

天山北坡中小流域输沙量变化及其影响因素

——以呼图壁河流域为例

郭小云^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3,4}, 姚俊强^{1,2,3}, 魏天峰^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部 绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046)

摘要:利用呼图壁河流域石门水文站 1980—2011 年实测日径流量、输沙量及降水量资料,采用 Mann-Kendall 非参数趋势和突变检验法、双累积曲线法等,研究了呼图壁河输沙量年内和年际变化趋势及可能的突变时间,并探讨了可能引起呼图壁河输沙量变化的影响因素。研究结果表明:呼图壁河流域输沙量年内分配极不均匀,连续最大 4 个月(6—9 月)输沙量占全年输沙量的 94.61%,7 月输沙量最大,占全年输沙量的 60.83%;1980—2011 年输沙量总体呈增加趋势,年际尺度上呈丰枯相间的周期性变化,并在 1989 年发生了突变。输沙量受径流量、降雨量、大型水库和水土流失等综合影响,而径流量是影响输沙量的主要因素。流域干燥的气候和较低的植被覆盖率,加上人类对上游山区煤炭资源的过度开采,使得该区域山区突发暴雨洪水时,造成输沙量的剧增。

关键词:输沙量;径流量;呼图壁河流域

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0145-05

Sediment Discharge Change and Its Affecting Factors of Small Watershed on the Northern Slope of Tianshan Mountains

—Taking Hutubi River Basin as an Example

GUO Xiaoyun^{1,2}, LIU Zhihui^{1,2,3,4}, YAO Junqiang^{1,2,3}, WEI Tianfeng^{1,2}

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. International

Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China)

Abstract: According to the measured daily runoff, sediment load and precipitation data of the Shimen hydrological station of Hutubi River Basin during the period from 1980 to 2011, we used the non-parametric Mann-Kendall trends and mutation test, and the double cumulative curve method to investigate Hutubi River monthly and annual sediment load trends and possible mutation time, and explore the factors that may affect Hutubi River sediment load change. The results show that Hutubi River Basin sediment distribution in a year is very uneven, continuous maximum four-month (June to September) sediment load accounted for 94.61% of annual sediment load; sediment load in July is the largest, accounting 60.83% of the annual sediment load; annual sediment load were increased during the period from 1980 to 2011, on the interannual scales it shows periodically changes of alternating wet and dry; and the mutation happened in 1989. Sediment load is influenced by the combined effects of runoff, rainfall, large reservoirs and soil erosion; runoff is the major factor affecting the amount of sediment. The watershed dry climate, low vegetation coverage and the human over exploitation of coal resources in the upper reaches of the mountain area make sediment load increase quickly in the mountainous region when the rainstorm floods occur suddenly.

Keywords: sediment; runoff; Hutubi River Basin

河流系统是气候变化和人类活动等因素共同作用的动态系统,水沙变化是该系统最为活跃的部分^[1]。河流输沙量是大陆剥蚀速率及陆地表面降低侵蚀过程的一个总体度量。世界上河流输送泥沙的很大部分来源于农业用地侵蚀的土壤,因此,研究土壤侵蚀通量可以为土地恶化和土壤资源的减少提供一个度量^[2]。河流输沙量变化研究为土壤侵蚀和河道泥沙沉积提供了重要信息,是河流系统重要的研究内容^[1]。呼图壁河是位于天山北麓中段的第二大河流,其多年平均年径流量为 $3.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,它不仅是呼图壁县、农六师芳草湖总场、自治区种牛场以及兵团 3 个团场农业灌溉和人民群众生活用水的重要保证,同时还是维系该区生态环境稳定和促进当地社会经济可持续发展的根本性水资源基础。近几十年来,由于对呼图壁河水资源不合理的开发利用,以及气候变化程度的加深,引起了一系列的生态环境问题,有关学者对呼图壁河做了大量的研究工作。如:白东明等^[3]分析了呼图壁河流域范围内不同径流补给来源的径流年内分配规律和多年变化特征。普宗朝等^[4]分析了 27 年来呼图壁河径流的年内分布特征、多年变化规律以及呼图壁河流域气候变化对河流径流的影响。耿峻岭等^[5]从流域气候、径流、泥沙、水质等方面对其水文特性进行分析。但是对呼图壁河输沙量方面的研究较少。因此,研究呼图壁河输沙量变化及其影响因素,对于了解该区域社会经济发展对呼图壁河生态环境和生态系统的影响,改善呼图壁河的水质状况,以及对进行该地区社会经济的科学规划都具有重要的意义。

