doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.028

松花江流域极端降雨变化对流域输沙量的影响

钟科元[1]　郑粉莉[1,2]　吴红艳[1]　覃　超[1]

(1.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100;
2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:基于松花江流域及其周边共 43 个气象站点 1960—2014 年逐日降雨数据及佳木斯水文站输沙量数据,采用 Mann-Kendall 非参数趋势分析方法、小波周期性分析和双累积曲线法,分析了流域内 7 个极端降雨指数和输沙量的动态变化趋势,在此基础上定量评估了流域极端降雨变化对输沙量的影响。结果表明:1960—2014 年间,松花江流域 7 个极端降雨指数(最大 1 d 降雨量(RX1day)、连续 5 d 最大降雨量(RX5day)、降雨强度指数(SDII)、大于 95% 分位值强降雨量(P95pTOT)、大雨量(HP)、暴雨量(RSP)和汛期降雨量(FSPTOT))皆呈阶段性波动变化,存在 16~20 a 的大周期和 5~6 a 的小周期变化特征,但近 55 a 各极端降雨指数整体上呈不显著的变化趋势;期间佳木斯水文站输沙量的变化趋势与 7 个极端降雨指数的变化趋势类似。松花江流域各极端降雨指数与输沙量均存在极显著相关性($p<0.01$),其中 RX5day、P95pTOT 与输沙量的相关性最显著。双累积曲线分析显示,流域输沙量与各极端降雨指数关系的突变点均发生在 1977 年。与基准期(1960—1977 年)相比,1978—2014 年松花江流域各极端降雨指数对输沙量变化的影响在 3.09% ~15.24% 之间,其中 SDII 变化对输沙量的影响最大(15.24%),其次是 FSPTOT(14.81%)和 RX5day(14.34%)。

关键词:输沙量;极端降雨;变化趋势;影响评估;松花江流域

中图分类号:S157.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)08-0245-08

Effects of Precipitation Extremes Change on Sediment Load in Songhua River Basin

ZHONG Keyuan[1]　ZHENG Fenli[1,2]　WU Hongyan[1]　QIN Chao[1]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Study on the effects of extreme precipitation events on runoff and sediment load not only can reveal the mechanism of runoff and sediment, but also provide important scientific support for basin disaster warning. Currently, there is limited information on the effects of extremes precipitation events on river sediment load. Thus, Songhua River Basin (SRB), located in the northeast of China was selected as study area, and daily precipitation data from 43 meteorological stations within and surrounding the SRB and sediment load from Kiamusze hydrologic station during 1960—2014 were collected. Seven extreme precipitation indices, including maximum 1-day precipitation (RX1day), maximum 5-day precipitation (RX5day), simple daily intensity index (SDII), strong rainfall more than 95% points value (P95pTOT), heavy precipitation (HP), rainstorm precipitation (RSP) and flood season precipitation (FSPTOT)) were chosen to quantify precipitation extremes. The Mann-Kendall's non-parametric trend analysis method and wavelet periodic analysis method were used to analyze the dynamic change of precipitation extremes and sediment load. Double mass curve method was used to assess the effect of extreme precipitation events on sediment load change. The results showed as follows: there was no significant change trend of the seven precipitation extreme indices during 1960—2014; while there

收稿日期:2016-12-21　修回日期:2017-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41571263)

作者简介:钟科元(1987—),男,博士生,主要从事水土保持与水文过程模拟研究,E-mail:zkygeo@163.com

通信作者:郑粉莉(1960—),女,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究,E-mail:flzh@ms.iswc.ac.cn

existed 16 ~ 20 a main period and 5 ~ 6 a minor period. Meanwhile, the change trend of sediment load in Kiamusze hydrologic station was similar with the precipitation extremes. The precipitation extreme indices had highly significant correlation with sediment load ($p < 0.01$) in the SRB, among which correction between sediment load and RX5day and P95pTOT was the most significant. The abrupt change by double mass curve method indicated that the abrupt change point between sediment load and each extreme precipitation index occurred in 1977. Compared with the baseline period in 1960—1977, the effects of precipitation extreme indices on the sediment load were ranged from 3.09% to 15.24% in 1978—2014, in which the effect of SDII was the highest with 15.24%, followed by FSPTOT with 14.81% and RX5day with 14.34%. These findings would provide useful information for forecasting sediment disaster and taking measures in conserving soil and water in the SRB.

Key words: sediment load; precipitation extremes; change trend; effect assessment; Songhua River Basin

引言

流域侵蚀产沙是地球化学循环的重要过程,受多种因素影响[1],其中降雨是土壤侵蚀发生的主要营力,降雨量、降雨强度和降雨历时直接影响土壤侵蚀强度[2-3]。相关研究表明,降雨特别是极端降雨事件对流域产流、产沙的形成具有重要的影响,流域土壤侵蚀主要由少数几场大雨或暴雨事件引起,一次大暴雨所产生的侵蚀量可占年侵蚀总量的 60% 甚至 90% 以上[3-4]。有学者指出,在极端降雨条件下,水土保持综合治理的减水减沙效益很低[5-6],甚至出现负效应的情况[7]。因此分析极端降雨事件对流域产流、产沙过程的影响,对流域水土流失防治具有重要意义。

极端降雨(Precipitation extremes)是近年来研究的热点问题,已取得了一系列研究成果[8-10],而从流域尺度分析极端降雨事件的动态变化对流域输沙量的影响研究较少报道[11]。孙维婷[12]采用双累积曲线法分析表明,黄土高原延河流域 1970—1996 年极端暴雨量与径流量、输沙量表现出显著的线性相关性,极端暴雨量对径流量和输沙量有着直接的影响,而 1996—2010 年极端暴雨量与径流量、输沙量无明显的线性相关关系。徐天乐等[13]研究发现极端降雨对辽东山区次生生态系统土壤侵蚀的影响异常强烈,同时容易引发地质灾害。卫伟等[11]研究发现黄土丘陵沟壑区降雨量和降雨强度都很高的极端降雨事件对土壤侵蚀影响显著,但高强度、历时短的极端降雨事件所产生的破坏也不容低估。这些研究表明极端降雨改变了坡面土壤入渗-产流特征,且更容易引发地表径流,并加剧土壤侵蚀,从而引起河流输沙量的变化。

