

汀江流域长汀段水沙变化特征及其影响因素

王赫¹, 朱秀端², 林敬兰³, 朱能飞⁴, 林根根⁵, 蒋芳市¹, 黄炎和¹, 林金石¹

(1.福建农林大学,福州 350002;2.福建省南平市水土保持中心,福建 南平 353000;3.福建省水土保持试验站,福州 350001;4.江西洪屏抽水蓄能有限公司,江西 宜春 336000;5.长汀县水土保持站,福建 长汀 366300)

摘要: 河流水沙变化直接反映流域的生态环境状况和土壤侵蚀程度。为探讨南方典型水土流失治理区水沙变化特征及其驱动机制,以汀江流域长汀段 1982 年 1 月至 2014 年 12 月径流、输沙数据为研究对象,采用 CEEMDAN 法、Mann-Kendall 检验法、Pettitt 检验法及构建水沙关系模型分析水沙的变化特征,通过双累积曲线法定量研究降雨和人为活动对水沙变化的贡献率。结果表明:(1)汀江流域长汀段降雨和径流量不显著减小趋势,输沙率显著下降($p < 0.01$)。径流与输沙的周期性及变化趋势不同步。(2)汀江流域长汀段输沙状况在 2000 年发生突变($p < 0.01$),突变后径流含沙量降低,水沙关系曲线的来沙系数显著减小。(3)自 2000 年后,长汀段径流和输沙总量均减小,其中人为活动对径流变化的贡献率为 68%~81%,对输沙变化的贡献率为 90%~98%,人为活动中以封禁治理、生态林草等为主的水土保持措施是输沙量减少的最重要原因。

关键词: 汀江流域长汀段;水沙变化;人为活动;水土保持

中图分类号:P333.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0122-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.016

Variation Characteristics and Impacting Factors of Runoff and Sediment in Changting Section of Tingjiang River Basin

WANG He¹, ZHU Xiudian², LIN Jinglan³, ZHU Nengfei⁴, LIN Gengen⁵,

JIANG Fangshi¹, HUANG Yanhe¹, LIN Jinshi¹

(1.Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; 2.Soil and Water Conservation Center of Nanping City of Fujian Province, Nanping, Fujian 353000; 3.Soil Conservation Experimental Station of Fujian Province, Fuzhou 350001; 4.Jiangxi Hongping Pumped Storage Company Ltd., Yichun, Jiangxi 336000; 5.Soil and Water Conservation Station of Changting County, Changting, Fujian 366300)

Abstract: The changes of river runoff and sediment directly reflect the ecological environment and the degree of soil erosion in the basin. In order to explore the variation characteristics of runoff and sediment and its' driving mechanism in the typical soil erosion control area in South China, the runoff and sediment data of Changting section of Tingjiang River Basin from January 1982 to December 2014 were taking as the research object, and the CEEMDAN, Mann-Kendall trend test, Pettitt test and water sediment relationship model were used to analyze the variation characteristics of runoff and sediment. Meanwhile, the double accumulation curve was used to quantitatively study the contribution of rainfall and human activities to the changes of runoff and sediment. The results showed that: (1) The rainfall and runoff in Changting section of Tingjiang River Basin showed no significant decreasing trend, while the sediment rate decreased significantly ($p < 0.01$). The periodicity and trend of runoff and sediment were not synchronous. (2) The sediment transport rate in Changting section of Tingjiang River basin changed suddenly in 2000 ($p < 0.01$). After 2000, the runoff sediment concentration decreased and the inflow sediment coefficient of water sediment relationship curve decreased significantly. (3) The total amounts of runoff and sediment in Changting section decreased after 2000. The contribution rate of human activities to the change of runoff was 68%~81%, and the contribution

收稿日期:2021-09-22

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFE0118100-9);长汀县水土流失区土壤质量综合评价项目(KH200049A);福建省自然资源厅自主研究项目(KY-090000-04-2021-001)

第一作者:王赫(1993—),女,河北承德人,博士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail: 977568251@qq.com

通信作者:林金石(1980—),男,福建南屏人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持、农业水土工程等研究。E-mail: jslin@fafu.edu.cn

rate of human activities to the change of sediment was 90%~98%. In human activities, the implementation of soil and water conservation measures dominated by banning management and ecological forest and grass construction were the most important reasons for the reduction of sediment.

Keywords: Changting section of Tingjiang River Basin; variation of runoff and sediment; human activities; soil and water conservation

水土流失是全球最严重的环境问题之一,直接威胁着区域生态安全和社会经济可持续发展^[1]。我国是世界上水土流失的重灾区,水土流失总面积占全国国土面积的 28.6%^[2],其中以黄土高原地区最为严重。而南方红壤区因其特殊的自然条件(降雨模式、温度、土壤属性、地形因素等)加之人为活动频繁,水土流失强烈,同样不容忽视。

水沙过程是地表物质循环的重要组分,也是直接受到土壤侵蚀影响的环节之一^[3]。因此,分析流域径流、输沙的变化特征,已成为间接研究流域土壤侵蚀的重要手段。国内有关水沙的研究主要集中于黄河流域,且已较为成熟。通常依托长时序的径流、泥沙数据,利用数理统计方法检测流域径流、输沙的演变趋势及特征,利用双累积曲线法、累积斜率变化率法或通过模型假定情景等研究气候变化和人为活动对水沙变化的贡献率^[4-6]。大量针对黄河水沙变化的定量演变特征研究及其驱动机制的定性分析取得了较为一致的结论,即黄河的径流和输沙主要在中下游呈现出明显减小趋势,人为活动则是这种变化的主要驱动力,其中水土保持所起的作用不容忽视^[5-7]。然而,受自然和人为因素影响,南方红壤区水土流失状况与黄土高原地区存在本质差异,从而直接导致二者河流泥沙过程的不同。已有研究^[8-9]发现,南方流域降雨及径流未发生明显变化,而输沙呈现显著的减少趋势,水利工程、水土保持措施等是引起输沙减少的主要原因,但由于水沙研究的相对缺乏,对于南方红壤区水沙的演变规律及其驱动机制目前尚未得到较统一的结论。在不断变化的气候环境和复杂的人为活动影响背景下,南方红壤区的水沙变化及内在关系有何特征,对降雨和人为活动如何响应,是目前亟待研究和解决的问题。