1 研究区概况

呼图壁河流域位于新疆天山北坡中段、准噶尔盆地的南缘,该河发源于喀拉乌成山分水岭,属天山北坡东段水系。地理位置为 $86^{\circ}05' - 87^{\circ}08' \text{ E}$, $43^{\circ}07' - 45^{\circ}20' \text{ N}$,流域总体呈南北走向,地势南高北低,总长 258 km,平均宽 40 km,总面积 $10\,255 \text{ km}^2$ 。从河源至下游,大致可以分为山地—丘陵—冲积扇—冲洪积平原 4 个地貌单元。上游山区支流呈树枝状分布,两岸有一级支流 20 多条,其中 10 支支流源头在冰川和永久积雪区,其余支流皆源于中山低山区,靠季节性积雪消融和夏季降水补给^[3-5]。据中国冰川目录统计,全流域有大小冰川 239 条,冰川面积 72.07 km^2 ,年消融雪达 0.524 亿 m^3 ,冰川补给占全年径流量的 11.0%^[5-6]。呼图壁河石门水文站以上河道长 88 km,集水面积 $1\,840 \text{ km}^2$,平均高程 2 984 m,河道纵降比 23.13%,以石门水文站控制断面为界,断面以上为主要径流形成区,断面以下为径流散失区^[5]。因

此,本文选择石门水文站为研究断面,采用其多年输沙量数据进行分析具有合理性。

2 资料与方法

2.1 基础数据

本文采用的水文数据为呼图壁河出山口石门水文站 1980—2011 年日径流数据和输沙量数据。石门水文站测站高程为 1 480 m,集水面积 $1\,840 \text{ km}^2$,其控制年径流量占该河全流域年径流量的 93.3%,石门站以下主要为径流散失区^[5]。气象数据为石门站 1980—2011 年日降水数据。数据经过严格的质量控制,时间序列完整,无资料缺失。

2.2 研究方法

(1) 采用 Mann-Kendall 秩检验法进行数据系列的变化趋势和突变特征的分析。该检验法是由世界气象组织推荐的非参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出^[7]。该统计检验方法的优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰^[6],适用于水文、气象要素等非正态分布数据趋势及突变的检验,因此在降水、径流和水质等要素时间序列的趋势变化分析中得到广泛的应用^[7]。

假定 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为时间序列变量, n 为时间序列的长度, Mann-Kendall 秩检验法是在序列平稳且序列是随机独立的前提下,构造了秩统计量 S_k ,对于所有的 $i \leq n, j \leq n$, 且 $i \neq j, x_i$ 和 x_j 的分布是不同的,检验的统计变量 S_k 计算式为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^{n-1} \alpha_{ij} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (1 \leq j \leq i) \quad (2)$$

式中: x_i, x_j —— i 年, j 年的被检验值。

S_k 的均值和方差分别为:

$$E(S_k) = k(k+1)/4 \quad (3)$$

$$\text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (4)$$

$$\text{UF}_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

UF_k 为标准正态分布,在该序列随机独立的前提下,给定一显著水平,显著水平组成一个信度区间,将 UF_k 汇成一条曲线 UF 。将时间序列再按逆序 $\{x_n, x_{n-1}, \dots, x_1\}$ 排列,按照上述过程重复计算,得到另一条曲线 UB , $\text{UB} = -\text{UF}_k (k=n, n-1, n-2, \dots, 1)$ 。如果 UF 和 UB 的交点在信度线之间,则该点所对应的时刻便是突变点开始的时间^[6-9]。

