

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.04

金沙江下游元谋干旱河谷区水沙过程演变规律研究

丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 以金沙江下游元谋干旱河谷区 1970-2012 年的实测月值径流量、输沙量数据为基础,采用线性倾向估计、均差累积曲线、Yamamoto 检验和 Morlet 小波分析等方法,系统研究了元谋干旱河谷区水沙过程演变规律。结果发现:元谋干旱河谷区 85% 以上的水沙产输量集中在每年的季风期,自 20 世纪 70 年代以来水沙产输量总体呈现出微弱的减少趋势,产水量占整个流域的比例呈现出下降趋势而产沙量的比例却呈现出增加的趋势;1960 年以来元谋干旱河谷区径流量过程变化存在 2 个拐点,径流量在 1992 年和输沙量在 1994 年存在突变,而两者均在 2002 年均发生了强突变;年径流量、输沙量在 28 a 时间尺度上的周期性变化最为显著,为第一主周期,均存在 1 个完整的丰水、多沙中心年份和 1 个完整的少水、少沙中心年份,此外 13 a 左右时间尺度上的周期也较为突出;相对于径流量而言,自 1992 年开始元谋干旱河谷区泥沙量有增加趋势,而从 2003 年开始输沙量则转变为减少趋势。

关键词: 水沙过程; 演变规律; 金沙江下游; 元谋干旱河谷

中图分类号:TV141

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)06-0020-07

Study on the evolution rule of water and sediment processes in Yuanmou arid valley of Jinsha River, southwest China

DING Wenrong

(College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on the measured data of runoff and sediment in monthly time scale from 1970 to 2012 of Yuanmou arid valley in the lower reaches of the Jinsha River, the linear trend estimate, mean cumulative curve, Yamamoto test and Morlet wavelet analysis method were employed to study the water and sediment evolution rule. The results showed that: more than 85% of water and sediment transportation in Yuanmou arid valley are during the annual monsoon period, since the 1970s, the water and sediment transportation amount showed a slightly decreasing trend, water production accounted for the proportion of the whole basin showed a decline trend while the sediment yield ratio presented an increasing trend. The runoff and sediment process has two abrupt points since 1960s, the abrupt point of runoff was in 1992 and 1994 for the sediment, while the runoff and sediment both have an obvious abrupt point in 2002. The periodic variation of annual runoff and sediment is the most significant in the 28 year time scales, which is the first main cycle, and there were one complete wet, sandy center year and one complete center year of less water and sand. In addition, the periodic variation in 13 years time scale is also prominent too. Compared to the runoff, the sediment yield in Yuanmou arid valley has an increasing trend since 1992 but presented a decreasing trend since 2003.

Key words: water and sediment processes; evolution rule; reaches of Jinsha River; Yuanmou arid valley

河流水沙过程是流域系统最基本的物理过程,既是流域水土流失程度变化的反映,也是河流系统演变的重要动力因子。当前,水土流失已成为全球性的环境问题,严重威胁着人类的生存与发展,不仅

造成土地资源破坏,引起农业生态环境恶化,而且还导致生态平衡失调,水旱灾害频繁,给社会经济和人民生活造成了极大危害^[1-2]。我国是世界上水土流失最为严重的国家之一^[3]。

收稿日期:2017-07-12; 修回日期:2017-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41761105,41101099); 云南省教育厅重点项目(2015Z056)

作者简介:丁文荣(1979-),男,云南昆明人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水文水资源方面的研究工作。

干旱河谷是我国横断山区最为突出的自然景观,主要分布在金沙江、雅砻江、岷江、安宁河、大渡河、怒江、澜沧江和元江等大江大河的干流及其支流的部分河谷地段,垂直幅度为200~1 000 m,河谷总长为4 105 km,总面积达 $1.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ [4]。作为横断山区的“天然温室”,干旱河谷堪称横断山区的“宝地”,自古以来就是各族人民生存繁衍的场所和交通要道。然而,干旱河谷区特殊的气候,加之人为活动导致地表植被稀疏,水土流失严重,造成了一系列严重的生态系统退化问题,严重制约着区内社会经济持续发展和生态环境的改善,是我国典型的生态脆弱区[5-6]。诸多学者较早就在干旱河谷区水土流失方面展开了有意义的探讨,初步弄清了干旱河谷区水土流失现状和演变过程,但这些研究主要以坡面径流小区尺度和整个流域为主,干旱河谷尺度或视角的探讨鲜见[7-15]。鉴于此,本文在前人工作的基础上,系统研究元谋干旱河谷区水沙过程演变规律,试图为该区生态环境保护与社会经济可持续发展策略制定提供科学支持。