松花江流域是中国主要黑土分布区、粮食产区和商品粮基地,近年来,东北黑土区土壤侵蚀和土地退化引起了人们的广泛关注[14],许多学者对黑土区土壤侵蚀机理[14-15]、流域水沙变化特征[16]以及水土流失的防治措施[17]等方面进行了分析和探讨。东北黑土区地形坡度小,坡面侵蚀面积大,坡脚沉积量大,河道输沙量小,与黄河和长江流域相比,气候变化对松花江流域的水沙变化影响的相关研究很少涉及[17]。目前尚不清楚松花江降雨变化特别是极端降雨变化与流域输沙量变化之间的定量联系[18]。

本文以松花江流域及其周边共 43 个气象站点 1960—2014 年逐日降雨数据及佳木斯水文站输沙量数据为基础,选取 7 个极端降雨指数,采用Mann-Kendall非参数趋势分析和小波周期性分析方法以及双累积曲线法,分析流域内极端降雨和输沙量的动态变化趋势,在此基础上定量评估流域极端降雨变化对输沙量变化的影响,以期为流域水土流失的治理和生态建设提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松花江流域位于中国东北地区的北部(图 1),流域面积 54.6 万 km^2,位于 41°42′ ~ 51°38′N、119°25′ ~ 132°31′E 之间。流域多年平均气温在 3 ~ 5℃之间,年降雨量在 300 ~ 1 200 mm 之间,东南部山区年降雨可达 700 ~ 800 mm,西部地区只有 400 mm,整体呈现从东南向西北递减的趋势,流域

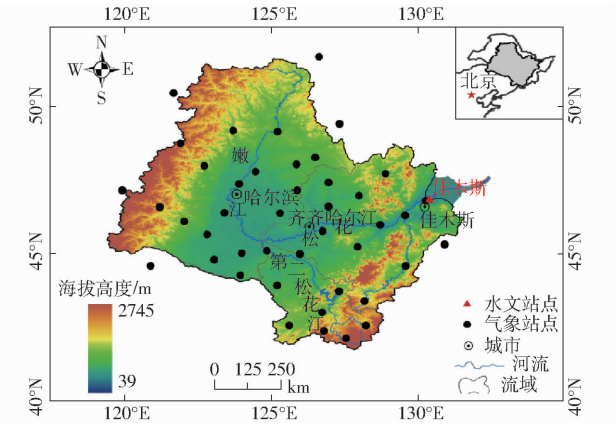

图 1 研究区地理位置与气象站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations

多年平均径流量为 632.0 亿 m^3（1955—2010 年），多年平均输沙量为 1 259 万 t（1955—2010 年）[19]。流域内地形以平原为主，主要有中部的松嫩平原和东北部的三江平原。流域西部为大兴安岭，东部为长白山区，分别发育了嫩江和第二松花江，两河于三江口汇入松花江。流域内土壤以黑土和黑钙土为主，其中黑土分布范围最广，占我国黑土面积的 60%[20]。佳木斯水文站位于流域的下游，控制面积为52.83 万 km^2，占松花江流域面积的 95.7%。

1.2　数据来源与质量控制

气象数据来自中国气象数据网（http://data.cma.cn），包括松花江流域及其近邻共 75 个气象站点逐日降雨量数据。由于不同站点数据起始时间不同，并且同一站点部分数据会出现缺测情况，本文根据以下标准：数据不得少于 55 a；单个站点缺失数据不得超过 30 d。对于单个站点的若干数据缺失，采用附近 2 个或 2 个以上站点降雨量的平均值进行填补，从而得到完整序列降雨量数据。本文最终选取 43 个气象站 1960—2014 年逐日降雨量数据（图 1）。

泥沙数据来源于《松辽河流域河流泥沙公报》，选取佳木斯水文站 1960—2014 年输沙量数据。为了简化表述，本文将佳木斯以上流域称为松花江流域，佳木斯水文站的输沙量数据即是松花江流域输沙量数据。

1.3　研究方法

1.3.1　极端降雨指数选取

选取的极端降雨指数主要参照了气候变化检测与极端气候事件指数专家组（ETCCDI）确定的表征极端气候事件的核心气候指数[21]（表 1）。近年来这些指数（P95pTOT、RX1day、RX5day 和 SDII）被各国学者广泛应用[22-23]，并且取得了一系列研究成果；大雨量（HP）和暴雨量（RSP）也被认为是影响土壤侵蚀的重要指数[24]；另外，汛期降雨量（FSPTOT）是反映流域主要发生侵蚀阶段的降雨综合指数。为此，本文综合选取了 ETCCDI 确定的 P95pTOT、RX1day、RX5day、SDII 4 个指数以及大雨量（HP）、暴雨量（RSP）和汛期降雨量 FSPTOT 共 7 个极端降雨指数（表 1）。

表 1　极端降雨指数

Tab.1　Indices of extreme precipitation events

参数	含义
大于 95% 分位值强降雨量（P95pTOT）/mm	大于 95% 降雨量阈值的降雨总量
最大连续 5 d 降雨量（RX5day）/mm	连续 5 d 降雨量的最大值
最大 1 d 降雨量（RX1day）/mm	日降雨量的最大值
降雨强度（SDII）/（$mm \cdot d^{-1}$）	雨天平均降雨量（雨天降雨量与降雨天数的比值）
大雨量（HP）/mm	日降雨量在 25 ~ 50 mm 的总量
暴雨量（RSP）/mm	日降雨量大于 50 mm 的总量
汛期降雨量（FSPTOT）/mm	6 月 1 日—9 月 30 日降雨量