(2) 采用双累积曲线法检验径流量和输沙量变化的趋势转折点。双累积曲线是检验两个参数间关

系一致性及其变化常用的方法。他可用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料校正以及水文气象要素的趋势性变化及其强度的分析。同时,通过转折点的获取可以估计不同时段의减沙量^[10]。

3 结果与分析

3.1 输沙量变化趋势分析

3.1.1 输沙量的变化特征 呼图壁河河流输沙量年内变化很大,时空分布极不均匀(表 1),夏季气候干燥,加上地表岩石机械风化强烈,大量冰雪融水和局部暴雨洪水携带大量泥沙汇入河道,使得夏季输沙量高度集中,呼图壁河连续最大 4 个月输沙量出现在 6—9 月,占全年输沙量的 94.61%,平均输沙量最大月出现在 7 月,占全年输沙量的 60.83%。

表 1 呼图壁河多年平均输沙量年内分配情况

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
输沙量/万 t	0.0149	0.0161	0.0244	0.6788	1.1556	5.1856	25.7236	7.6915	1.4076	0.2611	0.1111	0.0156	42.2859
百分比/%	0.04	0.04	0.06	1.61	2.73	12.26	60.83	18.19	3.33	0.62	0.26	0.04	100

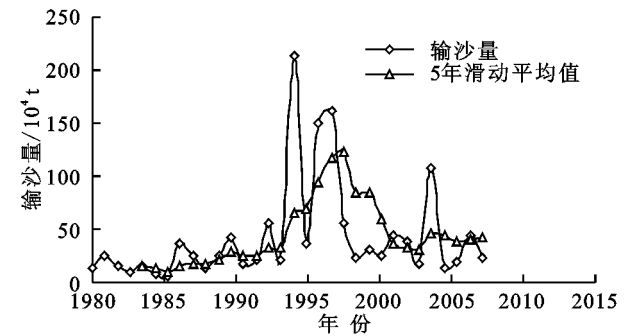


图 1 呼图壁河多年输沙量年际变化

3.1.2 输沙量趋势性检验 1980—2011 年,受气候变化及强烈人类活动的影响,呼图壁河年输沙量发生了明显的趋势变化,为了定量地分析年输沙序列的变化趋势,深入揭示输沙量的变化规律,用 Mann-Kendall 秩检验法对呼图壁河输沙量趋势进行检验,设检验水平 α 为 0.05,由正态分布表得出相应的检验临界值为 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。根据 Mann-Kendall 统计量曲线中 $|UF|$ 的大小对变量的趋势性进行判断。 $|UF|$ 的值越大,表明其变化趋势越明显,即当 $UF > 0$ 时, $|UF|$ 的值越大,序列的上升趋势越明显,当 $UF < 0$ 时, $|UF|$ 的值越大,序列的下降趋势越明显(图 2)。分析石门水文站 32 a 的输沙量变化趋势,得出:呼图壁河年输沙量整体呈增加的趋势,且增加显著,并且在 1989 年发生突变,1980—1988 年均输沙量 16.89 万 t,1989—2011 年年均输沙量 52.22 万 t,1989—2011 年的年均输沙量比 1980—1988 年的年均输沙量增加了 209.2%。在 1996 年以后 UF 值均通过了 α 为 0.05 的置信水平。并且在 1997—2008 年通过了 α 为