1 研究区概况

元谋干旱河谷是我国西南干旱河谷尤其是金沙江干旱河谷的典型代表,地处滇中高原北部的金沙江一级支流龙川江中下游。本研究以楚雄小河口站为研究区入口控制站,小黄瓜园站为出口控制站,区间作为元谋干旱河谷区,面积为3 772 km^2 ,占龙川江流域面积的67.84%,位于东经 $101^\circ 35' \sim 102^\circ 05'$ 和北纬 $25^\circ 25' \sim 26^\circ 07'$ 之间,地形闭塞,海拔较低,东、西、南三面均是高山环绕。河谷区内年均日照时数2 550~2 744 h,日照百分率为60%,年均温 21.5°C ,最热月均温 27.1°C ,最冷月均温 14.9°C ;河谷区年均降雨量640 mm主要集中在雨季6-10月,占全年降雨量的90%,年蒸发量3 507.2 mm,为降雨量的5.6倍; $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温 $7 996^\circ\text{C}$,无霜期达350~365 d。20世纪50年代初期,元谋干旱河谷区海拔2 000 m以上的温凉山区依然森林茂密,到1973年森林覆盖率迅速下降为6.3%,1977年再次发生大规模砍伐,区内森林被砍伐殆尽,自20世纪80年代初开始大规模植树造林,随着“长治工程”的实施,造林力度有所加大,但由于成活率低,森林面积增加不明显[16]。此外,元谋干旱河谷是云南省乃至全国宝贵的热区资源之一,也是我国著名的反季节蔬菜基地,有“金沙江畔大菜园”之称。

2 数据来源与研究方法

选取楚雄龙川江小河口站为研究区入口控制站,小黄瓜园站为出口控制站,其中小黄瓜园站为国家基本站,小河口站为省级重要监测站。研究所需径流量和输沙率数据均来源于上述监测站点,时段为1970年1月-2012年12月,共43 a。

水沙过程的变化趋势采用线性倾向方程来表示,即:

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 t \quad (1)$$

式中: Y 为待分析的水沙数据; t 为时间; α_1 为线性趋势项。 $\alpha_1 \times 10$ 为水沙要素每10 a的变化量,若 α_1 为正,表明该要素为增加趋势,反之则为减少趋势。

水沙时间序列中的阶段性变化采用均差累积曲线来获得[17],计算公式为:

$$f(i) = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad (2)$$

式中: X_i 为某一年份的水沙数值; \bar{X} 为整个研究时段内的平均值。

在通过均差累积曲线获得跃变点后,采用Yamamoto法进行突变年份的显著性检验[18],该方法定义:若 x_1, x_2 两个阶段的变化(均值)超过其正常波动范围(标准差),那么即可以认为发生了突变。也即当信号(S)与噪声(N)的比值 $S/N > 1.0$ 时,意味着存在突变,而当 $S/N > 2.0$ 则表明有强突变发生,其计算公式为:

$$S/N = | \bar{x}_1 - \bar{x}_2 | / (s_1/2 + s_2/2) \quad (3)$$

其中: \bar{x}_1, \bar{x}_2 为两个阶段的均值; s_1, s_2 分别为两个时段的标准差。

采用小波分析方法探讨水沙过程变化的周期性特征,该方法通过伸缩平移运算对水沙信息逐步进行多尺度细化,自动适应水沙时频信号分析的要求,从而可聚焦到水沙信号的任意尺度,最终达到高频处时间细分,低频处频率细分的要求[19-20]。本研究采用复值Morlet小波作为小波基,具体形式为:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}f_b} e^{2\pi i f_c t} \cdot e^{-t^2/f_b} \quad (4)$$