注：雨天降雨量是指降雨量大于 1 mm 的降雨量之和。

1.3.2　Mann - Kendall 趋势分析和小波周期性分析

采用 Mann - Kendall 趋势分析法，分析极端降雨指数和输沙量的变化趋势。Mann - Kendall 是一种非参数检验方法，原始数据不需要遵从一定的分布，且不受少数异常值的干扰，因此被广泛应用到水文气象数据的时间序列趋势分析中[23,25]。Mann - Kendall 法通过统计量 Z 值判断该序列数据的变化趋势。$Z>0$ 时表示呈上升趋势，$Z<0$ 表示呈下降趋势，Z 的绝对值越大，说明该序列的变化趋势越显著。$Z>1.96$，说明通过 $p<0.05$ 显著性检验，$Z>2.32$，则通过 $p<0.01$ 显著性检验。

采用 Morlot 连续复小波分析方法（Wavelet analysis）[26-27]分析松花江水沙时间序列的多时间尺度特征和周期性变化。小波分析方法能够反映时间序列的局部变化特征，可以看到每一时刻在各周期中所处的位置，能够更好地分析序列随时间的变化情况，近年来被广泛应用于水文气象数据的多尺度分析。通过小波方差可以判断序列数据的周期性变化，通过不同时间尺度的小波实部变化，可以判断不同时间尺度下序列数据的变化特征。

1.3.3　双累积曲线法

双累积曲线是在直角坐标系中绘制的同期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系曲线，它是一种检验 2 个参数间关系一致性及其变化的常用方法，目前被广泛应用于分割气候要素变化对流域水沙变化的影响研究[1,17]。在分析极端降雨指数对河流输沙量变化关系时，可以通过输沙量-极端降雨指数双累积曲线，判断两者关系的突变点。

在分析极端降雨指数变化对河流输沙量的影响时，也可采用输沙量-极端降雨指数双累积曲线。首先，建立突变年份前的输沙量-极端降雨指数双累积曲线方程；然后，将突变点后极端降雨指数的累积值代入突变年份前的输沙量-极端降雨指数双累积曲线拟合直线方程；最后，对比突变点后的实际累积输沙量与拟合累积输沙量差异，可以判断突变点后极

端降雨指数变化对输沙量的影响。

2 结果与分析

2.1 松花江极端降雨指数动态变化

近 55 a 来,松花江流域各极端降雨指数均表现为波动变化,但无明显变化趋势(图 2)。各指数 Z 统计量绝对值均小于 1.96,未通过显著性检验,其中 FSPTOT、SDII、P95pTOT、RX5day 和 HP 呈不显著降低趋势($-1.96 < Z < 0$),而 RX1day 和 RSP 呈不显著增加趋势($0 < Z < 1.96$)。