福建省长汀县是我国南方红壤地带典型的强度土壤侵蚀区^[10],2000 年以来,长汀县水土流失受到高度重视,开始了持续、规范、科学的水土保持工作,成为南方红壤区水土流失治理的典范^[11]。河流输沙是区域水土流失的集中体现,然而,作为南方水土保持的关键示范区,有关长汀区域水沙演变方面的研究仅进行了初步的变化特征分析^[12-14],河流水沙关系演变、水沙变化驱动机制及其对区域水土流失治理的响应等机理性研究则少之又少,导致对于该区域河流水

沙变化与水土流失治理关系的认识远远不足,这严重限制了长汀地区乃至南方红壤区水土保持措施效益、效果的评价,以及区域水土流失治理工作的进一步实施和完善。本文基于汀江流域长汀段观音桥站和上杭站 1982—2014 年径流、输沙数据,采用完备集合经验模态分解法(CEEMDAN)、Mann-Kendall 检验法和 Pettitt 检验法确定水沙序列的宏观变化趋势及周期性特征,并分析突变前后的水沙关系,探讨气候和人为活动对水沙变化的影响。研究结果对揭示南方红壤区的水沙变化特征及其影响因素,探讨区域水土流失治理及流域生态可持续发展具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汀江为福建省第三大河流,闽西最大河流,全长 322 km,发源于武夷山南段东南部,主干流流经长汀、武平、上杭、永定 4 县后流入广东省。汀江流域面积 11 802 km²,长汀县境内河道长 153.7 km,控制面积 2 602 km²,河道坡降 1.89‰,水流湍急^[14]。长汀段有观音桥和上杭 2 个水文站点,观音桥站位于长汀县大同镇黄屋村,距离河口 260 m;上杭站位于上杭县临城镇水西村,距离河口 112 m(图 1)。

长汀县(116°00'45"—116°39'20"E,25°18'40"—26°02'05"N)位于福建省龙岩市西部,总面积 3 089.9 km²,是长汀段径流、泥沙的主要来源地。长汀县属亚热带季风气候,年均气温 19 ℃,年降水量 1 500 mm 以上,降水主要集中于 4—6 月。县域内多山地丘陵,主城区位于长汀中部,四周环山,村镇零星分布。土壤成土母质多以花岗岩为主,因雨量充沛,年内分配不均,导致风化作用强烈,易受侵蚀。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,原生植被存留较少,多数为人工林和次生林,且以马尾松为主的针叶林居多^[15]。独特的自然条件加之多年来的人为破坏导致长汀县一度成为我国南方红壤区水土流失最为严重的县域之一,因此,其水土流失治理工作也受到了广泛的关注。2000 年 2 月,福建省委、省政府将长汀县水土流失综合治理列为全省为民办实事项目之一,此后每年由省级有关部门扶持 1 000 万元资金,长汀县水土流失治理由此步入规范、科学化治理阶段。据统计^[16],至 2018 年全县水土流失面积 246.45 km²,与 1999 年相比减少近 492 km²,水土保持成效突出。

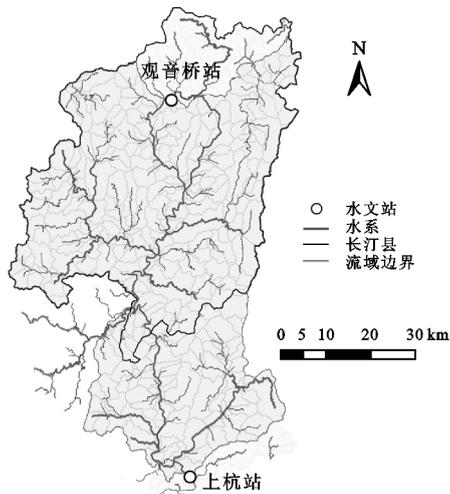


图 1 研究区地理位置

1.2 数据来源

本文采用数据为汀江流域长汀段观音桥站(116°22′41.4″E, 25°50′45.1″N)和上杭站(116°25′24.6″E, 25°4′40.2″N)2个水文站点的降雨量、径流量、输沙率逐月实测数据,时间序列为1982年1月至2014年12月。其中观音桥站位于上游,上杭站位于下游,两站点间支流大多位于长汀县境内,仅一条支流由武平县流入,因此站点间控制区域主要属于长汀县,其水文数据与长汀县生态环境和水土流失状况密切相关。流域平均降雨量按克里金插值法计算得到。长汀县水土保持措施数据来自长汀县水土保持科教园,时间序列为1983—2014年。

1.3 研究方法

1.3.1 完备集合经验模态分解法 CEEMDAN 完备集合经验模态分解法(CEEMDAN)于2011年由Torres等^[17]提出,是一种基于经验模态分解法(EMD)^[18]的改进算法。EMD为自适应信号时频分析方法,其原理是将原始信号按层分解,得到一系列频率不同的本征模函数分量,并根据瞬时频率高低将本征模函数分量从中分离。与广泛应用于水文序列周期性分析的小波分析方法相比,EMD算法最大的优点是克服了基函数无适应性问题,但其在分解过程中可能存在模态混叠、端点效应等缺陷。

CEEMDAN方法在EMD基础上,解决了模态混叠问题,是在EMD分解过程中的各个阶段添加有限方差约束的多组独立同分布自适应高斯白噪声,以实现非平稳原始信号不同频率成分的提取^[19]。对于某一给定的水文时间序列 $H(t)$, $v(t)$ 表示均值为0,方差为1的白噪声,CEEMDAN分解过程为:

(1)在水文序列 $H(t)$ 中加入白噪声 $v(t)$,第 i ($i=1,2,\dots,I$)次的信号表示为:

$$H_1(t) = H(t) + v_1(t) \quad (1)$$

(2)对第 i 次加入白噪声的信号 $H_i(t)$ 进行EMD

分解并进行 I 次试验平均,分解第 i 次信号 $H_i(t)$ 得到相应的模态分量 $IMFi_1$,则第一阶模态分量 IMF_1 为:

$$IMF_1 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMFi_1 \quad (2)$$

残差 $r_1(t)$ 为:

$$r_1(t) = H(t) - IMF_1 \quad (3)$$

(3)在残差 $r_1(t)$ 中加入白噪声 $v(t)$,进行 I 次试验,第 i 次的信号表示为:

$$r_{i1}(t) = r_1(t) + v_i(t) \quad (4)$$

(4)对第 i 次加入白噪声的信号 $r_{i1}(t)$ 进行EMD分解并进行 I 次试验平均,分解第 i 次信号 $r_{i1}(t)$ 得到相应的模态分量 $IMFi_2$,则第二阶模态分量 IMF_2 为:

$$IMF_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMFi_2 \quad (5)$$

残差 $r_2(t)$ 为:

$$r_2(t) = r_1(t) - IMF_2 \quad (6)$$

(5)重复(3)、(4)步骤以计算下一阶模态IMF,直到残差 $r_k(t)$ 满足以下任一条件时终止分解:①无法被EMD进一步分解;②IMF分量满足相应条件;③局部极值点的数量小于3个。最终,水文序列 $H(t)$ 可分解为若干个IMF分量和一个趋势项 R (即 $r_k(t)$):

$$H(t) = \sum_{k=1}^k IMF_k + r_k(t) \quad (7)$$

1.3.2 Mann-Kendall 检验和 Pettitt 突变点检验法

长时间的水文序列因受到各种因素影响往往呈现出一定的变化趋势,同时可能在某一时间节点上产生不一致性,这一节点即为水文的突变点。为了确定长时间水文序列的变化趋势及突变特征,本研究采用非参数Mann-Kendall趋势检验法^[20],简称M-K法,对汀江流域长汀段1982—2014年降雨、径流和输沙序列进行趋势统计分析,并采用Pettitt突变点检验法^[21]判断径流和输沙序列是否存在突变年份。

1.3.3 水沙关系模型 含沙量(或输沙率)与流量拟合得到的曲线被称为水沙关系曲线(sediment rating curve, SRC),是了解复杂水沙关系的有效模型, SRC曲线中径流被认为是自变量,影响流域土壤侵蚀—搬运—沉积的过程^[22]。研究^[23]发现,径流量与含沙量(或输沙率)通常为幂函数关系:

$$SSC = a \cdot Q^b \quad (8)$$

式中:SSC为含沙量(kg/m^3); Q 为径流量(m^3/s);参数 a 为来沙系数,表示单位流量时的输沙率,其值越大则单位流量时的输沙率越大,用以反映水流的输沙能力;参数 b 与流域下垫面情况有关。

SRC曲线具有构建简单、对数据分布及大小要求低等特点,可较好地量化流域泥沙输移过程,因此在水沙关系中应用较为广泛。

1.3.4 双累积曲线法

双累积曲线是一种广泛应用于

估算降雨和人为活动对径流、输沙影响的方法^[24],具有简单、直观等优点。当流域未受到人为活动影响或人为活动的影响有限时,降雨—径流、降雨—输沙的双累积曲线近乎一条直线,当流域受到水利工程、水土保持等人为活动影响较大时,降雨—径流、降雨—输沙的双累积曲线发生偏折。通常将发生突变(发生偏折)前的时段作为基准期,建立累积降雨量与累积径流或输沙的线性回归方程,将突变后的降雨量代入回归方程中估算未受到人为活动影响的径流量或输沙量,从而计算降雨及人为活动对水沙变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 径流与输沙的年际变化特征

长时序的水沙数据包含着复杂的多时间尺度周期性变化特征和宏观变化趋势,应用 CEEMDAN 方法可将 1982—2014 年观音桥水文站、上杭水文站径流量、输沙率序列分解为不同时间尺度的模态分量 IMF 和趋势项 R ,其中各 IMF 可反映特定的时间尺度下径流量和输沙率的周期性变化以及振幅随时间的演变过程^[25], R 则反映了径流量和输沙率在 1982—2014 年间的宏观变化趋势,它的上升或下降说明了原始水沙序列的非平稳性。

观音桥站和上杭站径流量序列分解后均得到 3 个 IMF 分量(图 2、图 3),通过 FFT 功率谱法计算得到观音桥站径流量 IMF1、IMF2、IMF3 的平均周期分别为 2.2、8.25、16.5 a,上杭站径流量 3 个 IMF 的平均周期分别为 2.2、16.5、11.0 a。观音桥站输沙率序列分解后得到 2 个 IMF 分量(图 2),平均周期分别为 3.3、11.0 a,上杭站输沙率序列分解后得到 3 个 IMF 分量(图 3),平均周期分别为 3.3、11.0、33.0 a,2 个站点输沙率的周期性变化基本一致。

因受到降雨和气候系统的年际变化影响,长汀段上、下游 2 个站点的径流和输沙在短周期变化上基本一致,但随着周期与振幅的增加,上、下游逐渐显现出一定差异。河流水沙的周期性特征还受到人为活动的影响^[25-26],因此长汀段上、下游水沙的周期性差异可能与区间内频繁的人为活动相关,而同一水文站径流和输沙的周期变化也存在不同步现象,不同影响因素对径流、输沙变化的贡献率不同可能是造成这种现象的主要原因。

从 2 个站点径流量、输沙率序列分解后得到的趋势项 R (图 4)中可以看出,1982—2014 年期间,上游观音桥站径流量趋势线较平稳,无明显变化幅度,下游上杭站则具有一定的减小趋势,但在 2000 年以后趋向于平稳状态。上游观音桥站输沙率于 1982—1996 年期间缓慢上升,1997—2014 年期间逐渐减小,而下游上杭站输沙率

则始终呈现出减小的趋势,且下降幅度较大。采用 M-K 法对径流、输沙及降雨变化趋势进行检验(表 1)结果表明,1982—2014 年期间 2 个站点径流量、输沙率及降雨量均呈现出一定的减小趋势,但仅下游上杭站输沙率减小明显,这与 CEEMDAN 法分解得到的趋势项 R 结果基本一致。由此可确定在 1982—2014 年期间,汀江流域长汀段降雨及径流量呈现出不显著的减小趋势,输沙率则显著降低($p < 0.01$),这与长汀段已有的研究^[12-13]结果基本相符。