式中: f_b 为带宽; f_c 为中心频率; i 为虚数。当 $f_b = 2$ 且 $\omega = 2\pi f_c$ 时,复值Morlet小波的伸缩尺度 a 与Fourier分析中周期的对应关系为:

$$T = \frac{4\pi a}{\omega + \sqrt{2 + \omega^2}} \quad (5)$$

从公式(5)中可以看出,当 $\omega = 6.2$ 时,周期 T 可以近似地用 a 来代替。

3 结果与分析

3.1 变化趋势

从年内尺度来看,因受季风气候降水变化的影响,元谋干旱河谷区水沙产输过程也表现出明显的季节性特征(图1)。从图1(a)可以看出,当5月中下旬进入雨季后,元谋干旱河谷区产流量迅速增加,

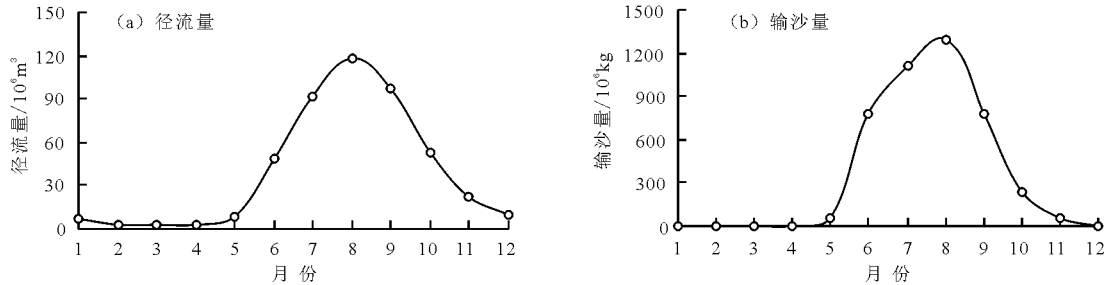


图1 元谋河谷区径流量与输沙量年内变化趋势

元谋干旱河谷区多年平均产水量为 $451.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, 多年平均产沙量为 $4285.4 \times 10^6 \text{ kg}$, 从年际变化来看,在全球气候变化与人类活动的双重影响下,元谋干旱河谷区水沙过程也随之发生了变化。从径流量来看,自20世纪60年代以来,河谷区产水总体呈现出微弱的减少趋势(图2(a)),进入本世纪来减少明显。河谷区产水年际波动较大,变差系数 C_V 值为0.63,研究时段内1998年产流量为 $1177.5 \times 10^6 \text{ m}^3$,而2011年仅为 $72.3 \times 10^6 \text{ m}^3$,仅为前者的6.14%。由于径流是泥沙产输的重要水动力,导致河谷区泥沙的输移过程与径流过程较为类似(图2(b))。从中可以看出,自20世纪60年代以来,河谷区产沙总体呈现出减少趋势,且进入本世纪以来尤为突出。1998年产沙量最大1974年次之,两年的产沙量分别达 $14177.7 \times 10^6 \text{ kg}$ 和 $10637.7 \times 10^6 \text{ kg}$,而2011年仅为 $110.8 \times 10^6 \text{ kg}$,相当于1998年的0.83%,可见其年际变化较径流量更大,变差系数 C_V 值为0.77。采用Mann-Kendall检验对径流量和输沙量的变化趋势进行显著性检验后发现,两者的变化趋势均未达到0.05的显著性水平。