呼图壁河多年平均输沙量为 42.286 万 t,由图 1 可知,呼图壁河输沙量年际变化呈丰枯相间的周期性变化,总体呈增加趋势。呼图壁河输沙量最大值出现在 1996 年,为 212.586 万 t。其次为 1999 年,为 161.846 万 t,1986 年的输沙量为 32 a 最低,为 4.964 万 t。最大年输沙量与最小年输沙量之比为 42.83,输沙量年际变化较大。呼图壁河输沙量 1996 年以前整体波动不大,而 1996 年以后,呼图壁河输沙量的上升或下降趋势明显,资料显示,1996 年 7 月和 1999 年 7 月呼图壁河突发暴雨洪水,其中,1996 年为呼图壁河有史以来最大的一次暴雨洪水,当时石门站最大洪峰流量达到 $371 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[3],故该时期输沙量的变化可能是因为暴雨洪水在增加径流量的同时也携带了大量泥沙,从而导致输沙量急剧上升。

0.01 的置信水平,表明石门水文站输沙量变化达到显著水平,有明显的上升趋势(图 2)。

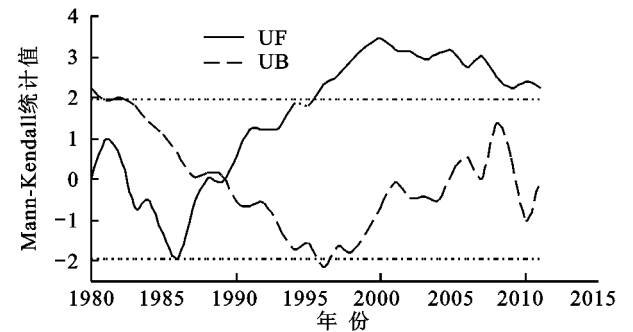


图 2 呼图壁河输沙量 Mann-Kendall 统计量曲线

3.2 输沙量变化的影响因素分析

3.2.1 降雨因素 如图 3 所示,降雨量和输沙量的整体变化趋势大致相同,但一致性的强度不大。表现为,虽然降雨量与输沙量的大致趋势具有一定的相似性,但降雨量增加幅度较大时,输沙量增加幅度未必大,降雨量最多时,输沙量未必最多,并且个别年份当降雨量增加(或减少),输沙量表现为减少(或增多)。分析呼图壁河降水量年内分配特征可知降雨量主要集中在 5—9 月,占全年降水量的 70.21%,降水极大值也出现在 7 月。这与输沙量的年内分配特征大致相同,故推测降雨量可能通过影响其他因素间接地对输沙量产生影响,比如降雨量增多时,径流量增加,从而使输沙量增加。

3.2.2 径流因素 呼图壁河流域 1980—2011 年的多年平均径流量为 4.859 亿 m^3 ,总体呈波动状态,上升或下降的趋势变化较大。由图 4 可知,该时期内径流量与输沙量变化趋势基本一致,径流量最大值出现

在 1999 年,为 6.336 亿 m^3 ,此时,输沙量也较大;输沙量最大值出现在 1996 年,为 212.586 万 t,该年的径流量也较大,1986 年径流量和输沙量为 32 a 最低,分别是 3.633 亿 m^3 、4.964 万 t。呼图壁河径流量年内分配主要集中在 6—9 月,占年内总径流量的 78.93%,丰枯交替明显,这与输沙量的年内分配特征极其相似,且输沙量较径流量更为集中。