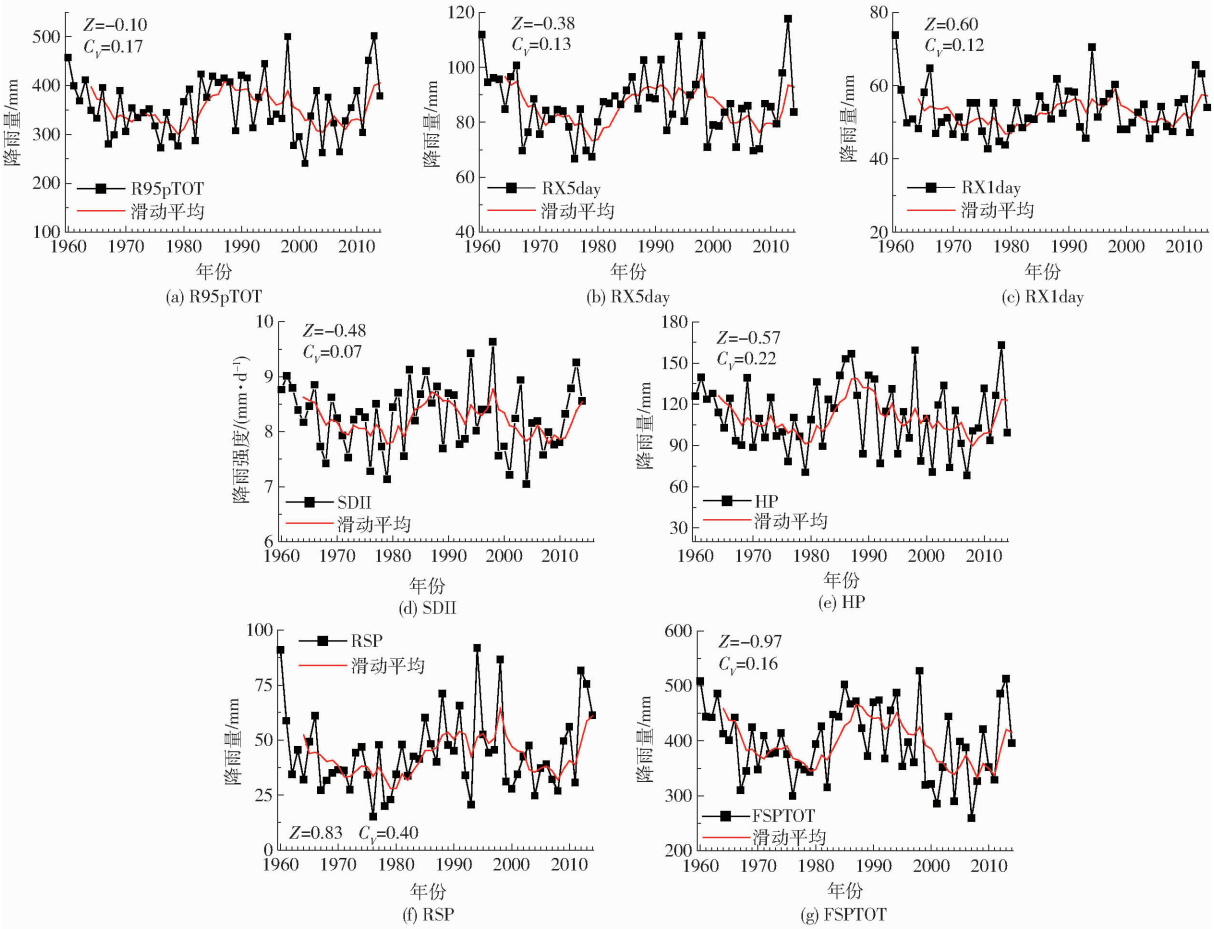

图 2 松花江流域 1960—2014 年极端降雨指数的年际变化

Fig. 2 Annual variations of precipitation extremes in SRB during 1960—2014

各极端降雨指数年际波动变化具有一定的相似性(图 2),大致可以分为 4 个阶段:20 世纪 60—80 年代为第 1 阶段,此阶段各降雨指数表现为波动下降趋势;80 年代初期—90 年代中后期为第 2 阶段,各降雨指数表现为波动上升趋势;第 3 阶段是 90 年代中后期—2010 年,此阶段各指数呈现波动下降趋势;第 4 阶段是 2010 年后,各指数进入了小幅波动上升阶段。为进一步分析极端降雨指数的周期性变化趋势,基于小波周期性分析,发现各极端降雨指数均存在以 16 ~ 20 a 为大周期,5 ~ 6 a 为小周期的变化特征(图 3)。因此,松花江流域 1960—2014 年各极端降雨指数表现为阶段性波动变化趋势,但均呈不显著变化。WANG 等[28] 和 SONG 等[29] 对东北地区降雨量的研究也得出类似的结论。

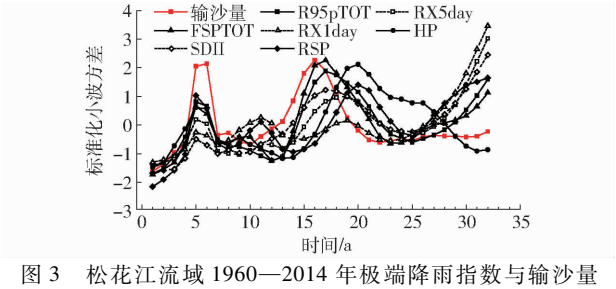

图 3 松花江流域 1960—2014 年极端降雨指数与输沙量标准化小波方差

Fig. 3 Normalized wavelet coefficient variance of precipitation extremes and sediment load in SRB during 1960—2014

2.2 松花江流域输沙量动态变化

与极端降雨指数动态变化趋势类似,松花江流域输沙量也呈现阶段性变化(图 4),即第 1 阶段,1960—1979 年呈现下降趋势,在 1979 年达到最低值 211 万 t;第 2 阶段,1980—1994 年呈增加趋势,在 1994 年达到最大值为 3 970 万 t;第 3 阶段,1994—2008 年流域输沙量表现为波动下降趋势;第 4 阶段,在 2008 年以后,流域输沙量呈现小幅上升

趋势。整体上来说，55 a 间流域输沙量呈明显的波动变化，变异系数为 0.57。Mann－Kendall 趋势检验结果表明，在 1960—2014 年松花江输沙量呈不显著增加趋势（$Z=0.52$）。同时，小波周期性分析也发现流域输沙量变化与极端降雨指数的周期性变化相似（图 3），也存在以 16 a 为大周期，6 a 为小周期的变化趋势。

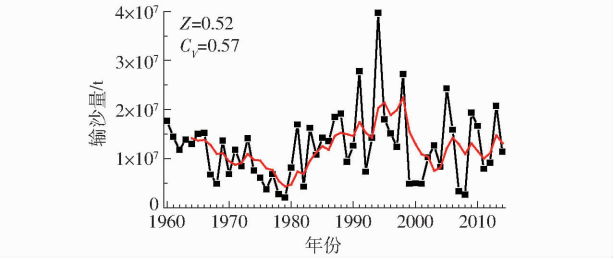

图 4　松花江流域 1960—2014 年输沙量动态变化

Fig. 4　Annual variation of sediment load in Kiamusze hydrologic station during 1960—2014

2.3　极端降雨指数对流域输沙量变化的影响

2.3.1　输沙量与各极端降雨指数的相关性分析

通过输沙量-极端降雨指数的双累积曲线可以判断输沙量与极端降雨指数关系变化的突变点。图 5 表明，松花江流域佳木斯站输沙量与各极端降雨指数累积曲线的突变点均发生在 1977 年。基于此，可判断佳木斯站输沙量与极端降雨指数的突变点发生在 1977 年，可以将 1960—1977 年定义为基准期。

通过分析不同时间段输沙量与极端降雨指数之间的相关性，可以判断两者之间的相关性水平。表 2 表明，在 1960—2014 年、1960—1977 年（突变点前期）和 1978—2014 年（突变点后期），松花江流域佳木斯水文站输沙量与各极端降雨指数均存在显著的相关性（$p<0.01$），各阶段相关系数均大于 0.71，其中 RX5day 和 P95pTOT 与输沙量的相关性平均数最大，其次为 RSP、SDII 和 FSPTOT。因此，可以认为 RX5day 和 P95pTOT 是影响流域输沙量的主要极端降雨指数。

2.3.2　极端降雨指数对流域输沙量变化的影响评估

基于输沙量与极端降雨指数变化的突变点，建立突变年份前期（基准期）输沙量-极端降雨指数双累积曲线的线性方程，然后将突变年份后期的极端降雨指数累积值代入突变年份前期输沙量-极端降雨指数双累积曲线方程，对比突变点后的实际累积输沙量与拟合累积输沙量，可以得出突变点后极端降雨指数变化对输沙量的影响。

从表 3 可以看出，与基准期（1960—1977 年）相比，松花江 1977 年以后极端降雨指数的变化对输沙量变化的影响在3.09% ~15.24% 之间，其中SDII

