

布哈河流域不同时间尺度下土壤侵蚀对气候变化的响应特征

胡雅丹^{1,2}, 张飞², 范宣梅¹, 郁文龙¹

1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

摘要: 全球气候变暖极大地影响了地表侵蚀过程, 但影响机制尚无统一论。河流悬浮物是示踪地表侵蚀的常用手段。本文通过分析青海湖流域最大河流布哈河2008—2015年的日径流量、悬浮物浓度、气温及降雨数据, 讨论了该流域在日、月以及季节尺度下土壤侵蚀对气候变化的响应特征。结果表明: 降雨是半干旱布哈河流域土壤侵蚀的主要控制因素, 气温通过影响冻融作用控制侵蚀行为。此外, 该流域的土壤侵蚀具有明显的季节性差异, 大部分的侵蚀发生在雨季。最重要的是, 冻融作用导致春季解冻期/雨季前期产生额外的沉积物累积, 表现为在相同流量下, 沉积物输出明显高于雨季后期。上述结果对深刻认识全球变暖背景下侵蚀的响应机制具有重要的作用。

关键词: 河流悬浮物; 冻融作用; 侵蚀响应; 气候变化; 布哈河流域

Response of soil erosion to climate change in different time scales in Buha River

HU Yadan^{1,2}, ZHANG Fei², FAN Xuanmei¹, YU Wenlong¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope Global warming greatly affects the process of surface erosion. Some suggest that global warming plays a catalytic role, but there is no consensus on the mechanism. The Buha River, the largest river in Lake Qinghai catchment, is prone to rapid response to climate change. Hydrometeorological data provide an insight to understand the impact of climate on erosion behavior and provide a basis for understanding the mechanism of soil erosion affected by global warming. **Materials and methods** The daily water discharge, suspended sediment concentration (SSC), air temperature, and precipitation were monitored by

收稿日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-10-12; 网络出版: 2020-10-19

Received Date: 2020-06-28; **Accepted Date:** 2020-10-12; **Online first:** 2020-10-19

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(E029070299); 黄土与第四纪地质国家重点实验室重点培育项目(SKLLQG0923); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室重点团队项目(SKLGP2019Z002); 国家自然科学基金项目(41622206)

Foundation Item: Youth Innovation Promotion Association of CAS (E029070299); Cultivating Foundation of the State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG0923); Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (SKLGP2019Z002); National Natural Science Foundation of China (41622206)

通信作者: 张飞, E-mail: zhangfei@ieecas.cn; 范宣梅, E-mail: fxm_cdut@qq.com

Corresponding Author: ZHANG Fei, E-mail: zhangfei@ieecas.cn; FAN Xuanmei, E-mail: fxm_cdut@qq.com

引用格式: 胡雅丹, 张飞, 范宣梅, 等. 2021. 布哈河流域不同时间尺度下土壤侵蚀对气候变化的响应特征 [J]. 地球环境学报, 12(3): 279–287.

Citation: Hu Y D, Zhang F, Fan X M, et al. 2021. Response of soil erosion to climate change in different time scales in Buha River [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(3): 279–287.

the Buha hydrological station during the period of 2008—2015. Suspended sediment flux (SSF) is the product of SSC and water discharge, which can be converted to different time scales. **Results** The water discharge and SSF show remarkable differences between the study period, and the daily/monthly values vary in several orders of magnitude. In addition, the erosion behavior of the basin displays obvious seasonal difference, i.e. most sediments are transported during the monsoon season. Besides, monthly SSC and discharge show clockwise loops from 2008 to 2015. **Discussion** The high erosion flux in the monsoon season is attributed to large runoff and flood events due to concentrated rainfall. Most importantly, freezing-thawing process results in additional sediment accumulation during the spring thawing period/pre-monsoon season, with sediment output significantly higher than post-monsoon season at the same water discharge. **Conclusions** The results demonstrate that rainfall is the main controlling factor of soil erosion in the semi-arid Buha River basin, and temperature controls erosion behavior by influencing freeze-thaw processes during spring thaw/pre-monsoon season. **Recommendations and perspectives** Multi-year daily hydrometeorological data are used for the first time to analyze the erosion behavior of the Buha River basin in different time scales, and the response of the process to climate is further discussed. These results are necessary for understanding the response mechanism of erosion in the context of global warming.

Key words: suspended sediment; freeze-thaw process; erosion behavior; climate change; Buha River

土壤侵蚀是现今全球主要的环境问题之一，对农业生产力降低、河流径流输沙甚至全球气候变化都有着重要的影响（李占斌等，2008）。我国土壤侵蚀形势严峻，轻度以上土壤侵蚀面积约为 482.53 万 km²（赵晓丽等，2002）。土壤侵蚀受气候条件、地表环境以及土壤自身性质的综合影响（魏宁和魏霞，2016）。其中，土壤侵蚀与气候变化的响应关系颇有争议。在地质时期尺度的研究中，前人重点讨论了强土壤侵蚀期与气候期的对应关系，研究结果基本分为三种截然不同的观点：（1）强土壤侵蚀期与湿润气候期相对应；（2）强土壤侵蚀发生在干旱气候与湿润气候的过渡时期；（3）强土壤侵蚀期与干旱气候期对应（景可和李凤新，1993；景可和焦菊英，2011）。在现代气候研究中，学者们普遍认为全球气候趋向温暖化发展，近年来论证气候变化对土壤侵蚀的影响引起了广泛关注。其中，通过研究气候变化对侵蚀环境的改变进而讨论气候对土壤侵蚀的重要作用是较为普遍的研究方法之一。例如：气候变暖导致冰川退缩、冻土退化等融化过程使得地表径流增加；温度升高导致冻土强度降低进而加大灾害发生风险等（陈同德等，2020）。虽已有一些研究认为全球气候暖化会促进土壤侵蚀的加剧（孙本国等，2008；Lu et al, 2010；Zhang et al, 2020），但未来气候进一步暖化是否会加剧土壤侵蚀仍存在着不确定性。因此，对相关研究展开进一步的探讨不仅有助于深入理解气候变