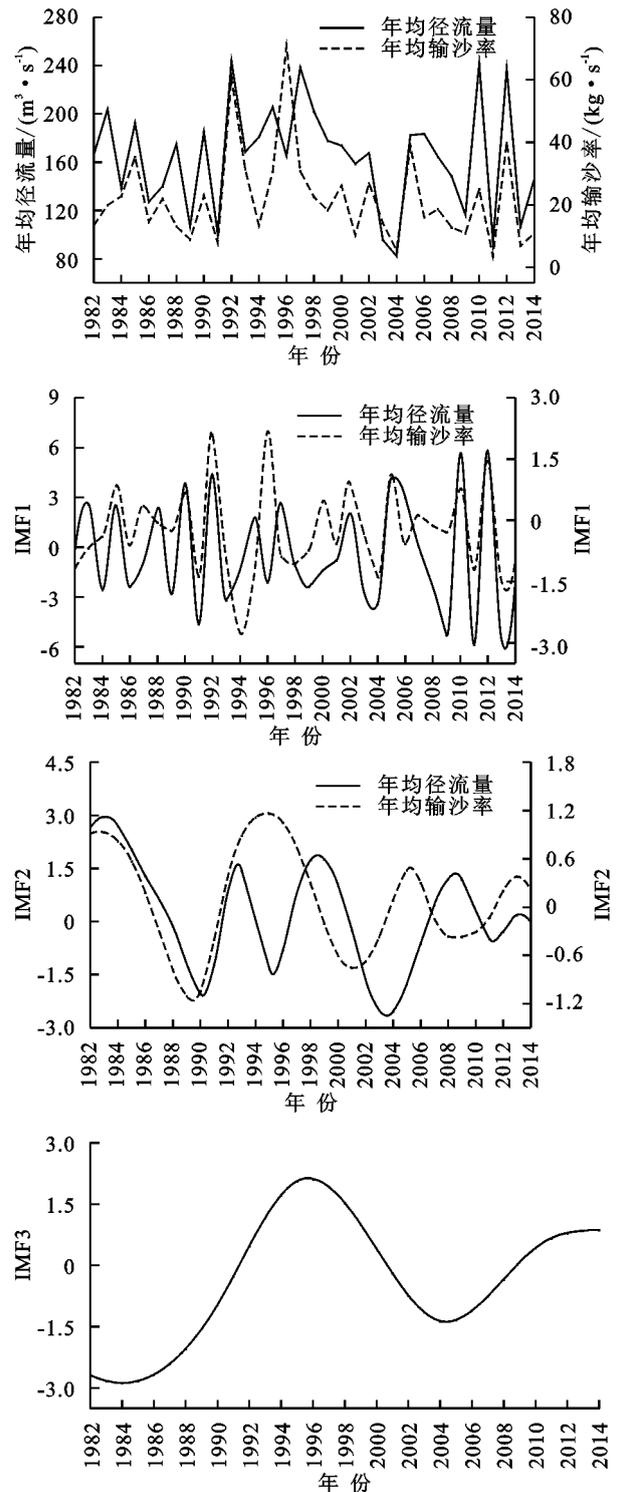


图 2 观音桥站年均径流量和输沙率 IMF 分量

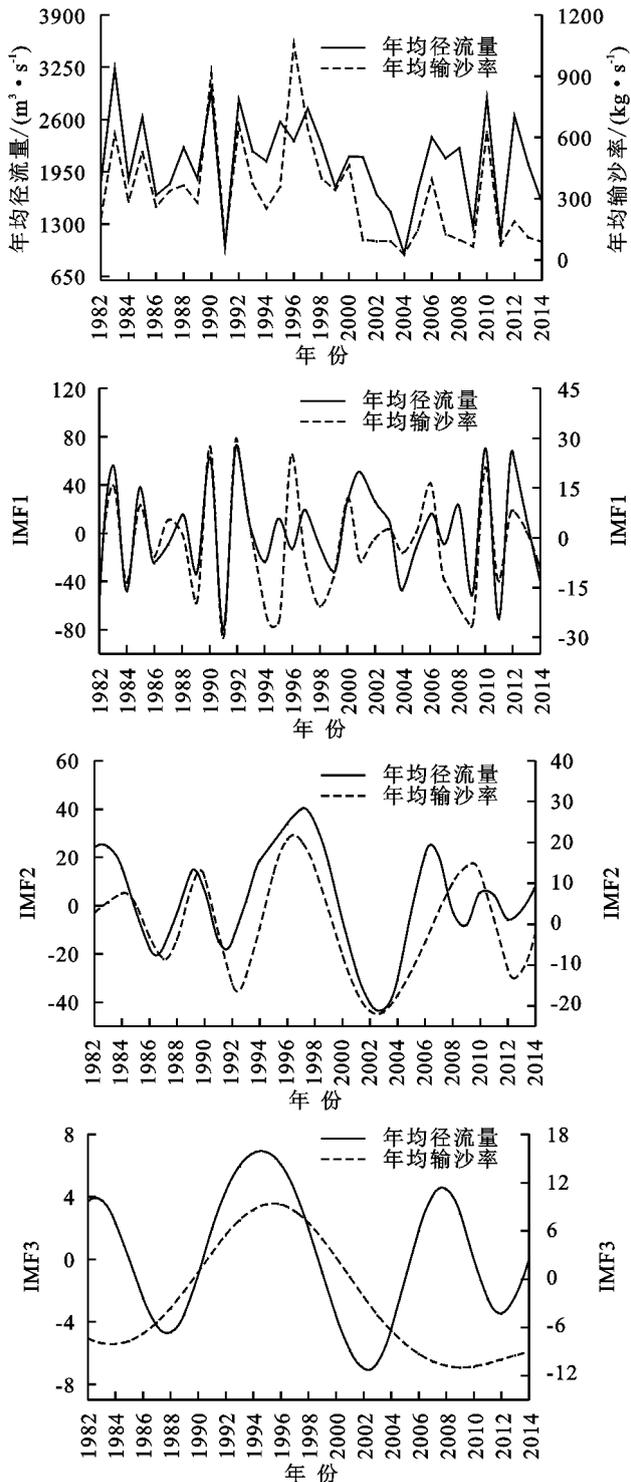
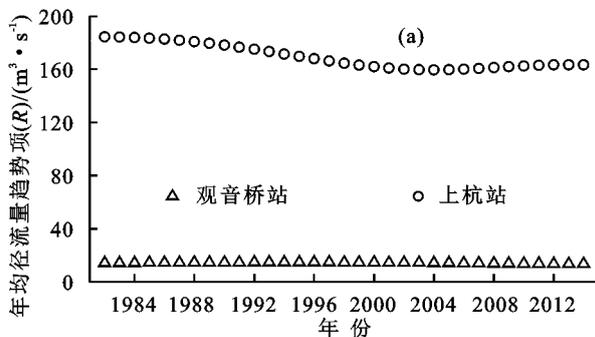