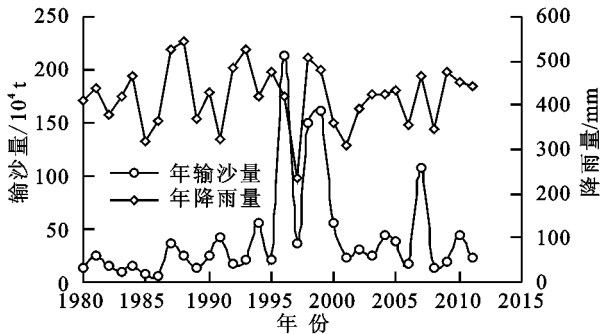


图 3 1980—2015 年呼图壁河降雨量及输沙量年际变化

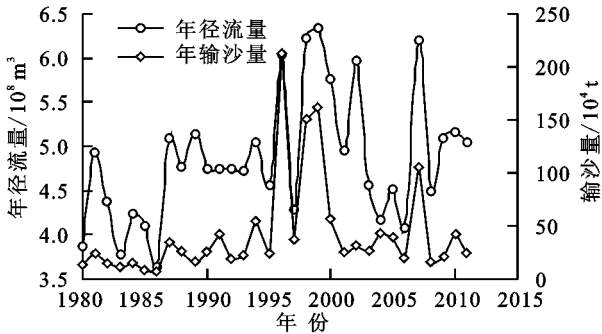
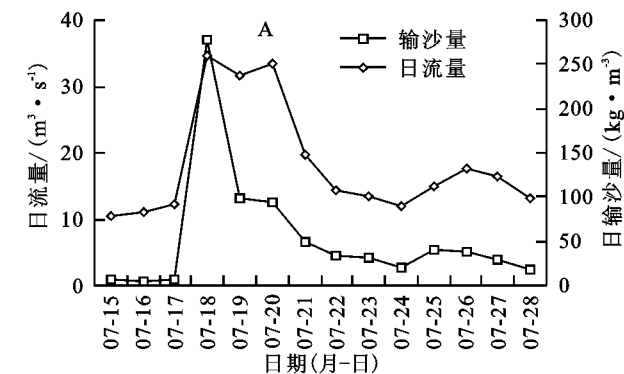


图 4 1980—2011 年呼图壁河径流量及输沙量年际变化

为了进一步研究径流量、降雨量与输沙量之间的关系,对三者做相关分析,由输沙量的年际变化趋势(图 1)可知,输沙量在 1996—2000 年变化幅度较大,其余年份增加或减少的幅度不大,故将时间序列分为 1980—1995 年、1996—2000 年、2001—2011 年 3 个时间段进行分析。由表 2 可知,1980—1995 年、1996—



3.2.3 人类活动因素 双累积曲线方法是目前水文气象要素一致性或者长期演变趋势分析中最直观、最简单、最广泛的方法。对呼图壁河流域的降水量与输沙量双累积曲线进行分析,从而确定人类活动对输沙

2000 年、2001—2011 年多年输沙量与径流量均呈正相关,且相关系数分别为 0.692,0.744,0.597,均通过了 0.01 的置信水平;多年输沙量与降雨量均呈正相关,相关系数分别为 0.191,0.759,0.488,1980—1995 年输沙量—降雨量未通过 0.01 的置信水平;多年径流量与降雨量均呈正相关,且相关系数分别为 0.356,0.947,0.336,在 1996—2000 年通过了 0.01 的置信水平,并且显著相关。

表 2 多年降水量、径流量与输沙量相关性分析

年份	输沙量—径流量 相关系数	输沙量—降雨量 相关系数	径流量—降雨量 相关系数
1980—1995 年	0.692*	0.191	0.356*
1996—2000 年	0.744*	0.759*	0.947*
2001—2011 年	0.597*	0.488*	0.336*

注: * 代表置信水平 $p < 0.01$ 。

由于 1996—2000 年降雨量、输沙量以及径流量之间的相关性显著。根据资料记载,1996 年 7 月 15 日至 7 月 28 日和 1999 年 7 月 15 日至 7 月 28 日新疆普降大雨,其中天山地区达到暴量,呼图壁河流域发生特大洪水,其中呼图壁河青年渠首站最大洪峰流量达到了 $560 \text{ m}^3/\text{s}$ [11-13]。对呼图壁河流域 1996 年 7 月 15 日—7 月 28 日(图 5A)和 1999 年 7 月 15 日—7 月 28 日(图 5B)的日输沙量和日流量的趋势进行分析可知:两个时期的径流量和输沙量趋势都相同,且表现出高度的一致性,1996 年暴雨洪水期间输沙量和日流量最大值都出现在 18 日,并且在 17 日的降雨量为 31.8 mm,占该时段降水总量的 46.9%。1999 年暴雨洪水期间输沙量和日流量最大值都出现在 20 日,并且在 19 日的降水量为 34.8 mm,占该时段降水总量的 53.7%。由此可知:流域干燥的气候,较低的植被覆盖率,加之脆弱的生态环境,导致该流域在降水量猛增时,径流量增加的同时,输沙量剧增。