化与土壤侵蚀的相互作用机制，更对未来气候持续变暖背景下应对侵蚀变化具有重要的现实意义。

河流悬浮物是研究土壤侵蚀的常用工具。气候变化通过调节地表水循环影响河流系统，进而管理沉积物的输送效率（Zhao et al, 2017；Yang et al, 2018）。河流泥沙研究对于有效应对水土流失及防护，促进生态环境的可持续发展具有重要作用。据野外考察发现，在雅鲁藏布江流域及黄土高原关键带存在河水在雨季前期变浑浊的异常现象，其产生原因及控制机理尚无定论。本文以该异常现象为出发点，基于水文气象数据探讨高原地区地表侵蚀的响应机制。

地处季风交汇地带的青海湖流域是维系青藏高原东北部生态安全的重要区域，因其特殊的地理位置及气候特征更是被视为气候变化的“指示器”。学者们在各领域开展了青海湖流域土壤侵蚀的相关研究，如沙占江等（2012）和张娟（2012）基于遥感和 GIS 对布哈河流域的土壤侵蚀进行了定性半定量评价研究，认为该流域以轻度及中度侵蚀为主；Jin et al (2011) 和 Zhang et al (2013) 利用水化学数据讨论了青海湖流域的地表风化与侵蚀过程。然而，现有研究大多集中于流域的侵蚀强度评价或气候对季节性风化、侵蚀的整体性影响，鲜少讨论该区特有的强烈的季节性冻融作用在地表侵蚀中的贡献。本文选取青海湖流域最大河流布哈河为研究对象，以径流量、

悬浮物浓度、气温及降雨的逐日监测数据为基础, 分析该流域在不同时间尺度下受气候影响的侵蚀行为的变化特征, 以期补充现有关于土壤侵蚀对气候变化响应机制研究的不足。

1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部 ($97^{\circ}50' - 101^{\circ}20'E$, $36^{\circ}15' - 38^{\circ}20'N$), 地处我国西北干旱区、西南高寒区和东部季风区的交汇区域 (方健梅等, 2020), 对全球气候和环境变化尤为

敏感。流域分别被日月山、青海南山、天峻山、大通山脉所环绕, 形成一地势以西北高、东南低为特征的内陆湖盆地, 平均海拔约为 4000 m, 流域面积约 29661 km^2 (杨雄丹等, 2020)。区内青海湖是我国最大的内陆咸水湖, 其形成受晚新生代新构造活动的影响。湖区北部大通山为西北西 (NNW) 走向, 基岩裸露 (Zhang et al, 2013)。据统计, 入湖河流约数十条, 其中布哈河是青海湖流域内长度及流域面积均最大的河流 (图 1) (周一飞等, 2017)。