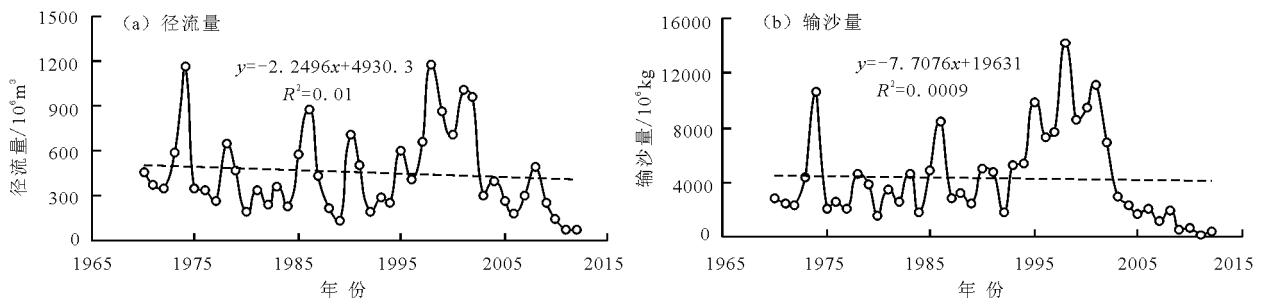


图2 元谋河谷区径流量与输沙量年际变化趋势

8月份达到峰值,然后逐渐减少,10月中下旬季风期结束后,产流量急剧减少,并持续到次年5月,6-10月径流量占全年的87.81%。而从图1(b)中得知,元谋干旱河谷区输沙量的变化较径流量更为集中,6-9月输沙量占全年的91.89%,7-8两个月的输沙量占全年的比例高达55.77%。

元谋干旱河谷区占龙川江流域面积的67.84%,河谷区产水产沙量在小河口水沙通量中占有很大比例(图3)。从图3中可以看出,河谷区年均产流量占黄瓜园站的62.37%,而产沙量为91.89%,2012年产沙量甚至高达黄瓜园站的99.09%。从图3(a)中可以看出,自1965年以来,元谋河谷区产水量占整个流域的比例呈现出下降趋势,速率为 $-0.88\%/10a$;而图3(b)表明,产沙量占整个流域的比例却呈现出增加的趋势,速率为 $0.99\%/10a$ 。通过Mann-Kendall检验对水沙过程的演变趋势进行显著性检验后发现两者的变化趋势同样均未达到0.05的显著性水平。

从年代际来看(表1),元谋干旱河谷区水沙产输量一直是波动变化的。1971-1980年、1981-1990年、1991-2000年和2001-2010年的产水量分别为 $473.01 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $410.88 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $566.57 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $430.15 \times 10^6 \text{ m}^3$,经历了多-少-多-少的变化过程,而产沙量分别为 $3645.96 \times 10^6 \text{ kg}$ 、 $3915.53 \times 10^6 \text{ kg}$ 、 $7417.38 \times 10^6 \text{ kg}$ 和 $3120.29 \times 10^6 \text{ kg}$,经历了少-多-少的变化过程。

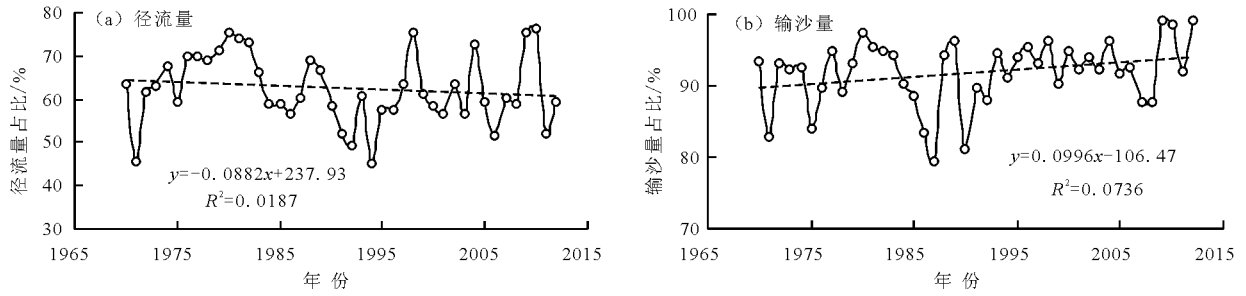


图 3 元谋河谷区径流量与输沙量占全流域的比例

表 1 元谋河谷区径流量与输沙量的年代际变化

年份	径流量/ 10^6 m^3	输沙量/ 10^6 kg
1971 - 1980	473.01	3645.96
1981 - 1990	410.88	3915.53
1991 - 2000	566.57	7417.38
2001 - 2010	430.15	3120.29