图 3 上杭站年均径流量和输沙率 IMF 分量



2.2 径流与输沙突变分析

采用 Pettitt 突变点检验法对观音桥站和上杭站年径流量和输沙率的突变特征(图 5)进行分析,检验结果表明,观音桥站径流量序列(图 5a)于 2000 年出现拐点,上杭站径流量序列(图 5b)于 1998 年出现拐点,但 2 个站点径流量序列的统计值均未达到 0.05 显著性水平,说明 1982—2014 年期间两站点径流未发生显著突变。2 个站点输沙率序列(图 5c、图 5d)均于 2000 年出现拐点,其中观音桥站未达到显著性水平,上杭站则拐点明显,且达到 0.01 显著性水平,即 2000 年为下游上杭站输沙发生突变的年份。

综合上下游站点径流和输沙突变特征可知,长汀段区间内输沙状况在 2000 年后发生了显著突变,王振平^[27]采用累积距平法检验长汀段径流量和输沙率发生突变的时间也得到相似的结论。从 2000 年起,福建省委、省政府将治理长汀县水土流失连续列入为民办实事项目,开启了长汀县规模化水土流失治理的阶段,这可能是输沙状况发生突变的根本原因。

2.3 长汀段水沙关系变化分析

流域水沙序列发生突变往往与水沙关系的变化有关,水沙关系是研究流域水沙的重要内容。为了进一步探讨汀江流域长汀段水沙变化原因,根据 2 个水文站点径流与输沙突变分析结果(观音桥站水沙未发生突变,上杭站输沙率在 2000 年发生突变),分别建立观音桥站及上杭站突变前后水沙关系曲线 SRC 进行对比。

由图 6 可知,观音桥站含沙量及上杭站突变前含沙量均主要集中在 $0 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$,而上杭站突变后含沙量主要集中在 $0 \sim 0.1 \text{ kg/m}^3$,与前两者相比突变后径流含沙量整体下降。SRC 曲线表明,观音桥站与突变前上杭站的水沙关系基本一致,二者 SRC 曲线的系数 a, b 均较为相近,而突变后上杭站 SRC 曲线的来沙系数 a 显著减小,与前两者系数 a 不在同一数量级。说明突变后长汀段区间内水沙关系发生明显变化,可能是由于区域侵蚀产沙量大大减少或径流的输沙能力显著降低导致的。

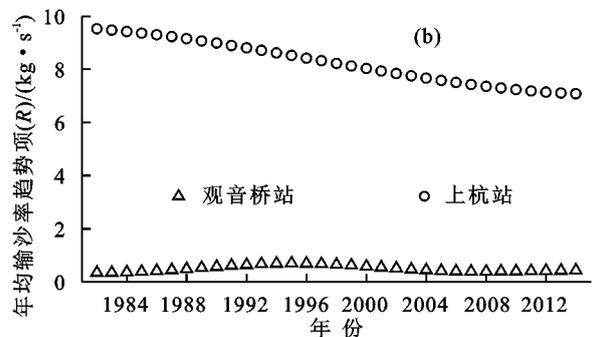


图 4 年均径流及输沙趋势项 R

表 1 汀江流域长汀段年径流量与输沙率变化趋势 M-K 检验

水文站点	Z 值		
	径流量	输沙率	降雨
观音桥	-0.90	-1.11	-0.71
上杭	-1.17	-2.33	-0.76

注:若 $|Z| > 1.65, 1.96, 2.58$ 时,水文序列的变化趋势分别达到 0.1, 0.05 和 0.01 显著性水平。

2.4 长汀段径流与输沙影响因素分析

区域内的水沙关系变化是由该区域产流、产沙、泥沙搬运及沉积等一系列复杂过程所决定,最终可通过上下游站点径流和输沙的变化量进行体现,而影响这些过程的主要因素分为自然因素和人为因素。

上下游站点间降雨—径流变化量、降雨—输沙变化量的双累积曲线(图 7)显示,二者均在 2000 年后发生不同程度的偏移,其中降雨—径流变化量双累积曲线的偏移程度较小,而降雨—输沙变化量的双累积

曲线偏移程度大,趋势斜率明显降低,这与径流与输沙的 Pettitt 突变点检验结果一致。由此,结合长汀段水沙关系变化分析结果,将汀江流域长汀段径流、输沙变化划分为 2 个阶段:基准期(1982—2000 年),人为活动影响较为有限的时期,该时段内径流和输沙主要受到自然因素降雨的影响;变化期(2001—2014 年),出现大规模的人为活动,如水土保持、水利工程等影响区域内土壤侵蚀等过程,进而影响径流和输沙变化。通过拟合基准期降雨—径流变化量和降雨—输沙变化量双累积曲线方程计算变化期(突变后)累积径流和输沙变化量(表 2),与计算累积(1982—2014 年)径流变化量相比,实测累积径流变化量减少 5.14%,而实测累积输沙变化量则比计算累积输沙变化量减小 27.47%,减少幅度明显大于累积径流变化量的减少幅度。