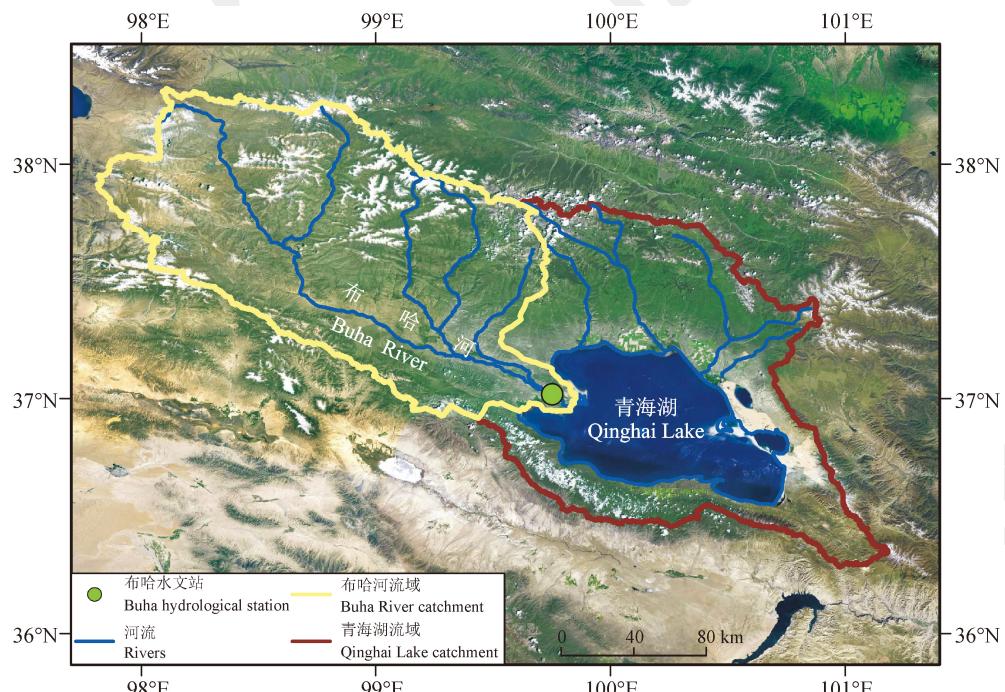


图 1 布哈河流域区域概况图

Fig. 1 The map of study area

布哈河起源于疏勒南山, 自西北向东南流入青海湖。河流全长约 286 km, 源头海拔、河口海拔分别为 4513 m、3195 m, 流域面积为 14337 km^2 , 约占青海湖流域总面积的 1/2。区内出露二叠纪海相灰岩和砂岩、志留纪砂岩和片岩, 以丘陵地形为主 (Zhang et al, 2013)。流域内主要发育的土壤类型包括草毡土、栗钙土、泥炭沼泽土、钙质石质土等, 植被类型多为高寒草原、高寒草甸 (张超等, 2017)。布哈河流域属于高原半干旱气候, 夏季短暂, 冬季漫长, 春季多风沙。流域内年平均气温为 -2.25°C , 日平均温度在 $-27.5 - 16.5^{\circ}\text{C}$ 波动, 多年平均降水量 (1957—

2015 年) 为 386 mm, 平均蒸发量 (1991—2015 年) 为 977 mm。降水主要集中在 5—9 月, 约占全年 90% 以上 (彭红明等, 2015), 使得地表径流大多集中在该时期。该区域气候变化表现为雨热同季, 月降雨量峰值及最高月平均气温多出现在 7—8 月 (图 2)。然而, 在冷季 (11 月一次年 3 月), 低温导致地表冻结, 此时降雨主要以降雪形式发生。

2 数据与方法

本文选用布哈河水文站在 2008—2015 年逐日监测的水文气象数据, 包括河流悬浮物浓度

(SSC)、河水流量 (discharge)、降雨量及气温。其中, 11月至次年3月的河流悬浮物浓度 (SSC) 均缺失, 是由于在该季节内, 极低的气温导致地面处于冻结状态, 河流悬浮物浓度极低, 故而未监测。

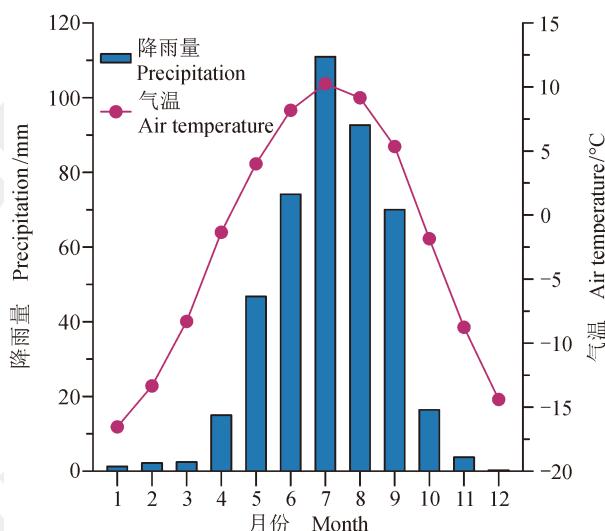


图2 布哈河2008—2015年月平均降雨量及月平均气温变化

Fig. 2 Monthly average variations in precipitation and temperature in Buha River from 2008 to 2015

本文以2008—2015年的逐日数据为基础数据, 利用逐日悬浮物浓度与河水流量的乘积得到悬浮物通量 ($SSF=SSC \times \text{discharge}$), 进而通过单位换算后得到在日、月、年时间尺度下该流域的侵蚀通量。

3 结果与分析

3.1 月、日尺度下土壤侵蚀对气候的响应

基于布哈水文站逐日监测的水文数据, 统计了布哈河2008—2015年月、日侵蚀通量以及径流量 (图3、4)。结果表明: 布哈河径流量年内分配不均, 日均流量从最小值 $1.14 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2012年2月20日) 增加至 $4.76 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (2012年8月14日); 月径流总量从2月的 $3.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ (2012年) 增加至8月的最高值 $6.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2012年)。与流量变化趋势相似, 布哈河流域侵蚀通量年内差异明显。日均侵蚀通量的最大值与最小值相差6个数量级, 从 $0.23 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (2011年4月9日) 增加至 $63638.78 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ (2014年8月4日)。同样, 月侵蚀通量从4月的 $0.10 \times 10^5 \text{ t}$ (2012年) 增加至8月的 $3.79 \times 10^5 \text{ t}$ (2012年), 二者相差4个数量级。