3.2 突变分析

从均差累积曲线的变化特征来看,元谋河谷区

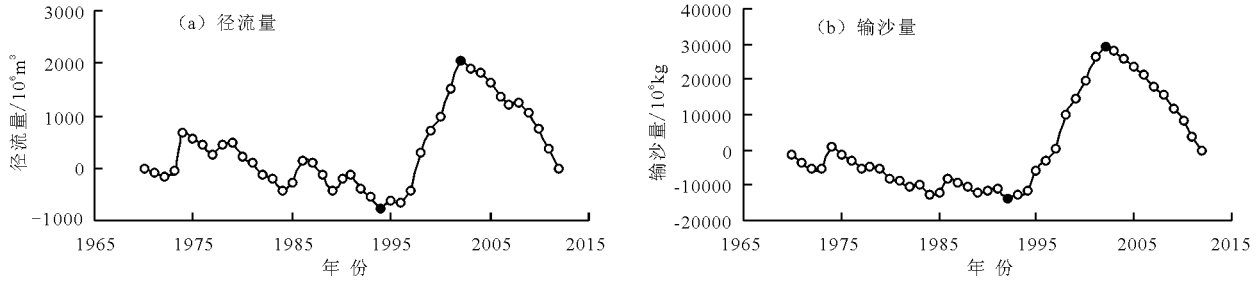


图 4 年径流量、输沙量均差累积曲线

根据均差累积曲线对水沙变化阶段的划分结果,采用 Yamamoto 法分别计算了水沙数据 3 个相邻阶段的信噪比 S/N , 计算结果显示了径流量相邻 3 个阶段的信噪比分别为 1.56 和 2.89, 而输沙量则分别为 1.99 和 3.92。表明径流量在 1992 年和输沙量在 1994 年存在突变, 而两者均在 2002 年均发生了强突变。

3.3 演变周期

有研究表明,采用复值 Morlet 小波进行时间序列分析时,小波系数实部的变化趋势与待分析信号的起伏基本一致,小波系数等值线中心分别为待分析信号高值和低值中心,中心值的大小可以反映出信号波动的强烈程度^[21]。图 5 为元谋干旱河谷区径流量与输沙量的复值 Morlet 小波系数实部,其中正小波系数为高值,负小波系数为低值。从图 5(a) 中可以看出,元谋干旱河谷区年径流量在 28 a 时间尺度上的周期性变化最为显著,存在 1 个完整的丰

水沙过程具有基本一致的变化规律,其中产流量过程存在 2 个拐点,分别是 1994 年和 2002 年,而产沙量亦存在 2 个拐点,分别为 1992 和 2002 年(图 4)。通过拐点可以分别将径流量和输沙量分为 3 个时段。径流量自 1970 年至 1994 年为减少趋势,1995 年至 2002 年为增加趋势,2003 年以来又呈现为减少趋势。对于输沙量,1970 年至 1992 年为减少趋势,1993 年至 2002 年为增加趋势,而 2003 年以来同样表现为减少趋势。

水中心年份和 1 个完整的少水中心年份,多水中心年份是 1999 年,少水中心年份为 1984 年。此外,12 a 时间尺度上的周期也较为突出,分别存在 3 个明显的多水中心和少水中心。3 个丰水中心分别为 1976、1987 和 1999 年,而 3 个少水中心年份则分别为 1981、1993 和 2006 年。

从年产沙量来看(图 5(b)),周期变化在 28 a 时间尺度上最为明显,分别存在着 1 个完整的多沙中心年份和 1 个完整的少沙中心年份。多沙中心年份为 1999 年,而少沙中心年份则处于 1984 年。此外,泥沙产输在 14 a 时间尺度上也存在明显的周期性特征,与年径流量相类似,该时间尺度上区域性特征突出,分别存在 3 个完整的多沙和少沙中心年份。3 个多沙中心年份分别为 1976、1987 和 1999 年,而 3 个少沙中心年份分别为 1981、1993 和 2006 年。

小波方差图能反映所研究时间序列的波动能量随尺度的分布情况,可用来确定降水量演化过程中

存在的主周期。径流量的小波方差图中(图6(a))存在3个较为明显的峰值,它们依次从小至大对应着28、12和4a的时间尺度。其中,最大峰值对应着28a的时间尺度,说明28a左右(时间尺度的

周期震荡最强,为年径流量变化的第一主周期,12、4a时间尺度分别对应着第二、三峰值,分别为第二、三主周期。这说明上述3个周期的波动控制着径流量在整个时间域内的变化特征。