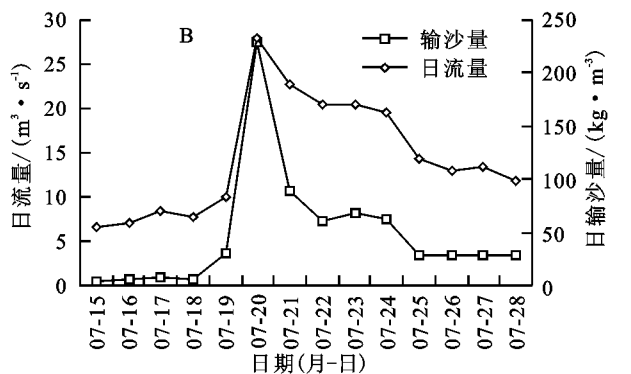


图 5 不同时期呼图壁河流域输沙量和日流量变化

量变化的影响,并对其影响程度进行定量化分析。由图 6 可以看出,1996—1999 年呼图壁河流域输沙量的变化较大。以 1980—1995 年为基准期,可知 1996—1999 年期间年均输沙量为 140.20 万 t,较 1980—1995

年年均输沙量增加了 118.34 万 t,其中人类活动对其贡献程度为 99.23%,而 2000—2011 年年均输沙量为 36.88 万 t,较 1963—1979 年年均输沙量增加了 15.02 万 t,其中人类活动对其贡献程度为 92.52%。

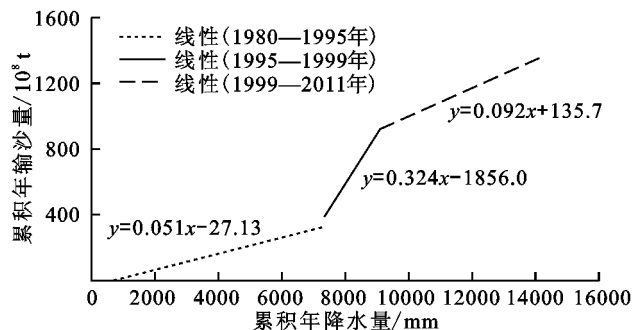


图6 呼图壁河年输沙量—年降水量双累积曲线

人类活动例如水利工程、土地利用等可以改变流域的下垫面条件^[10]。自 1962 年以来,呼图壁河从上游往下游在干流上依次建有石门水库、齐古水库、阿苇滩渠首、独山子渠首、青年渠首、芨芨坝渠首、小海子水库、大海子水库、鹰湖水库等水利工程。其中,石门水库位于石门水文站下游 7 km 的峡谷进口处,坝顶全长 312.51 m,坝顶高程 1243 m,水库正常蓄水位 1 240.0 m,总库容 7 975 万 m³,设计多年平均输沙量 22.6 万 t 具有灌溉、防洪、发电及工业供水等综合作用。水库于 2011 年 4 月 22 日大河截流,2013 年 10 月 3 日大坝开始蓄水。这些兴建的水库等水利设施的拦蓄作用,势必加剧输沙量的变化,水利工程对河道水沙变化的影响还受到流域尺度的影响,流域尺度越小,河道水沙变化受水利工程建设的影响就越敏感,其滞后性就越短^[14]。