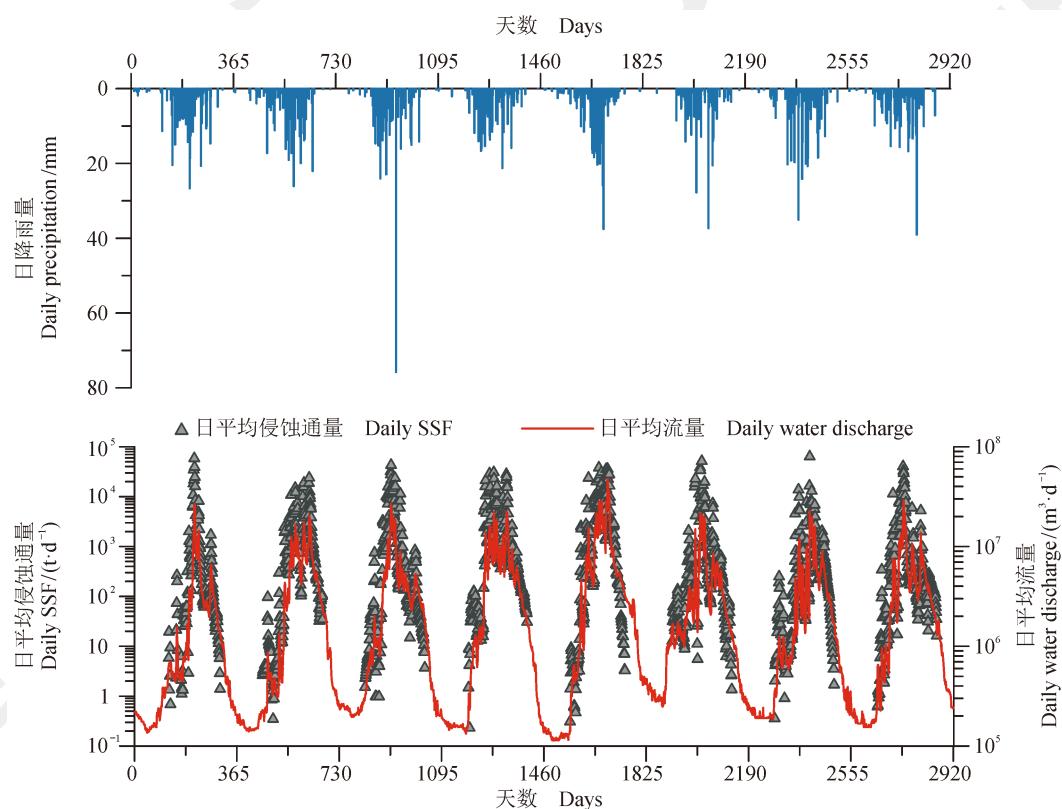


图3 布哈河2008—2015年侵蚀通量、径流量及降雨量的日变化

Fig. 3 Daily variations of SSF, water discharge, and precipitation in Buha River from 2008 to 2015

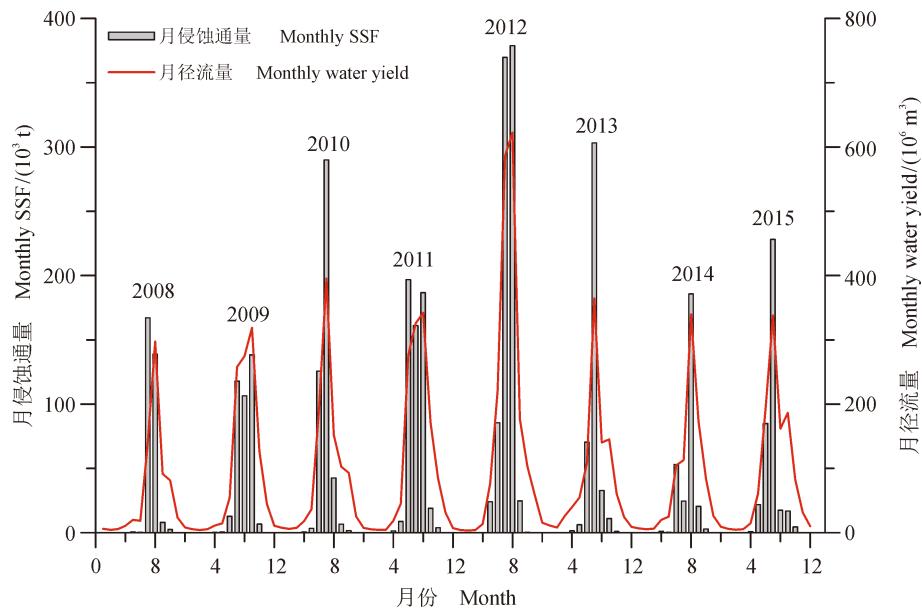


图4 布哈河2008—2015年月侵蚀通量与月径流量变化

Fig. 4 Monthly variations of SSF and water yield in Buha River from 2008 to 2015

在2008—2015年, 布哈河流域日均径流量、侵蚀通量与日降雨量均保持良好的对应关系。该流域约90%的降雨集中出现在5—9月, 其中7—8月占比达49.2%。同样地, 径流量与侵蚀通量在5月开始增加, 在7—8月达到峰值, 继而下降。降雨的集中分配导致地表径流明显的年内差异。在雨季, 强烈的暴雨更会导致径流量的激增,

出现洪水事件, 瞬时强降雨及连续的地表径流均会造成不同程度的土壤侵蚀, 因此可将地表径流视为大气降雨的良好体现(张飞等, 2016)。日均径流量及侵蚀通量的拟合结果显示二者呈现良好的指数关系, 相关系数 R^2 处于0.63—0.81(表1), 可见降雨是半干旱布哈河流域土壤侵蚀的主要控制因素。

表1 布哈河日侵蚀通量与气温、日均径流量的拟合关系
 Tab. 1 The relationship of daily SSF vs. air temperature and water discharge in Buha River from 2008 to 2015

