收集计算,坡面工程和沟道工程措施实施后,坝地等工程措施内的植被生长所产生的减沙贡献率仍未被分离,淤地坝对水流的阻滞会降低水流流速、减小输沙能力,并有效减少沟岸坍塌。故工程措施的减沙贡献率在 Per3 时期所占比重比 Per2 时期更小。此外,水库、河道堤防的修整、公路建设等工程措施对水流、泥沙输移路径的阻断效应,植被、梯田和淤地坝的综合配置作用等在目前研究中很难得到有效计算^[30-31]。在今后研究中还应考虑以上因素对流域输沙量变化的影响,以做到更准确的归因分析。

4 结论

(1)皇甫川流域 P_{25} 在 1960—2015 年总体呈减小趋势,但在 Per2 时期(1987—1999 年)比 Per1 时期(1960—1986 年)偏大。1985—2015 年流域内 NDVI 增大 25.3%,流域植被覆盖度明显增大;2005 年以后支流河川地植被覆盖度高,沟道和坡面植被覆盖度低的情况明显改善。流域内水土保持工程措施增加,2010—2015 年的淤地坝坝控面积和年均拦沙量是 1960 年代的 31.2 倍。

(2)皇甫川径流量和输沙量在 1960—2015 年均呈显著减小趋势,并且二者呈显著线性相关关系。皇甫川

输沙量减少与 P_{25} 变化、水土保持引起的流域下垫面变化关系密切。水土保持措施引起流域下垫面条件改变,当 Per3(2000—2015 年)与 Per1(1960—1986 年)时期中有相似 P_{25} 的年份,Per3 时期这些年份的输沙量比 Per1 时期有显著减少,减小范围为 50.2~98.6。

(3) P_{25} 变化和水土保持(植被恢复和工程措施)实施均对皇甫川输沙量变化产生影响。Per2 时期(1987—1999 年) P_{25} 偏大,输沙量计算值增加 11.4%,水土保持措施中植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 73.0% 和 38.4%。Per3 时期(2000—2015 年) P_{25} 和水土保持措施的减沙贡献率分别为 11.5% 和 88.5%,植被恢复和工程措施的减沙贡献率分别为 69.8% 和 18.7%。

参考文献:

- [1] Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events [J]. *Catena*, 2019, 177: 31-40.
- [2] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].*水科学进展*, 2020, 31(5): 725-733.
- [3] 王光谦,钟德钰,吴保生.黄河泥沙未来变化趋势[J].*中国水利*, 2020(1): 9-12, 32.
- [4] Shen N, Wang Z L, Guo Q, et al. Soil detachment capacity by rill flow for five typical loess soils on the Loess Plateau of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: e105159.
- [5] 冉大川,高健翎,赵安成,等.皇甫川流域水沙特性分析及其治理对策[J].*水利学报*, 2003, 34(2): 122-128.
- [6] Tian S M, Xu M Z, Jiang E H, et al. Temporal variations of runoff and sediment load in the upper Yellow River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 46-56.
- [7] 高海东,刘晗,贾莲莲,等.2000—2017 年河龙区间输沙量锐减归因分析[J].*地理学报*, 2019, 74(9): 1745-1757.
- [8] 孙倩,于坤霞,李占斌,等.黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率[J].*地理学报*, 2018, 73(5): 945-956.
- [9] 赵广举,穆兴民,温仲明,等.皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J].*中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 1-8.
- [10] 王金花,张胜利,孙维营,等.皇甫川流域近期水土保持措施减沙效益分析[J].*中国水土保持*, 2011(3): 57-60, 69.
- [11] 胡春宏,张治昊.论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度[J].*水利学报*, 2020, 51(9): 1015-1025.
- [12] Miao C Y, Ni J R, 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: 196-205.
- [13] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Investigation of the relationship between precipitation extremes and sediment discharge production under extensive land cover change in the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2020, 361: e107176.
- [14] 刘海, 刘凤, 郑粮. 气候变化及人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 143-151.
- [15] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(1): 1-11.
- [16] 胡彩虹, 管新建, 吴泽宁, 等. 水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 12-16.
- [17] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用 [J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388-397.
- [18] 许文龙. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及土地退化研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019.
- [19] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2017, 148: 126-137.
- [20] 魏艳红. 延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响 [D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [21] Tian P, Zhao G J, Mu X M, et al. Check dam identification using multisource data and their effects on streamflow and sediment load in a Chinese Loess Plateau catchment [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7: 1-13.
- [22] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究 [J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 1-5.
- [23] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 607-616.
- [24] 刘晓燕, 李晓宇, 高云飞, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化 [J]. *水利学报*, 2019, 50(10): 1177-1188.
- [25] Sillmann J, Kharin V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 1716-1733.
- [26] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6-11.
- [27] 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: 1-2.
- [28] 景可, 郑粉莉. 黄土高原水土保持对地表水资源的影响 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 11-12, 73.
- [29] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析 [J]. *水利学报*, 2014, 45(11): 1293-1300.
- [30] 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.
- [31] 杨媛媛, 李占斌, 高海东, 等. 大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 85-89.
- (上接第 126 页)
- [28] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1998, 19(4): 10-16.
- [29] 谢仁波, 舒国勇. 铜仁西部不同时间尺度温度降水变率分析 [J]. *贵州气象*, 2012, 36(6): 16-19.
- [30] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] 郭晓芳, 李旭东, 程东亚. 云贵高原气温与降水空间分布特征及其影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 159-163, 170.
- [33] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [34] 杨超, 陈万旭, 冉端, 等. 中国县域生态系统弹性力时空演变特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 279-285.