呼图壁河水土流失形态随地形、地貌等自然条件的变化而不同,南部高山区水土流失主要表现为冻融侵蚀和重力侵蚀,中低山区水土流失主要表现为水力侵蚀,中部冲积平原区水土流失主要表现为风力水力交错侵蚀,北部戈壁荒漠区主要表现为风力侵蚀。据第 3 次全国土壤侵蚀快速遥感调查,呼图壁县水土流失总面积为 5 217.17 km²,占国土总面积的 50.88%。其中水蚀面积为 1 153.24 km²,占全县水土流失面积的 22.11%,占国土总面积的 11.25%;风蚀面积 3 981 km²,占全县水土流失面积的 76.31%,占国土总面积的 38.82%;冻融侵蚀 82.93 km²,占全县水土流失面积的 1.58%,占国土面积的 0.81%。侵蚀模数为 4 250 t/(km²·a),侵蚀程度为中度侵蚀。并且该区域现有 14 座煤矿,由于新疆特殊的地貌类型,加之当地政府对该地区自然资源不合理的开采用,造成呼图壁河流域水土流失现象严重。

呼图壁河流域水土流失严重,引起了当地政府的重视,近年来在流域内开展了一系列水土保持工程。

根据呼图壁水利局数据显示:呼图壁河流域规划预防保护区 2 376 km²,预防监督区 2 668.38 km²,重点治理区 5 210.3 km²。其中:水保林 587.43 hm²,经济林 2 533.33 hm²,封育治理 4 000 hm²,沟头防护 33.8 km,截流沟 76.8 km,工矿区拦渣坝 8.5 km,工矿区护坡工程 6.8 km;工矿区整治土地 20.2 hm²。

在干旱区的产流区有侵蚀较强的荒坡地,其表层多为基岩风化剥落的碎石、岩屑,部分地带亦覆盖风积沙,是侵蚀泥沙的主要来源,且对农牧区土地危害较重。为防止其泥沙输往下游,实施沟头防护工程、坡面水土保持林建设和坡面拦蓄截流工程。在矿区,要重视开展水土保持实施护坡工程和拦渣工程。对于流域周边的坡耕地进行退耕还林还草,在荒山荒坡荒地上经过整地后造林种草及栽植经济果木林,对疏林地进行补植,并进行封禁治理。这些措施将对干旱区流域水土保持治理有重要的作用。

4 结论

本文利用 Mann-Kendall 非参数趋势和突变检验法、双累积曲线法,对呼图壁河石门水文站近 32 年来的输沙量进行分析,研究结果显示:

(1) 近 32 年呼图壁河输沙量年内分配极不均匀,连续最大 4 个月输沙量出现在 6—9 月,占全年输沙量的 94.61%,平均输沙量最大月出现在 7 月,呼图壁河输沙量年际变化呈丰枯相间的周期性变化,总体呈增加趋势。呼图壁河输沙量最大值出现在 1996 年,为 212.586 万 t;1986 年的输沙量为 32 a 最低,为 4.964 万 t。

(2) 经 Mann-Kendall 检验综合分析呼图壁河年输沙量整体呈增加的趋势,且增加显著,并且在 1989 年发生突变。对比突变年前后输沙量变化可知,1989—2011 年的年均输沙量比 1980—1988 年的年均输沙量增加了 209.2%。1996 年为呼图壁河有史以来最大的一次暴雨洪水,当时石门站最大洪峰流量达到 371 m³/s,暴雨洪水在增加径流量的同时也携带了大量的泥沙,导致输沙量急剧上升。

(3) 呼图壁河输沙量主要受径流量控制,降雨在一定程度上增加了径流量,但对输沙量的影响表现为增加或者减少两种结果。输沙量变化受人类活动影响显著,输沙量变化不仅受上游水库的影响,还受近年来流域周边由于不合理的开采等人类活动造成的水土流失等的影响。

(4) 呼图壁河流域山区海拔高,雨水充沛,加之全球气候变暖导致冰雪融化速度加快,暴雨洪水频发,携带大量泥沙,易导致下游流域发生泥沙淤积,影响社会经济发展。因此,开展流域内的水土保持工程刻不容缓。