年份 Year	日悬浮沉积物通量—日气温 SSF/(t·d ⁻¹)—temperature / °C		日悬浮沉积物通量—日流量 SSF/(t·d ⁻¹)—discharge /(m ³ ·s ⁻¹)	
	拟合公式 Fitting equation	R^2	拟合公式 Fitting equation	R^2
2008	$y=32.94e^{0.26x}$	0.25	$y=24.56e^{0.04x}$	0.65
2009	$y=41.80e^{0.29x}$	0.30	$y=13.49e^{0.04x}$	0.78
2010	$y=40.88e^{0.28x}$	0.48	$y=24.19e^{0.04x}$	0.65
2011	$y=106.26e^{0.29x}$	0.42	$y=41.04e^{0.03x}$	0.81
2012	$y=31.16e^{0.46x}$	0.63	$y=37.05e^{0.02x}$	0.63
2013	$y=64.52e^{0.21x}$	0.35	$y=30.37e^{0.04x}$	0.72
2014	$y=36.83e^{0.25x}$	0.26	$y=18.65e^{0.04x}$	0.70
2015	$y=48.43e^{0.28x}$	0.34	$y=28.50e^{0.03x}$	0.67

然而, 与降雨作为流域侵蚀主要控制因素不同的是, 虽然气温变化趋势与侵蚀通量、径流量相似, 在7、8月份达到峰值(图2), 但据气温与侵蚀通量拟合结果, 二者并未形成良好的相关

关系, R^2 除2012年稍高($R^2_{2012}=0.63$)外, 其他年份均指示其为土壤侵蚀的弱相关因素(表1)。但是, 土壤侵蚀对气候变化的季节性响应使气温具有不可忽视的地位, 尤其是在春季解冻期。

3.2 土壤侵蚀对气候变化的季节响应

3.2.1 径流量、悬浮物通量、气温及降雨的季节性变化特征

图 2 统计了布哈河流域 2008—2015 年月平均气温及降雨量。结果表明：在研究期间，月平均气温在 $-16.5\text{--}10.3^{\circ}\text{C}$ 波动变化；年平均降雨量为 436 mm，月平均降雨量从 12 月的 0.3 mm 增加至 7 月的 111.0 mm。布哈河流域降雨具有年内集中分配的特点，季节间差异明显，降雨大多集中在雨季（6 月中旬至 9 月），降雨量为 309 mm，占全年的 71%；其次为雨季前期（4 月至 6 月中旬）和雨季后期（10 月），雨量分别为 101 mm 和 16 mm，占比分别为 23% 和 4%；冬季降雨量为全年最低（10 mm），仅占比 2%，且该时期降雨主要以降雪形式发生。

在 2008—2015 年，布哈河流域年内径流量与侵蚀通量均存在明显的季节性差异，表现为：雨季（6 月中旬至 9 月）> 雨季前期（4 月至 6 月中旬）> 雨季后期（10 月）> 冬季（11 月至次年 3 月）（图 5）。雨季径流量占全年径流量的 77%，大径流量及集中降雨（包括瞬时强降雨）导致约 93% 的悬浮物被输送。在其他季节，径流量较低，输送沉积物能力相对较弱，雨季后期表现最为明显。在雨季后期，径流量占全年径流量的 7.9%，仅有 0.6% 的悬浮物被输送。

布哈河流域的气候变化具有明显季节性差异特征，即降雨峰值及高温集中出现在雨季，径流以及悬浮沉积物通量亦是如此，高侵蚀量与高径流量相对应，在雨季达到峰值，而在冬季降到最低值。

3.2.2 春季解冻期土壤侵蚀变化特征

悬浮物浓度与径流量 (SSC-Q) 的关系曲线包含悬浮物浓度与径流量随时间变化曲线、悬浮物浓度随径流量变化曲线两种形式，用于指示悬浮物输送过程以及悬浮物迁移机制，是研究河流悬浮物输移的常用手段 (Gao and Pasternack, 2007)。Williams (1989) 将悬浮物浓度与径流量的比值 (SSC/Q) 作为判别曲线类别的指标。据此，图 6 总结了月平均悬浮物浓度与径流 (SSC-Q) 的关系（因冬季 SSC 数据未监测，故图 6 未标注该季节月平均数据），结果表明：布哈河流域在 2008—2015 年，月平均悬浮物浓度与月平均流量整体表现为顺时针滞后关系 (*clockwise loop*)。

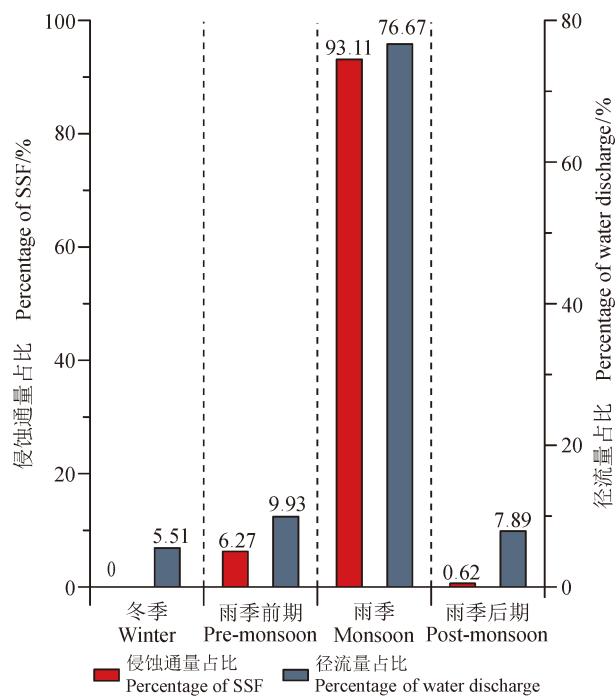


图 5 布哈河 2008—2015 年侵蚀通量与径流量各季节所占比重

Fig. 5 Contribution of SSF and water discharge in each season to annual SSF and water yield in Buha River from 2008 to 2015