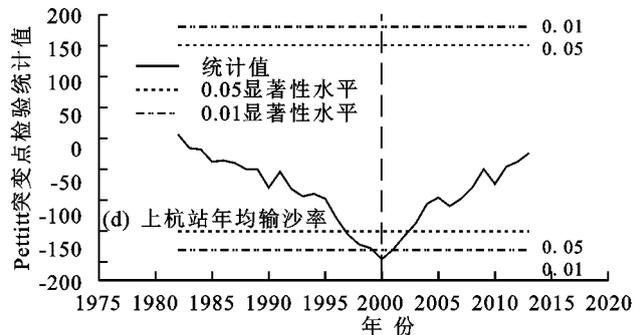
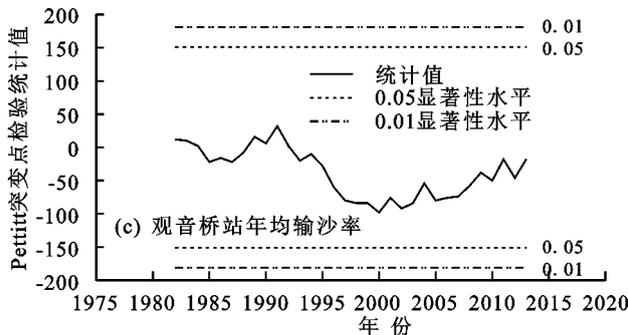
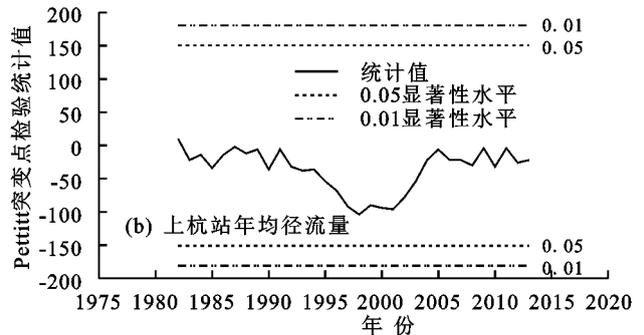
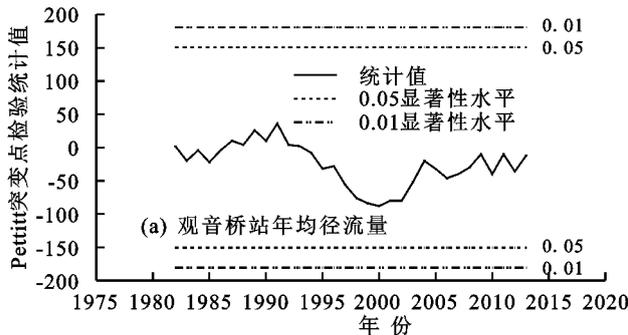


图 5 长汀段年均径流量与输沙率序列 Pettitt 突变点检验

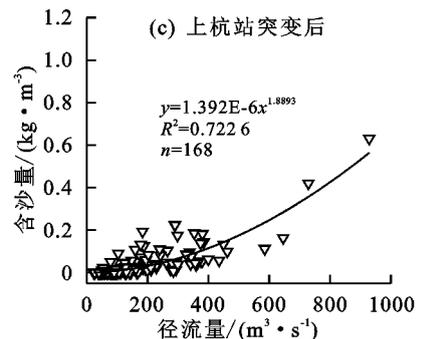
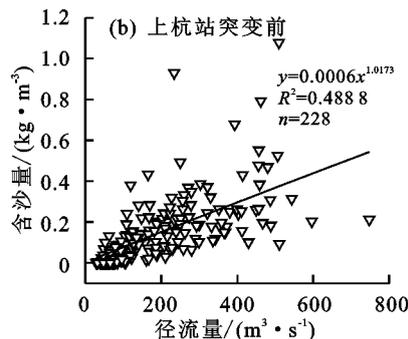
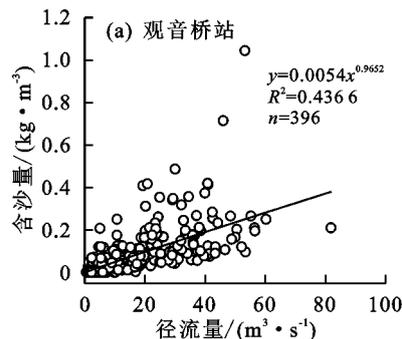


图 6 汀江流域长汀段不同时期含沙量—径流曲线(SRC)

将变化期的各年降水资料代入双累积曲线建立的回归方程,得到计算径流变化量和输沙变化量。不同时段计算值的差异,为降水变化的影响;同期计算值与实测值的差异,为人为活动的影响。从表 3 可以

看出,在变化期(2001—2014 年)降雨对 2 个站点径流变化量的贡献率在 19%~32%,人为活动对径流变化量的贡献率在 68%~81%,人为活动影响的贡献率大于降雨的贡献率;降雨对输沙变化量的贡献率

在 2%~10%，人为活动影响的贡献率则达到 90%~98%，人为活动影响输沙变化的贡献率也大于降雨，且在变化期内，人为活动影响的贡献率有逐渐增大的趋势。同时，综合降雨与人为活动对长汀段径流和输

沙变化量的影响分析发现，人为活动对于减少输沙的贡献大于减少径流的贡献，这也进一步对汀江流域长汀段径流、输沙变化特征和突变前后水沙关系的变化进行了解释。

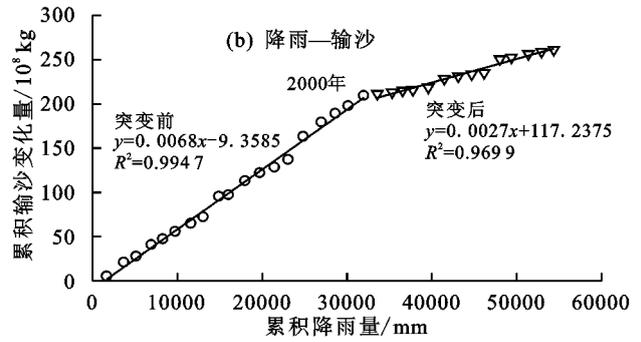
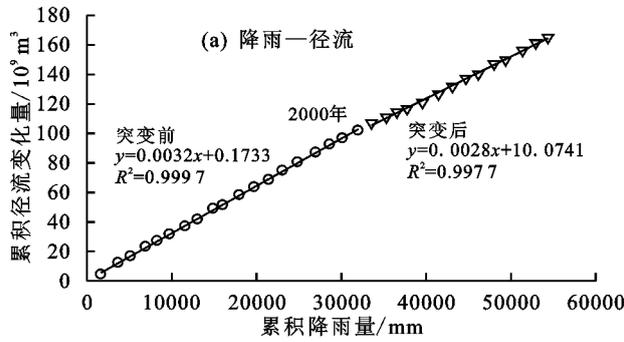