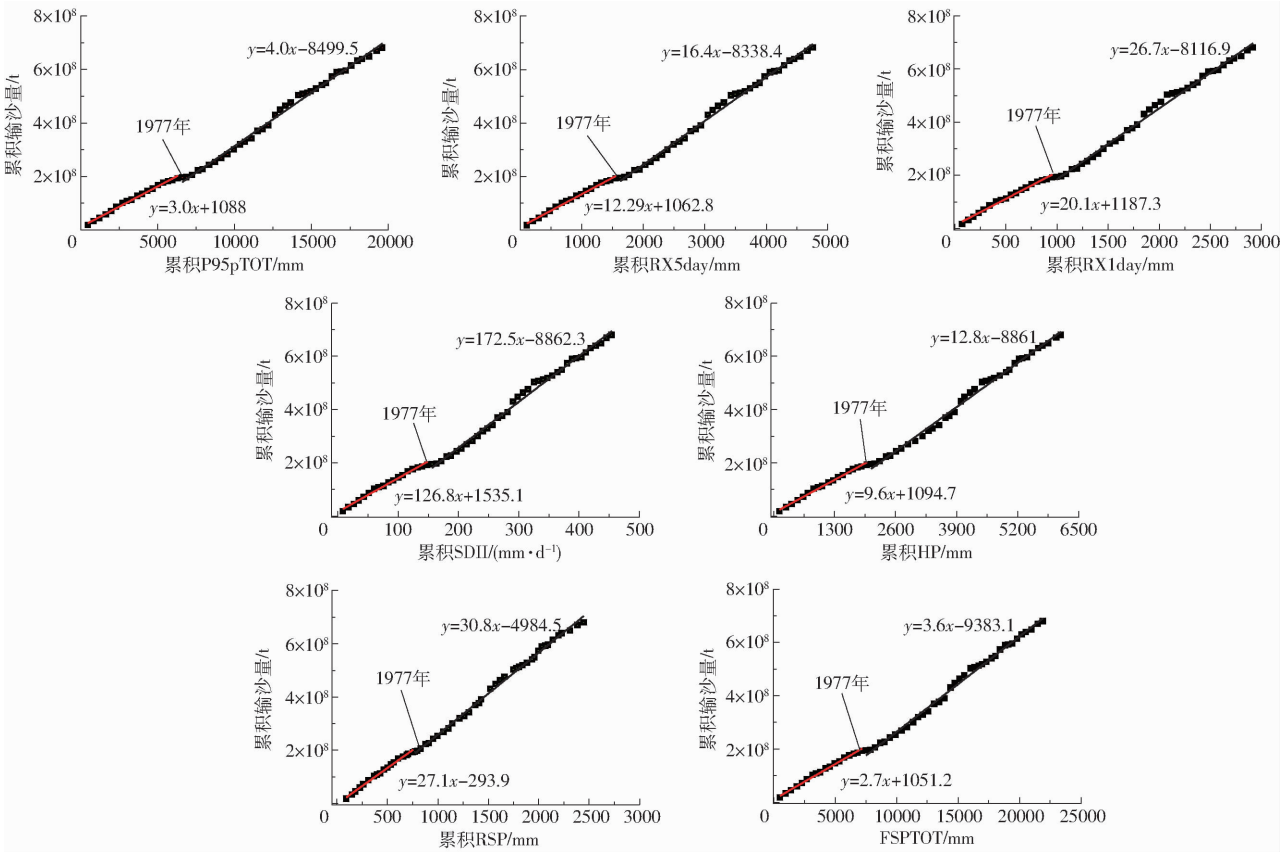

图 5　1960—2014 年松花江流域输沙量与各极端降雨指数的双累积曲线

Fig. 5　Double-mass curves between sediment load and precipitation extremes in SRB during 1960—2014

表 2 松花江流域输沙量与极端降雨指数的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between sediment load and extreme precipitation indices in SRB

极端降雨指数	1960—2014 年	1960—1977 年（突变点前期）	1978—2014 年（突变点后期）
RX5day	0.76**	0.87**	0.77**
P95pTOT	0.73**	0.83**	0.71**
RSP	0.71**	0.70**	0.73**
SDII	0.70**	0.70**	0.67**
FSPTOT	0.69**	0.83**	0.68**
RX1day	0.65**	0.71**	0.69**
HP	0.64**	0.83**	0.62**

注：** 表示通过 $p<0.01$ 显著性检验。

表 3 松花江流域极端降雨指数对输沙量的贡献率

Tab. 3 Contribution rates of precipitation extremes changes on sediment load in SRB %

极端降雨指数	贡献率
SDII	15.24
FSPTOT	14.81
RX5day	14.34
RX1Dday	13.94
HP	13.87
P95pTOT	12.33
RSP	3.09

影响最大，为 15.24%，其次是 FSPTOT（14.81%）和 RX5day（14.34%），RSP 变化量对输沙量影响最低，为 3.09%。

3 讨论

降雨是影响径流的直接原因，也是土壤侵蚀的直接动力，极端降雨的变化显著影响了流域土壤侵蚀和产沙过程[1]。流域年侵蚀量和输沙量主要来自于一场或者为数不多的几场极端降雨事件[4]。而以往类似研究，主要基于年降雨总量的变化评估年降雨量变化对输沙量的影响（表 4）。与这些研究相比，本文进一步分析了极端降雨变化对输沙量的影响，过滤了低强度、非侵蚀降雨对输沙量的影响，在分析精度上有所提高。本研究发现松花江流域在 1960—2014 年各极端降雨指数与输沙量均存在显著相关性（$p<0.01$），其中 RX5day 和 P95pTOT 与输沙量的相关性最显著。与基准期（1960—1977 年）相比，松花江流域 1978—2014 年各极端降雨指数对输沙量的影响在 3.09% ~ 15.24% 之间，即极端降雨变化对输沙量变化的影响低于 50%，因此，可以认为流域输沙量变化主要受人类活动等其他因素的影响，这与黄河流域、长江流域类似研究（表 4）结果趋于一致。李林育等[17]认为，松花江流域输沙量负荷的变化与流域内重大历史事件、国家政策等人为活动的变化密切相关。穆兴民等[30]也认为哈尔滨水文站降雨、径流、输沙序列的位相变化与开垦北大荒、引水工程、兴建水库以及黑土地水土流失综合治理等人类活动有密切联系。