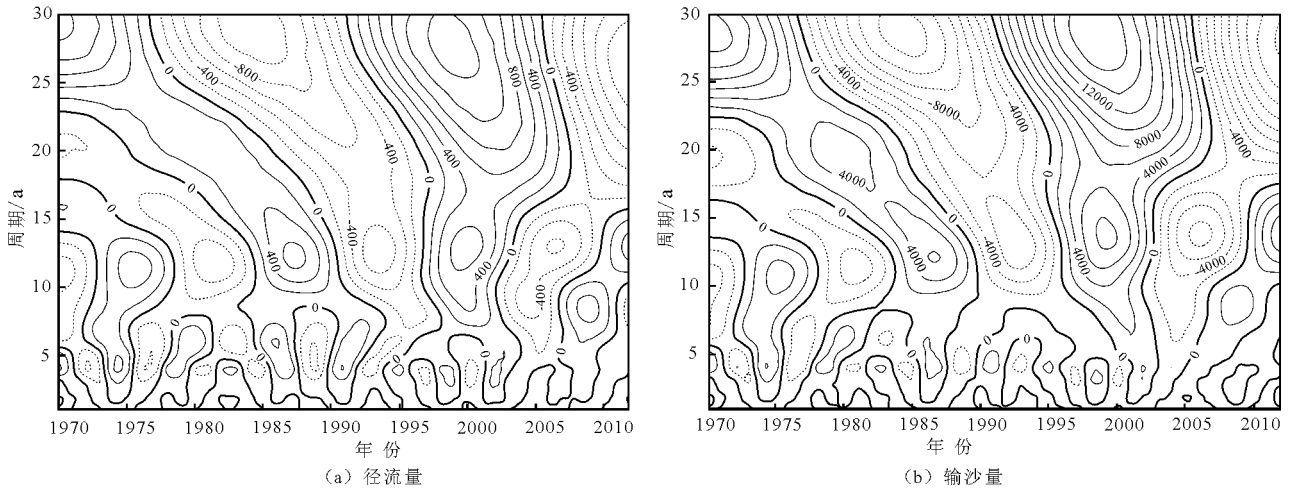


图5 径流量、输沙量的复值 Morlet 小波实部

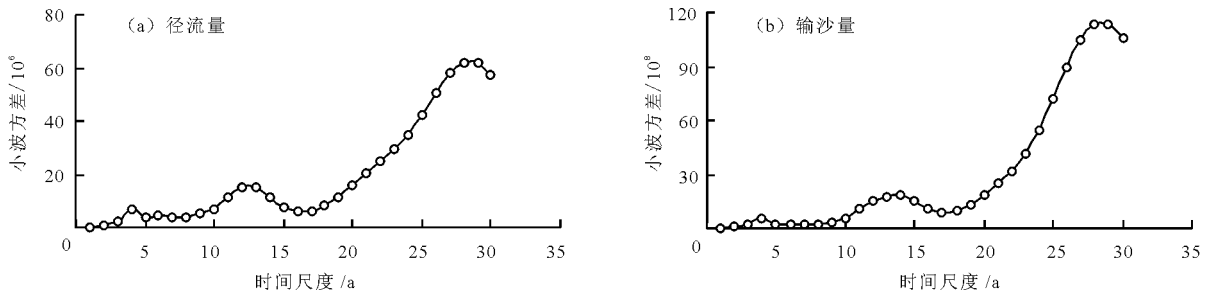


图6 径流量、输沙量变化的小波方差

而在输沙量的小波方差图中(图6(b))也同样存在3个较为明显的峰值,它们依次对应着28、14和4a的时间尺度。其中,最大峰值对应着28a的时间尺度,说明28a左右的周期震荡最强,为流域年径流变化的第一主周期,14、4a时间尺度为输沙变化的第二、三主周期。同样表明上述3个周期的波动控制着河谷区输沙在整个时间域内的演变特征。

3.4 水沙关系

河流水沙变化过程是一个受众多因素影响的复杂过程,其形成和演变是自然和人类活动综合作用的结果^[22]。双累积曲线是水文学中常用来反映流域水沙系统变化的特性曲线,水沙过程如发生趋势性变化时,在累积水沙量关系线上将表现出明显的转折,双累积曲线斜率将发生变化^[23-24]。