在研究期间，日平均悬浮物浓度在最小值 $0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 与最大值 $2.810 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间波动。从季节上来讲， SSC 在雨季前期开始增加，由于降雨的集中分配使得 SSC 在雨季达到峰值，在雨季过后 SSC 呈下降趋势，直至最低值。上述 SSC 随季节变化的结果在 SSC-Q 的滞后曲线中整体表现为顺时针滞后关系，在该关系曲线中， $\text{SSC}_{\text{雨季前期}}$ 处于上升段 (*rising limb*)， $\text{SSC}_{\text{雨季后期}}$ 则处在峰值过后的下降段 (*falling limb*)，即在相同径流量下，雨季前期河流中悬浮物浓度高于雨季后期。

这样的 SSC-Q 顺时针滞后关系可归因于可用沉积物的耗竭及径流变化两个方面 (Gao and Pasternack, 2007)。本文借鉴季节性的“储存—释放”过程 (Fang et al, 2008; Sun et al, 2016) 解释这一现象。布哈河流域属高原半干旱气候，存在季节性冻土及强烈的冻融循环。在寒冷季节（11 月至次年 3 月），气温低于 0°C ，此时土层冻结，土颗粒间水分由液相变为固相 (Zhang et al, 2016)，孔隙间充满冰晶体，导致土壤发生膨胀作用致使土壤结构变得松散 (景国臣等, 2008)，沉积物均处于“储存”阶段。在春末夏初，气温升高，冰晶融化，土壤颗粒重新活动，从而释放出之前储存的沉积物，形成“释放”阶段。

初季节, 即雨季前期, 气温逐渐升高且昼夜在0℃上下波动变化, 土层经历频繁的“昼融夜冻”过程, 反复的冻融循环破坏了土壤结构, 增加了土壤的可蚀性(Bryan, 2000; 陈超, 2019), 进而在融水、重力等外营力作用下被搬运至河道中, 使得河流中SSC升高。随后, 雨季来临, 强降雨及大径流事件导致大量沉积物在雨季被输送。雨

季过后, 可用沉积物被耗尽, 导致雨季后期可用沉积物减少。因此, 相同径流下, 雨季前期相较雨季后期存在额外的沉积物累积。青藏高原河流在4—6月解冻期间变得浑浊正是这一现象的外部体现(孙辉等, 2008)。此外, 布哈河流域春季相对较高的悬浮物通量亦受春季降尘及植被季节性变化的影响(Jin et al., 2011)。