表 4 不同区域降雨量变化对输沙量影响的贡献率

Tab. 4 Contribution rates of rainfall changes on sediment load in different study regions

研究区	基准期	比较期	降雨量变化对输沙量影响的贡献率/%	文献序号
黄河河龙区间	1955—1969 年	1970—1979 年	41.3	[31]
黄河上中游	1955—1969 年	1970—1986 年	43.7	[32]
河口镇-花园口区间	1950—1981 年	1982—2008 年	13.3	[33]
黄河河龙区间	1957—1969 年	20 世纪 80、90 年代和 21 世纪前 12 年	22.6、44.3 和 19.0	[34]
赣江	1950—1989 年	1990—1999 年 2000—2008 年	临界年份后输沙量的减少基本全部由人类活动的影响导致	[35]
长江流域宜昌上游	1951—1991 年	1991—2010 年	7	[1]
岷江	1951—1993 年	1994—2010 年	36	[1]
嘉陵江	1951—1985 年	1985—2010 年	20	[1]
乌江	1956—1984 年	1985—2010 年	9	[1]

通过标准化小波变换实部变化过程（图 6），可以反映不同时间尺度极端降雨指数和输沙量的变化特征，当小波实部 $W_f(a,b)$ 为正值时，对应的极端降雨和输沙量处于偏多期，负的 $W_f(a,b)$ 反映实部对应的极端降雨和输沙量处于偏少期[30]。$W_f(a,b)$ 实部值为 0，说明极端降雨和输沙量处在丰枯变化的转换点。在 5 a 时间尺度上，松花江输沙量与极端降雨指数的变化基本同步（图 6）。在 20 世纪 60—70 年代输沙量呈均匀间隔波动变化，输沙量波动较极端降雨指数波动较小；20 世纪 70—80 年代，极端降雨指数与输沙量变化趋势相吻合；20 世纪 80 年代后期—21 世纪初期，输沙量和极端降雨指数出现较剧烈的波动变化。2000—2014 年间，输沙量的丰枯变化与极端降雨指数变化趋于一致。在 16 a 时间尺度上，输沙量和各极端降雨指数变化与 5 a 时间尺度类似。1960—1968 年输沙量的波动小于极端降雨指数的波动，1968—1982 年极端降雨指数与输沙量变化趋势相吻合。1982—2007 年输沙量

呈剧烈变化且较极端降雨指数波动更剧烈。2007 年以后输沙量的丰枯变化与极端降雨指数趋于一致，略低于极端降雨指数。

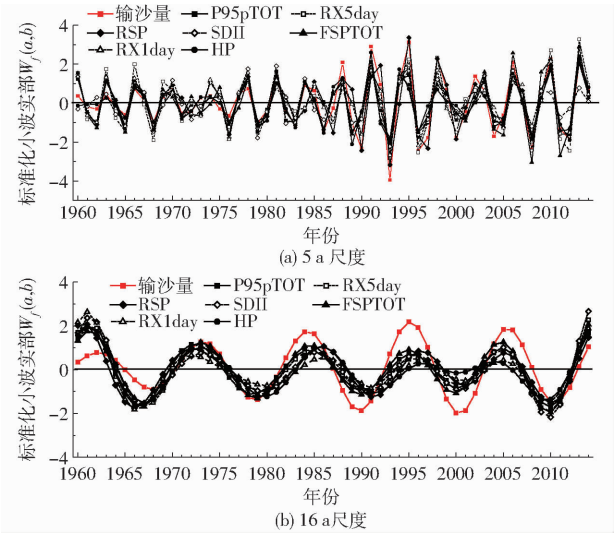

图 6　极端降雨指数和输沙量在不同时间尺度下的标准化小波实部变化曲线

Fig. 6　Normalized wavelet coefficient curves of precipitation extremes and sediment load at different time scales in SRB

松花江流域输沙量的变化是气候变化和人类活动综合作用的结果。20 世纪 60—70 年代期间，由于大规模人口迁入，水库、水利工程的修建，如生产建设兵团的组建，并进行了大面积的开荒，大跃进和人民公社化运动，以及一系列水利工程的建成（如音河水库），导致降雨与输沙量曲线位相变化发生紊乱[36]，输沙量的变幅小于极端降雨事件的变化。20 世纪 80 年代以后，极端降雨和输沙量出现剧烈的波动，且输沙量较极端降雨指数更加剧烈。一方面，可能是在这期间极端降雨事件的频发，引起了输沙量的剧烈波动[17]，如 1991、1994 和 1998 年 3 次大洪水在 5 a 尺度上反映得非常明显；另一方面，可能是人类活动的作用加强，输沙量负荷呈现显著增长的趋势[17]，输沙量波动较极端降雨指数变化更剧烈。此外，1999 年以后，由于实行退耕还荒、天然林保护工程，建设松嫩平原农田保护和三江平原农业生产基地保护体系以及东北黑土区水土流失综合治理试点工程，使得 2007 年以后输沙量变化低于极端降雨指数的变化[30]。

4　结论

（1）55 a 来松花江流域 7 个极端降雨指数（P95pTOT、RX1day、RX5day、SDII、HP、RSP 和 FSPTOT）皆呈阶段性波动变化，其中 20 世纪 60—80 年代呈波动下降趋势，20 世纪 80 年代初期—90 年代中后期呈波动上升趋势，20 世纪 90 年代中后期—2010 年各指数呈现波动下降趋势，2010 年后各极端降雨指数呈现小幅波动上升，并且存在以 16 ~ 20 a 为大周期、5 ~ 6 a 为小周期的变化特征；佳木斯水文站输沙量变化与极端降雨指数变化趋势类同。