势,1956—1958 年浑河径流量与降水量变化存在较好的一致性,但阶段性变化趋势存在一定差异,1958—1976 年径流与降水变化趋势基本一致,但径流振幅较小,1977—2006 年径流主要表现长周期特征而径流则在长周期变化中还包含小幅振荡的短周期。滑动平均结果也显示,浑河径流量与降水量的变化趋势是一致的,70 年代之前降水和径流变化基本一致,70 年代之后径流和降水的峰谷变化趋势一致,但丰水年份径流与降水一致性好于枯水年份,表明降水偏丰的年份降水对径流的影响更为明显,可能是气候变化和人类活动等其他因素对枯水年份的降雨径流关系影响较大。通过分析浑河流域 1956—2011 年 56 a 逐年降水量与水文站相同时段内的逐年径流量的相关性,得到该时间段内浑河流域逐年降水量与同时期水文站逐年径流量的相关系数为 0.682,浑河流域的降水量与径流量的相关系数很大,同时结合累积距平曲线和滑动平均曲线分析得出浑河流域降水量

和径流量具有较高的相关性。

参考文献:

- [1] 王勇,许红梅,程炳岩,等. 1951—2012 年降水变化对涪江流域径流的影响[J]. 气候变化研究进展,2014,10(2):127-134.
- [2] 杨默远,桑燕芳,王忠根,等. 潮河流域降水—径流关系变化及驱动因子识别[J]. 地理研究,2014,33(9):1658-1667.
- [3] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe(Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams[J]. Global and Planetary Change,2006,50(3/4):212-225.
- [4] 付玉娟,何俊仕,慕大鹏,等. 辽河流域水资源可利用量分析计算[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(1):107-110.
- [5] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [6] 董晓辉,姚治君,陈传友. 黄河源区径流变化及其对降水的响应[J]. 资源科学,2007,29(3):67-73.

(上接第 149 页)

参考文献:

- [1] 任宗萍,张光辉,杨勤科. 近 50 年延河流域水沙变化特征及其原因分析[J]. 水文,2012,32(5):81-86.
- [2] 于涛,邓义祥,富国,等. 近 50 年来黄河输沙量变化特征及原因分析[J]. 人民黄河,2008,29(12):27-28.
- [3] 白东明,李卫红,郝兴明,等. 新疆呼图壁河流域径流时序变化特征[J]. 中国水土保持科学,2008,5(3):19-23.
- [4] 普宗朝,张山清,李景林,等. 气候变化对呼图壁河径流量的影响[J]. 沙漠与绿洲气象,2008,1(5):44-47.
- [5] 耿峻岭,高玲,陈建江,等. 新疆呼图壁河流域水文特征分析[J]. 干旱区研究,2005,22(3):371-376.
- [6] 范利杰,穆兴民,赵广举. 近 50 a 嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2013,33(1):12-17.
- [7] 王焕松,李子成,雷坤,等. 近 20 年大、小凌河入海径流量和输沙量变化及其驱动力分析[J]. 环境科学研究,2010(10):1236-1242.
- [8] 刘娜,谢永宏,张称意,等. 澧水水沙变化特征及成因分析[J]. 水文,2014,34(2):87-92.
- [9] 胡光伟,毛德华,李正最,等. 荆江三口 60 a 来入湖水沙变化规律及其驱动力分析[J]. 自然资源学报,2014,1(1):129-142.
- [10] 宋凤军,穆兴民,白桦. 嘉陵江流域输沙量演变规律分析[J]. 水土保持研究,2012,19(5):65-69.
- [11] 冉新量,朱健. 呼图壁河洪水传播时间分析[J]. 内蒙古水利,2011(4):87-88.
- [12] 李明正,庞春花,姜龙. 新疆呼图壁河“96·7”洪水分析[J]. 新疆农垦科技,2009,32(2):73-75.
- [13] 高玲,王晓峰. 新疆呼图壁河“99·7”洪水成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2008,2(4):31-33.
- [14] 张强,陈桂亚,许崇育,等. 长江流域水沙周期特征及可能影响原因[J]. 水科学进展,2009,20(1):80-85.