图 7 降雨与径流、输沙变化量的双累积曲线

表 2 双累积曲线线性回归估算

回归方程	计算累积值	实测累积值	累积减少量	减少百分率/%
$\Sigma R = 0.0032 \Sigma P + 0.1733 (R^2 = 0.9997, n = 19)$	$174.12 \times 10^9 \text{ m}^3$	$165.07 \times 10^9 \text{ m}^3$	$8.95 \times 10^9 \text{ m}^3$	5.14
$\Sigma S = 0.0068 \Sigma P - 9.3585 (R^2 = 0.9947, n = 19)$	$360.27 \times 10^8 \text{ kg}$	$261.29 \times 10^8 \text{ kg}$	$98.98 \times 10^8 \text{ kg}$	27.47

表 3 汀江流域长汀段径流与输沙影响因素分析

时期	时段/a	实测径流 变化量/ 10^{10} m^3	计算径流 变化量/ 10^{10} m^3	降水 影响/%	人为活动 影响/%	实测输沙 变化量/ 10^9 kg	计算输沙 变化量/ 10^9 kg	降水 影响/%	人为活动 影响/%
基准期	1982—2000	10.20	—	—	—	20.90	—	—	—
	2001—2005	1.90	2.49	24.26	75.74	0.95	5.06	9.80	90.20
变化期	2006—2010	2.63	2.70	19.80	80.20	3.20	5.73	8.34	91.66
	2011—2014	1.79	2.03	31.73	68.27	1.06	4.32	2.53	97.47

3 讨论

河川的水沙变化是由气候和人为活动共同作用的结果^[3-7]，然而两大影响因素在不同时期的贡献率不同。通常认为^[4]，气候因素的贡献率不断降低，人为活动的贡献率持续增加。本研究结果表明，2000年以后汀江流域长汀段径流量和输沙率均有所减小，且输沙率减小明显，其中人为活动对这种变化的贡献率远大于气候因素。

长汀段位于南方红壤区，年降雨量大，且多年来未出现明显的减少趋势，因此降雨对水沙变化的影响较小。而该区域受到的人为活动因素中影响最为广泛的即为 2000 年以后大规模的水土流失治理工程。作为南方典型水土流失区，长汀地区水土流失具有侵蚀地块呈点斑状分布，隐蔽性强，潜在危险性大，崩岗侵蚀剧烈，森林覆盖率较高，但大量林地结构单一，林下水土流失严重^[1]等特点。因此，水土流失治理以崩岗综合治理、侵蚀退化林地治理、坡地果(茶)园综合治理、坡耕地水土流失综合治理等模式为主。由图 8 可知，2000 年以后，长汀县封禁治理、生态林草、低效

林改造、经果林、坡耕地改造等水土保持措施面积迅速增加，其中以封禁治理最为突出。上述措施主要通过增加地表植被覆盖率，可拦截降雨、改良土壤和增加入渗，进而降低地表径流、泥沙^[28]，通过坡改梯和坡面蓄水、排水，可有效防止土地退化，减少坡面产流输沙^[1]，最终使流域内侵蚀产沙量减少，这恰好与长汀段自 2000 年后河流含沙量显著降低的现象相对应。由此可见，长汀水土流失治理对于该区域输沙量锐减起到了关键的作用。许多针对南方其他流域水沙变化的研究^[8-9]也得到了相似的结论。但不同水土保持措施防治流域侵蚀产沙的作用机理不同，导致流域水沙对不同水土保持措施体系的响应也不同^[7]。由于南方流域水土保持措施的实施情况参差不齐，大多未形成完善的措施体系，且水库等水利工程星罗棋布，影响因素较多，不利于研究区域水沙变化与水土流失治理的关系及对其成效的科学评价。长汀水土流失治理具有持续时间长、措施体系完善等特点，是南方水土保持的典型代表，但该地区所实施的水土保持措施对当地河流径流输沙的影响及内在机制等仍然不明，相关研究需要进一步深入探讨。

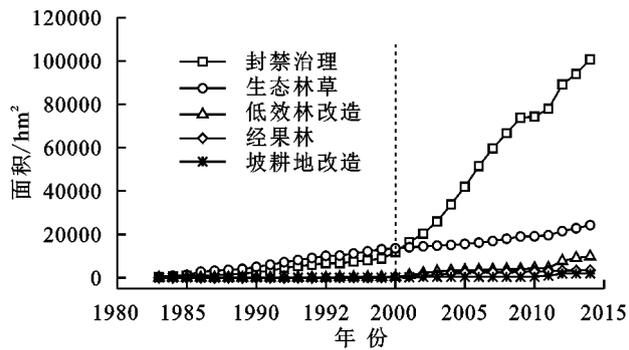


图 8 1983—2014 年长汀县水土保持措施面积

4 结论

(1) 1982—2014 年, 年际尺度下汀江流域长汀段降雨和径流呈现不显著的减小趋势, 而输沙率显著下降, 径流与输沙的周期性及变化趋势存在不同步现象。

(2) 汀江流域长汀段径流不存在显著的突变年份, 而输沙则于 2000 年发生明显突变, 突变前径流含沙量主要集中在 $0 \sim 0.2 \text{ kg/m}^3$, 而突变后含沙量主要在 $0 \sim 0.1 \text{ kg/m}^3$ 范围内。基于 SRC 曲线分析表明, 2000 年以后, 长汀段进入河道的泥沙量大大减少从而导致突变前后水沙关系发生变化。

(3) 汀江流域长汀段水沙发生突变后, 径流量和输沙量均减小, 而人为活动是影响径流和输沙变化的主要驱动力, 其对径流变化的贡献率为 $68\% \sim 81\%$, 对输沙变化的贡献率为 $90\% \sim 98\%$ 。人为活动对输沙减少的贡献率明显大于对径流减少的贡献率, 其中, 以封禁治理、生态林草等为主的水土保持措施的实施是长汀段径流、输沙减少的最重要原因。

参考文献:

[1] 黄炎和. 水土保持学(南方本)[M]. 福建: 中国农业出版社, 2016.