（2）佳木斯水文站输沙量与各极端降雨指数均存在极显著关系（$p < 0.01$），突变点前后 2 个时期（1960—1977 年和 1978—2014 年）的相关系数均大于 0.71，其中 RX5day 和 P95pTOT 与输沙量相关性最显著，其后依次为 RSP、SDII 和 FSPTOT；输沙量与各极端降雨指数的累积曲线的突变点均发生在 1977 年。

（3）与基准期（1960—1977 年）相比，1978—2014 年松花江极端降雨指数的变化对输沙量变化的影响在 3.09% ~ 15.24% 之间，其中 SDII 影响最大为 15.24%，其次是 FSPTOT（14.81%）和 RX5day（14.34%），也说明极端降雨以外的人类活动等因素对流域输沙量变化的影响占主导作用。

参　考　文　献

1　黄小燕，韦杰. 长江上游流域降雨侵蚀力变化对河流输沙量的影响[J]. 长江流域资源与环境，2015，24(9)：1606 - 1612.
HUANG Xiaoyan，WEI Jie. Effect of basin rainfall erosivity change on the riverine sediment load in the upper Yangtze[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2015，24(9)：1606 - 1612. (in Chinese)

2　LU X X，RAN L S，LIU S，et al. Sediment loads response to climate change：a preliminary study of eight large Chinese rivers[J]. International Journal of Sediment Research，2013，28(1)：1 - 14.

3　WANG Shuai，FU Bojie，PIAO Shilong，et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience，2016，9(1)：38 - 41.

4　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.
ZHOU Peihua，WANG Zhanli. Soil erosion on the loess plateau[J]. Journal of Soil Water Conservation，1992，6(3)：1 - 5. (in Chinese)

5　王光谦，张长春，刘家宏，等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究，2006，51(2)：10 - 16.
WANG Guangqian，ZHANG Changchun，LIU Jiahong，et al. Analyses on the variation of vegetation coverage and water sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River basin[J]. Journal of Sediment Research，2006，51(2)：10 - 16. (in Chinese)

6　许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因[J]. 泥沙研究，2004，49(2)：5 - 10.

XU Jiongxin. Recent tendency of sediment reduction in the middle Yellow River and some counter measures[J]. Journal of Sediment Research,2004,49(2):5 - 10. (in Chinese)

7 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系——以富县"7·21"特大暴雨为例[J]. 生态学报,2016,36(15):4635 - 4643.
HAN Yong,ZHENG Fenli,XU Ximeng,et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: a case study of the "7·21" disaster in Fuxian County[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4635 - 4643. (in Chinese)

8 任正果,张明军,王圣杰,等. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014,69(5):640 - 649.
REN Zhengguo,ZHANG Mingjun,WANG Shengjie,et al. Changes in precipitation extremes in South China during 1961—2011 [J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(5): 640 - 649. (in Chinese)

9 DU Haibo,WU Zhengfang,ZONG Shengwei,et al. Assessing the characteristics of extreme precipitation over Northeast China using the multifractal detrended fluctuation analysis[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2013,118(12):6165 - 6174.

10 WU Xushu,WANG Zhaoli,ZHOU Xiaowen,et al. Observed changes in precipitation extremes across 11 basins in China during 1961—2013[J]. International Journal of Climatology,2016,36(8):2866 - 2885.

11 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[J]. 干旱区地理,2007,30(6):896 - 901.
WEI Wei,CHEN Liding,FU Bojie,et al. Extreme rainfall events and their effects on runoff and sediment yield in the loess hilly area[J]. Arid Land Geography,2007,30(6):896 - 901. (in Chinese)

12 孙维婷. 延河流域极端降水时空变化及其对水沙变化的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
SUN Weiting. Spatial-temporal change of extreme precipitation and their effects on relation of runoff and sediment in Yanhe basin [D]. Yangling:Northwest A&F University,2015. (in Chinese)

13 徐天乐,朱教君,于立忠,等. 极端降雨对辽东山区次生林土壤侵蚀与树木倒伏的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(8):1712 - 1719.
XU Tianle,ZHU Jiaojun,YU Lizhong,et al. Impacts of extreme rainfall on soil erosion and tree-falling in secondary forest ecosystems in mountainous regions of eastern Liaoning Province,Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(8):1712 - 1719. (in Chinese)

14 郑粉莉,边锋,卢嘉,等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):90 - 97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160213&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.013.
ZHENG Fenli,BIAN Feng,LU Jia,et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(2):90 - 97. (in Chinese)

15 胡伟,郑粉莉,边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报,2016,36(15):4708 - 4717.
HU Wei,ZHENG Fenli,BIAN Feng. Effects of raindrop kinetic energy on splash erosion in the typical black soil region of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4708 - 4717. (in Chinese)

16 孙力,安刚,丁立,等. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J]. 气象学报,2000,58(1):70 - 82.
SUN Li,AN Gang,DING Li,et al. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in Northeast China[J]. Acta Meteorologica Sinica,2000,58(1):70 - 82. (in Chinese)

17 李林育,焦菊英,李锐,等. 松花江流域河流泥沙及其对人类活动的响应特征[J]. 泥沙研究,2009,54(3):62 - 70.
LI Linyu,JIAO Juying,LI Rui,et al. Response characteristics of sediment to human activities in the Songhua River basin[J]. Journal of Sediment Research,2009,54(3):62 - 70. (in Chinese)

18 李建伟,焦剑,高燕,等. 松花江流域产沙时间变化特征及影响因素分析[J]. 泥沙研究,2014,59(3):12 - 19.
LI Jianwei,JIAO Jian,GAO Yan,et al. Temporal variation of sediment yields in Songhua River basin and its main causes[J]. Journal of Sediment Research,2014,59(3):12 - 19. (in Chinese)

19 水利部松辽水利委员会. 松辽流域河流泥沙公报[R]. 水利部松辽水利委员会,2012:4 - 5.