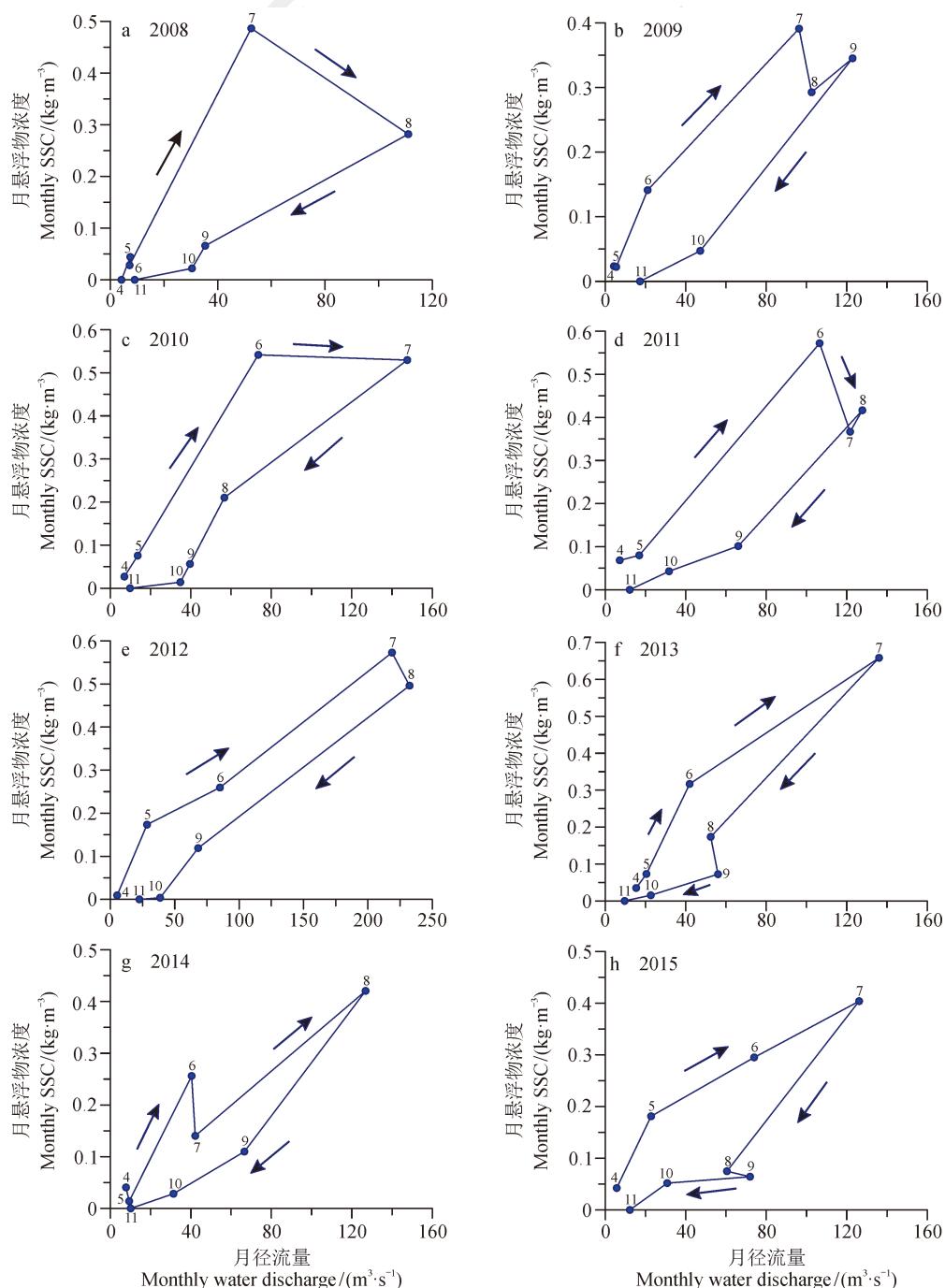


图6 布哈河2008—2015年月平均SSC与月平均流量的关系
Fig. 6 Monthly SSC—Q hysteresis loops during the study period

布哈河流域在春季解冻期河流悬浮物浓度的变化反映了在季节尺度下，土壤侵蚀对气候的响应特征。同样地，在高纬度、高海拔地区，季节性冻土在春季解冻期因经历反复的冻融循环将会产生额外的沉积物累积并得到释放，进而加剧该时期的地表侵蚀。

4 结论

通过分析布哈河流域的悬浮物浓度、径流量、气温及降雨量的逐日监测数据，进而探讨在不同时间尺度（日、月、季节尺度）下土壤侵蚀对气候变化的响应特征。结果表明：降雨是该流域土壤侵蚀的主要控制因素，冻融作用在春季解冻期的土壤侵蚀过程中发挥重要作用。此外，以布哈河为例，通过分析该流域土壤侵蚀的季节性变化认为：在高纬度、高海拔的季节性冻融区，在春季解冻期因土层经历反复的冻融循环产生额外的沉积物累积导致该时期的地表侵蚀加剧。该过程对深刻认识在未来全球气候持续变暖的情况下，作为全球第三极的青藏高原的侵蚀变化响应机制提供了重要的数据支撑。

参考文献

- 陈同德, 焦菊英, 王颤霖, 等. 2020. 青藏高原土壤侵蚀研究进展 [J]. 土壤学报, 57(3): 547–564. [Chen T D, Jiao J Y, Wang H L, et al. 2020. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(3): 547–564.]
- 陈超. 2019. 融冻深度影响下黑土坡耕地土壤侵蚀机理与模型研究 [D]. 北京: 中国农业大学. [Chen C. 2019. Erosion mechanism and its modeling of cultivated black soil slopes affected by thawed depth [D]. Beijing: China Agricultural University.]
- 方健梅, 马国青, 余新晓, 等. 2020. 青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系 [J]. 水土保持学报, 34(3): 105–112. [Fang J M, Ma G Q, Yu X X, et al. 2020. Spatiotemporal variation of NDVI in Qinghai Lake basin and its relationship with climatic factors [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(3): 105–112.]
- 景可, 焦菊英. 2011. 基于全球气候变暖的土壤侵蚀态势初见 [J]. 中国水土保持, (6): 7–9. [Jing K, Jiao J Y. 2011. Soil erosion situation based on global warming [J]. *Soil and Water Conservation in China*, (6): 7–9.]
- 景国臣, 任宪平, 刘绪军, 等. 2008. 东北黑土区冻融作用与土壤水分的关系 [J]. 中国水土保持科学, 6(5): 32–36. [Jing G C, Ren X P, Liu X J, et al. 2008. Relationship between freeze-thaw action and soil moisture for Northeast black soil region of China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(5): 32–36.]
- 景可, 李凤新. 1993. 全球气候变暖对黄土高原侵蚀产沙的影响 [J]. 地理研究, 12(2): 1–8. [Jing K, Li F X. 1993. Effect of global climatic warming on the erosion and sediment yield on the Loess Plateau [J]. *Geographical Research*, 12(2): 1–8.]
- 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 2008. 土壤侵蚀与水土保持研究进展 [J]. 土壤学报, 45(5): 802–809. [Li Z B, Zhu B B, Li P. 2008. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(5): 802–809.]
- 彭红明, 许伟林, 何青, 等. 2015. 布哈河流域中上游地区水文地球化学与同位素特征 [J]. 干旱区研究, 32(5): 1032–1038. [Peng H M, Xu W L, He Q, et al. 2015. Hydrogeochemistry and isotope features in the middle and upper reaches of Buha River basin [J]. *Arid Zone Research*, 32(5): 1032–1038.]
- 沙占江, 张娟, 宋昌斌, 等. 2012. 基于 RS/GIS 的布哈河流域土壤侵蚀现状研究 [J]. 水土保持通报, 32(6): 253–255. [Sha Z J, Zhang J, Song C B, et al. 2012. Spatial analysis of soil erosion in Buhai watershed based on RS and GIS [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32(6): 253–255.]
- 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 2008. 土壤冻融交替生态效应研究进展 [J]. 土壤, 40(4): 505–509. [Sun H, Qin J H, Wu Y. 2008. Freeze-thaw cycles and their impacts on ecological process: a review [J]. *Soils*, 40(4): 505–509.]
- 孙本国, 沈永平, 王国亚. 2008. 1954—2007 年叶尔羌河上游山区径流和泥沙变化特征分析 [J]. 冰川冻土, 30(6): 1068–1072. [Sun B G, Shen Y P, Wang G Y. 2008. Changes in runoff and river sediments in the upper reaches of Yarkent River, Karakorum during 1954—2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(6): 1068–1072.]
- 魏宁, 魏霞. 2016. 气候变化对黄土高原土壤侵蚀影响的回顾与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 26(S2): 23–26. [Wei N, Wei X. 2016. Review and prospect of climate change on soil erosion in the Loess Plateau [J]. *China Population, Resources and Environment*, 26(S2): 23–26.]
- 杨雄丹, 李国元, 王佩贤, 等. 2020. 星载激光测高结合遥