[2] 郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5106-5117.

[3] 鲍振鑫, 张建云, 王国庆, 等. 基于水文模型与机器学习集合模拟的水沙变异归因定量识别: 以黄河中游窟野河流域为例[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 485-496.

[4] 姜泓旭, 田鹏, 穆兴民, 等. 不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 86-92.

[5] Liu C, Sui J, Wang Z Y. Changes in runoff and sediment yield along the Yellow River during the period from 1950 to 2006[J]. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2): 129-139.

[6] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119.

[7] 姚文艺, 高亚军, 张晓华. 黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 1-11.

[8] 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[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 935-946.

[9] Guo L P, Mu X M, Hu J M, et al. Assessing impacts of climate change and human activities on streamflow and sediment discharge in the Ganjiang river basin (1964—2013)[J]. Water, 2019, 11(8): 1679-1699.

[10] 蒋芳市, 黄炎和, 钟炳林, 等. 不同治理措施对侵蚀红壤区生物量及生产力的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 12-16.

[11] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 1-8.

[12] 王振平, 汪小钦, 林敬兰, 等. 1982—2014 年汀江流域长汀段水沙演变规律分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 8-12, 50.

[13] 周素萍, 张兴奇. 汀江上游水沙变化特征分析[J]. 水文, 2010, 30(2): 89-92.

[14] 唐丽芳. 汀江长汀段水沙变化及其与水土保持关系探讨[J]. 亚热带水土保持, 2017, 29(3): 28-31.

[15] 王培俊, 刘旗, 孙煌, 等. 南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 219-228.

[16] 刘文, 彭绍云. 新形势下纵深推进汀水土流失治理的实践与探索[J]. 亚热带水土保持, 2021, 33(1): 34-36, 39.

[17] Torres M E, Colominas M A, Schlotthauer G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]. IEEE International Conference on Acoustics. IEEE, 2011.

[18] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.

[19] Zhang J P, Xiao H L, Zhang X, et al. Impact of reservoir operation on runoff and sediment load at multi-time scales based on entropy theory[J]. Journal of Hydrology, 2019, 569: 809-815.

[20] Douglas E M, Vogel R M, Kroll C N. Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240(1/2): 90-105.

[21] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2): 126-135.

[22] 黄萱. 植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制: 以堵河流域为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.

- 水利部西北水土保持研究所集刊,1993,1(3):11-16.
- [18] 张希彪,上官周平.黄土高原子午岭种子植物区系特征研究[J].生态学杂志,2005,24(8):872-877.
- [19] Fu B J, Liu S L, Chen L D, et al. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape [J]. Ecological Research,2004,19(1):111-118.
- [20] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. Journal of Arid Environments,2006,64(1):77-96.
- [21] Wang L, Mu Y, Zhang Q F, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the northern Loess Plateau of China [J]. Clean-Soil, Air, Water,2012,40(1):7-15.
- [22] Ma Z Y, Liu H Y, Mi Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production [J]. Nature Communications,2017,8:e15378.
- [23] Yang H J, Wu M Y, Liu W X, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe [J]. Global Change Biology,2011,17(1):452-465.
- [24] Yang Z L, Zhang Q, Su F L, et al. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species [J]. Global Change Biology,2017,23(1):154-163.
- [25] 李军祥,曾辉,朱军涛,等.藏北高原高寒草甸生态系统呼吸对增温的响应 [J]. 生态环境学报,2016,25(10):1612-1620.
- [26] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(8):2883-2892.
- [27] Saito H, Šimušnek J. Effects of meteorological models on the solution of the surface energy balance and soil temperature variations in bare soils [J]. Journal of Hydrology,2009,373(3/4):545-561.
- [28] Zou C B, Barron-Gafford G A, Breshears D D. Effects of topography and woody plant canopy cover on near-ground solar radiation: Relevant energy inputs for ecohydrology and hydrogeology [J]. Geophysical Research Letters,2007,34(24):229-241.
- [29] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异 [J]. 生态学报,2016,36(11):3338-3349.
- [30] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field [J]. Journal of Hydrology,2013,489:148-159.
- [31] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究 [J]. 生态学报,2014,34(23):7038-7046.
- [32] Wang Y, Shao M A, Warrington Z L. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. Hydrological Sciences Journal,2012,57(2):265-281.
- [33] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21 m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma,2013,193:300-310.
- [34] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究 [J]. 农业工程学报,2006,22(12):65-71.
- [35] 殷文,陈桂平,柴强,等.前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响 [J]. 中国农业科学,2016,49(15):2898-2908.
- [36] 车宗玺,李进军,汪有奎,等.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征 [J]. 生态学报,2018,38(1):105-111.
- [37] 李军祥,张扬建,朱军涛,等.藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应 [J]. 生态学报,2019,39(2):474-485.
- [25] 解的赣江径流多尺度变化特征 [J]. 水力发电,2018,44(8):18-22.
- [26] 任宗萍,谢梦瑶,马勇勇,等.乌兰木伦河 1960—2015 年水沙周期性分析 [J]. 水土保持研究,2018,25(6):74-78.
- [27] 王振平.汀江流域长汀段水沙变化特性及其影响因素定量研究 [D]. 福建:福州大学,2017.
- [28] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述 [J]. 水土保持研究,1996,3(3):104-110.

(上接第 129 页)

- [23] Asselman N. Fitting and interpretation of sediment rating curves [J]. Journal of Hydrology,2000,234(3/4):228-248.
- [24] Gao P, Li P F, Zhao B L, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations [J]. Hydrological Processes,2017,31(16):4639-4646.
- [25] 万智巍,贾玉连,洪祎君,等.基于完备集合经验模态分