20 水利部. 中国水土流失防治与生态安全:黑土区卷[G]. 北京:科学出版社,2010:148.

21 ALEXANDER L V,ZHANG X,PETERSON T C,et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2006,111(D5):D05109.

22 GUAN Y,ZHANG X,ZHENG F,et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960—2012 in the Yangtze River Basin,China[J]. Global and Planetary Change,2015,124:79 - 94.

23 WANG Y,XU Y,LEI C,et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation and dryness/wetness in Yangtze River Delta,eastern China,during 1960—2012[J]. Atmospheric Research,2016,172:196 - 205.

24 朱楠,张会兰,马超,等. 北京延庆县雨型和坡面措施对水沙及污染物的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3509 - 3517.
ZHU Nan,ZHANG Huilan,MA Chao,et al. Runoff/sediment yield and pollutant characteristics under varying rainfall types and slope measures in Yanqing County in Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(12):3509 - 3517. (in Chinese)

25 CANNAROZZO M,NOTO L V,VIOLA F. Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921—2000)[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2006,31(18):1201 - 1211.

26 GRINSTED A,MOORE J C,JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5 - 6):561 - 566.

(下转第 321 页)

11 GIANNAKOUROU M C, TAOUKIS P S. Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 201 - 209.
12 陈晓宇, 朱志强, 张小栓, 等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 192 - 199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150826&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.026.
CHEN X Y, ZHU Z Q, ZHANG X S, et al. Research progress and trend of food shelf life prediction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 192 - 199. (in Chinese)
13 ENDOZA T F M, WELT B A, OTWELL S, et al. Kinetic parameter estimation of time - temperature integrators intended for use with packaged fresh seafood[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(3): FMS90 - FMS96.
14 GIANNAKOUROU M C, KOUTSOUMANIS K, NYCHAS G J E, et al. Field evaluation of the application of time temperature integrators for monitoring fish quality in the chill chain[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 102(3): 323 - 336.
15 HINDRA F, BAIK O D. Kinetics of quality changes during food frying[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2006, 46(3): 239 - 258.
16 SHIM S D, JUNG S W, LEE S J. Mathematical evaluation of prediction accuracy for food quality by time temperature integrator of intelligent food packaging through virtual experiments[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013 (2013): Article ID950317.
17 李少远, 王群仙, 李焕芝, 等. Sugeno 模糊模型的辨识与控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(4): 488 - 492.
LI S Y, WANG Q X, LI H Z, et al. Identification and control based on Sugeno's fuzzy model[J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(4): 488 - 492. (in Chinese)
18 SUGENO M, NISHIDA M. Fuzzy control of model car[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1985, 16(2): 103 - 113.
19 傅泽田, 姚萌萌, 马常阳, 等. 基于化学型时间温度指示器的鲜食葡萄品质监测[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 186 - 191.
FU Z T, YAO M M, MA C Y, et al. Applicability of a chemical time temperature indicator as a quality indicator for table grape[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 186 - 191. (in Chinese)
20 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 96 - 100.
21 TAOUKIS P S, KOUTSOUMANIS K, NYCHAS G J E. Use of time - temperature integrators and predictive modelling for shelf life control of chilled fish under dynamic storage conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 53(1): 21 - 31.

(上接第 252 页)

27 王红瑞, 叶乐天, 刘昌明, 等. 水文序列小波周期分析中存在的问题及改进方式[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 1002 - 1008.
WANG Hongrui, YE Letian, LIU Changming, et al. The problems and the improved methods of wavelet analysis in hydrological sequences[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 1002 - 1008. (in Chinese)
28 WANG B, ZHANG M, WEI J, et al. Changes in extreme precipitation over Northeast China, 1960—2011[J]. Quaternary International, 2013, 298: 177 - 186.
29 SONG X, SONG S, SUN W, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960—2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 157: 137 - 152.
30 穆兴民, 宋小燕, 高鹏, 等. 哈尔滨站径流、输沙的多时间尺度特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 135 - 144.
MU Xingmin, SONG Xiaoyan, GAO Peng, et al. The multi-time scale features of runoff and sediment discharge in Harbin[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 135 - 144. (in Chinese)
31 王云璋, 彭梅香, 温丽叶. 80 年代黄河中游降雨特点及其对入黄沙量的影响[J]. 人民黄河, 1992, 44(5): 10 - 14.
WANG Yunzhang, PENG Meixiang, WEN Liye. Analysis on fact of reduced coming sediment form the middle Yellow River in 1980's[J]. Yellow River, 1992, 44(5): 10 - 14. (in Chinese)
32 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
33 GAO P, MU X M, WANG F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 1 - 10.
34 付金霞, 张鹏, 郑粉莉, 等. 河龙区间近 55a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 185 - 192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160224&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.024.
FU Jinxia, ZHANG Peng, ZHENG Fenli, et al. Dynamic change analysis of rainfall erosivity and river sediment discharge of He-Long reach of the Yellow River from 1957 to 2011[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 185 - 192. (in Chinese)
35 高鹏, 穆兴民, 王飞. 近 60 年赣江水沙变化及其驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2012, 56(1): 56 - 59.
GAO Peng, MU Xingmin, WANG Fei. An analysis of streamflow and sediment discharge in Ganjiang River trend and driving force[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, 56(1): 56 - 59. (in Chinese)
36 穆兴民, 高鹏, 王双银, 等. 东北 3 省人类活动与水土流失关系的演进[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 37 - 42.
MU Xingmin, GAO Peng, WANG Shuangyin, et al. Evolution of the relationship between soil and water loss and human activities in modern times in Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 37 - 42. (in Chinese)