- 感影像的青海湖变化监测 [J]. *测绘科学*, 45(5): 79–87.
- [Yang X D, Li G Y, Wang P X, et al. 2020. Monitoring of Qinghai Lake changes with spaceborne laser altimetry and remote sensing images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 45(5): 79–87.]
- 张超, 何立新, 王琳. 2017. 布哈河流域水资源的气候演变特征 [J]. *南水北调与水利科技*, 15(2): 45–49, 57.
- [Zhang C, He L X, Wang L. 2017. Evolution of climate characteristics of water resources in Buha River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 15(2): 45–49, 57.]
- 张飞, 金章东, 肖军, 等. 2016. 青海湖流域物理侵蚀速率对气候变化的响应 [J]. *地球环境学报*, 7(6): 590–597. [Zhang F, Jin Z D, Xiao J, et al. 2016. Response of physical erosion rates to climate changes within the Lake Qinghai catchment [J]. *Journal of Earth Environment*, 7(6): 590–597.]
- 张娟. 2012. 基于遥感和 GIS 的布哈河流域土壤侵蚀研究 [D]. 西宁: 青海师范大学. [Zhang J. 2012. Soil erosion of the Buha River basin based on remote sensing and GIS [D]. Xining: Qinghai Normal University.]
- 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 2002. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究 [J]. *水土保持学报*, 16(1): 40–43, 46.
- [Zhao X L, Zhang Z X, Zhou Q B, et al. 2002. Soil erosion actuality and its synthesis prevention countermeasures in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(1): 40–43, 46.]
- 周一飞, 陈慧颖, 张淑兰, 等. 2017. 基于 SWIM 模型模拟气候变化对青海湖布哈河流域水文过程的影响 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 53(2): 208–214. [Zhou Y F, Chen H Y, Zhang S L, et al. 2017. Simulating the influence of climate change on hydrological processes at Buha River basin of Qinghai Lake by SWIM [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(2): 208–214.]
- Bryan R B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope [J]. *Geomorphology*, 32(3 / 4): 385–415.
- Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. 2008. Temporal changes in suspended sediment transport in a gullied loess basin: the lower Chabagou Creek on the Loess Plateau in China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(13): 1977–1992.
- Gao P, Pasternack G. 2007. Dynamics of suspended sediment transport at field-scale drain channels of irrigation-dominated watersheds in the Sonoran Desert, southeastern California [J]. *Hydrological Processes*, 21(16): 2081–2092.
- Jin Z D, You C F, Yu J M, et al. 2011. Seasonal contributions of catchment weathering and eolian dust to river water chemistry, northeastern Tibetan Plateau: Chemical and Sr isotopic constraints [J]. *Journal of Geophysical Research*, 116(F4): F04006. DOI: 10.1029/2011JF002002.
- Lu X X, Zhang S R, Xu J C. 2010. Climate change and sediment flux from the roof of the world [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(6): 732–735.
- Sun L Y, Yan M, Cai Q G, et al. 2016. Suspended sediment dynamics at different time scales in the Louhui River, south-central China [J]. *Catena*, 136: 152–161.
- Williams G P. 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 111(1 / 2 / 3 / 4): 89–106.
- Yang X N, Sun W Y, Li P F, et al. 2018. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 642: 591–600.
- Zhang F, Shi X N, Zeng C, et al. 2020. Recent stepwise sediment flux increase with climate change in the Tuotuo River in the central Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 65(5): 410–418.
- Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. 2016. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: a review [J]. *Pedosphere*, 26(2): 167–179.
- Zhao Y F, Zou X Q, Liu Q, et al. 2017. Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 607/608: 920–932.
- Zhang F, Jin Z D, Li F C, et al. 2013. Controls on seasonal variations of silicate weathering and CO₂ consumption in two river catchments on the NE Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 547–560.