图7中以1970至2012年的流量、输沙率资料为基础,点绘了元谋河谷区的径流-泥沙双累积曲线。从双累积曲线中可以看到两个明显的转折点,

即从1992年开始,累积曲线向上偏,表明相对于径流而言,泥沙有增加趋势;而自2003年以来,累积曲线呈现下偏倾向,揭示了相对于径流而言,输沙具有减少的趋势。

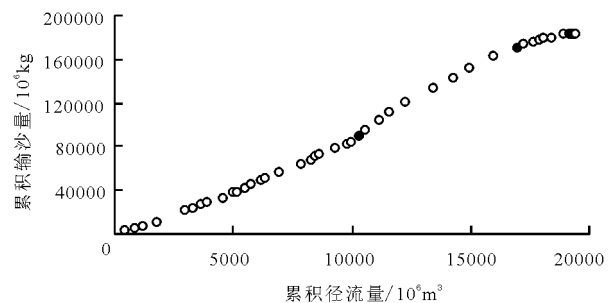


图7 1970-2012年水沙累积曲线

4 水沙变化的成因初探

水沙过程是河流健康的重要指标,而水沙过程变化是一个受众多因素影响的复杂过程,这些因素可以自然与人为因素^[3]。上文分析中可知,元谋干

旱河谷区水沙量均出现减少趋势,前期研究成果表明 20 世纪 50 年代以来元谋河谷区降水没有明显的变化,而气温呈现出微弱的下降趋势^[25],故可以确定人为因素在元谋河谷区水沙变化中占有主导地位。元谋河谷区被称为“成昆铁路上的菜篮子”,干旱缺水条件下发展蔬菜种植,必然会大量从河流里引水灌溉,这必然导致径流量的减少^[26]。而元谋河谷区作为“长治”工程、天然林保护工程、退耕还林等重点区域,近 30 年来植被得到缓慢恢复,坡面产沙得到控制^[27],加之径流量减少导致的水动力减弱,以及 1991 年河谷区中屯水库(库容 $11 \times 10^6 \text{m}^3$)和 1999 西静河水库(库容 $11.2 \times 10^6 \text{m}^3$)的修筑,截留了泥沙,致使河谷区泥沙输移呈现出减少的趋势。

5 结 论

为揭示元谋干旱河谷区环境变化、水土流失特征并为区域生态环境保护与社会经济可持续发展服务,本文以实测数据为基础,结合多种数理分析方法,系统研究了元谋干旱河谷区水沙过程演变规律,得到以下结论:

(1)元谋干旱河谷区水沙产输过程在年内表现出明显的季节性特征,85% 以上的水沙产输量集中在每年的季风期,自 20 世纪 60 年代以来水沙产输量总体呈现出微弱的减少趋势,进入 21 世纪后减少明显,元谋河谷区产水量占整个流域的比例呈现出下降趋势,而产沙量占整个流域的比例却呈现出增加的趋势,年代际产流量经历了多-少-多-少的变化过程,而产沙量分别为则经历了少-多-少的变化历程。

(2)1960 年以来,元谋干旱河谷区径流量过程变化存在 2 个拐点,分别是 1994 和 2002 年,输沙量亦存在 2 个拐点,分别为 1992 和 2002 年,计算结果表明径流量在 1992 年和输沙量在 1994 年存在突变,而两者均在 2002 年均发生了强突变。

(3)元谋干旱河谷区年径流量、输沙量在 28 a 时间尺度上的周期性变化最为显著,为第一主周期,均存在 1 个完整的丰水、多沙中心年份和 1 个完整的少水、少沙中心年份,此外 13 a 左右时间尺度上的周期也较为突出。

(4)径流-泥沙双累积曲线的转折点表明,从 1992 年开始,相对于径流而言,元谋干旱河谷区泥沙量有增加趋势,而从 2003 年开始输沙量则转变为减少趋势。

参考文献:

- [1] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.
- [2] 陈学兄.基于遥感与GIS的中国水土流失定量评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [3] 胡春宏.黄河水沙过程变异及河道的复杂响应[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 张荣祖,郑度,杨勤业.横断山区干旱河谷[M].北京:科学出版社,1992.
- [5] 杨兆平,常禹.我国西南主要干旱河谷生态及其研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(4):90-93+99.
- [6] 姜世中,梁川.降水和植被变化对龙川江径流量的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2006,38(5):58-64.
- [7] Zhu Yunmei, Lu Xixi, Zhou Yue. Sediment flux sensitivity to climate change: A case study in the Longchuanjiang catchment of the upper Yangtze River, China[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60(3-4):429-442.
- [8] Zhu Yunmei, Lu Xixi, Zhou Yue. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China[J]. Geomorphology, 2007, 84(1):111-125.
- [9] 姜世中,梁川.龙川江年输沙率时间序列的小波特征[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(11):197-200.
- [10] 周跃,朱云梅,吕喜玺.人为活动对金沙江一级支流龙川江流域输沙量的影响分析[J].昆明理工大学学报(理工版),2006,31(1):77-82.
- [11] 张建平,杨忠,庄泽.元谋干热河谷区水土流失现状及治理对策[J].云南地理环境研究,2001,13(2):22-27.
- [12] 吴云飞.金沙江干热河谷区水土流失成因及防治对策[J].山西水土保持科技,2014(2):4-7.
- [13] 刘芝芹,王克勤,李艳梅.金沙江干热河谷坡面降雨产流特征的分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2010,28(2):227-231.
- [14] 陈奇伯,王克勤,刘芝芹,等.金沙江干热河谷封禁管护坡面的产流产沙特征[J].水土保持研究,2006,13(4):217-219.
- [15] 刘海,陈奇伯,王克勤,等.元谋干热河谷林地和农地集水区尺度水土流失对比研究[J].中国水土保持,2012(7):57-59.
- [16] 张建平,王道杰,杨忠,等.元谋干热河谷区森林消长与生态环境变化的研究[J].中国沙漠,2001,21(1):79-83.
- [17] Bobrovitskaya N N, Kokorev A V, Lemesko N A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1):127-146.
- [18] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气

- 科学,1992,16(4):482-493.
- [19] 吴创收,杨世伦,黄世昌,等. 1954-2011年间珠江入海水沙通量变化的多尺度分析[J]. 地理学报,2014,69(3):422-432.
- [20] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [21] 尤卫红. 气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究[M]. 北京:气象出版社,1998.
- [22] 陈松生,张欧阳,陈泽方,等. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析[J]. 水科学进展,2008,19(4):475-482.
- [23] 张明波,郭海晋,徐德龙,等. 嘉陵江流域水保治理水沙模型研究与应用[J]. 水土保持学报,2003,17(5):110-113.
- [24] 许全喜,石国钰,陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展,2004,15(4):420-426.
- [25] 丁文荣. 横断山区干旱河谷气候变化趋势研究[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(6):681-687.
- [26] Zhang Jianping, Yang Zhong, Wang Daojie, et al. Climate change and causes in the Yuanmou dry-hot valley of Yunnan, China [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 51(1):153-162.
- [27] 周旭,张斌,刘刚才. 元谋干热河谷近30年植被变化遥感监测[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1309-1313.

(上接第19页)

- [8] 余嵘,赵丹,刘渊博,等. SWMM模型中不同LID措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电,2016(1):35-38.
- [9] 王蓉,秦华鹏,赵智杰. 基于SWMM模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51(1):141-150.
- [10] Marlène V D S, Ataur R, Garry R. Modeling of a lot scale rainwater tank system in XP-SWMM: a case study in Western Sydney, Australia [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 141:177-189.
- [11] 王健,周玉文,刘嘉,等. 雨水调蓄池在国内外应用简况[J]. 北京水务,2010(3):6-9.
- [12] 彭竹葳. 基于SWMM的滇池环湖截污干渠(东岸段)的截流能力及运行状况分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [13] 魏婷. 滇池东岸非点源污染负荷控制初探[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [14] 喻晓琴. 滇池流域典型城镇雨水径流特征及截流方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [15] 浦鹏. 滇池环湖截污干渠(东岸段)错峰技术方案模拟与分析[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [16] 胡晓惠,张智,姚娟娟,等. 滇池环湖截污干渠高效截流分析[J]. 给水排水,2016,42(4):113-117.