

昆明松华坝水源地水沙特征及变化趋势分析

袁树堂, 刘新有

(云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106)

摘要: 径流与输沙变化是水源地健康的重要表征。利用昆明松华坝水源地中和水文站 1961 – 2011 年径流和 1966 – 2011 年输沙数据, 运用集中度与集中期、R/S 分析方法, 对松华坝水源地径流和输沙变化、年内分配及未来趋势变化进行了定量分析。结果表明: 径流和输沙均呈下降趋势, 2009 – 2011 年连续干旱导致径流和输沙骤减; 输沙年内分配集中度高于径流, 径流和输沙年内分配集中度分别呈下降和上升趋势; 径流和输沙分别出现 26 和 24 年的长周期, 径流和输沙多年平均集中期分别出现在 8 月中旬和上旬, 且均呈提前趋势; 径流未来仍将延续下降趋势, 但趋势性不强, 输沙未来变化趋势具有不确定性; 径流和输沙年内分配集中度仍将分别延续下降和上升的趋势, 且输沙年内分配未来变化的趋势性更强。

关键词: 径流与输沙; 变化趋势; 集中度与集中期; R/S 分析; 松华坝水源地

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0073-06

Analysis of feature and variation trend of runoff and sediment in Songhuaba water source land of Kunming

YUAN Shutang, LIU Xinyou

(Yunnan Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming 650106, China)

Abstract: The change of runoff and sediment is the important characterization of health of water source land. Using the runoff data from 1961 to 2011 and sediment load data from 1966 to 2011 of Zhonghe hydrological station river in Songhuaba water source land, the paper utilized concentration degree and time, R/S analysis method to quantitatively analyzed the runoff and sediment load and their annual distribution changes, and theirs future trend Songhuaba water sources land. The results show that the runoff and sediment load showed a downward trend in the past, the continuous drought from 2009 to 2011 lead to sharp decline of runoff and sediment load; The concentration degree of annual sediment load distribution is generally higher than that of runoff, the change trends of concentration degree of annual runoff and sediment load showed downward and upward trend respectively; the runoff and sediment load appear long cycle of 26 and 24 years; average time of concentration of annual runoff and sediment load appear respectively in middle and early August, and showed ahead of the trend; in the further, the runoff will continue downward trend, but the trend is not strong, the change of sediment load is uncertain; the concentration degree of annual runoff and sediment load distribution will respectively continue upward and downward trend, and the trend of concentration degree of annual sediment load distribution will stronger than that of runoff.

Key words: runoff and sediment load; variation trend; degree and time of concentration; R/S analysis; water source land of Songhua dam

随着城市规模的不断扩大和水资源与水环境的恶化, 城市可持续水资源管理已成为全世界关注的焦点^[1]。近年来, 我国城市饮用水水源安全形势日

益严峻^[2], 水源地保护和生态修复也因关系到城市供水安全逐渐受到了全社会的高度关注。与云贵高原许多城市一样, 昆明城区分布于地形相对封闭的

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-05-29

基金项目: 水利部公益性行业项目(201001058)

作者简介: 袁树堂(1971-), 男, 云南昆明人, 本科, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

通讯作者: 刘新有(1981-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源及生态环境研究。

山间盆地,所处的滇池流域没有过境江河,城市用水,特别是饮用水主要依靠水库供给。因此,城市水库水源地是昆明城市饮水安全和社会经济发展的命脉。松华坝水库是昆明市最重要的属地饮用水源,其水资源和生态环境的变化一直是当地政府和社会各界关注的焦点。径流与输沙是生态系统健康的重要表征,其变化也是区域自然因素与人类活动共同作用的结果的综合反映。但从已有的研究来看^[3-8],仍然缺乏基于长序列实测数据的松华坝水源地径流和输沙的系统分析,以致许多相关研究停留在定性层面。本文利用松华坝水源地小河上的中和水文站 1961-2011 年径流和 1966-2011 年输沙实测数据,运用集中度与集中期、R/S 分析等方法,对径流和输沙变化、年内分配及未来趋势变化进行系统的定量分析,为松华坝水源地脆弱性诊断及生态修复等后续研究奠定基础。

1 研究区概况

松华坝水库位于昆明市北郊 12 km 处。其流域处于 102°45'~102°59'E,25°10'~25°28'N 之间,南北长 36 km,东西宽 24 km,总面积 593 km²。水源区内地势由东北向西南倾斜,海拔高程在 1 920~2 600 m 之间,主要有牧羊河和小河两条支流汇入松华坝水库,水库下游经盘龙江贯穿昆明主城区注入滇池。松华坝水库始建于 1958 年,总库容 2.19 亿 m³,年均向昆明城区供水 1.4 亿 m³ 左右。

昆明市人均水资源量不足 300 m³,属极度缺水地区,是全国 14 个严重缺水城市之一。为缓解城市缺水状况,昆明市在周边地区不断寻找水源。2006 年掌鸠河云龙水库引水工程竣工,日引水量达 60 万 m³;目前正在实施的牛栏江引水工程也即将竣工,届时可为滇池水质改善起到决定性作用。尽管通过跨流域调水缓解了昆明市水资源紧缺状况,但松华坝水库作为稳定可靠的属地水源,仍然在保障昆明城市供水安全中具有不可替代的作用。由于历史原因,松华坝水源区内人口数量达 8 万多人且逐年增长,日益加剧的人类活动对水源区植被破坏较为严重,导致水源涵养功能逐渐衰退。

2 资料与方法

2.1 资料来源

分析数据来源于松花坝水源地中和(小河)水文站 1961-2011 年径流和 1966-2011 年输沙实测数据。由于受松花坝水库回水影响,小河水文站于

1992 年上迁并改名为中和水文站。小河水文站控制流域面积为 373 km²,中和水文站控制流域面积为 357 km²。为便于分析,将小河水文站 1961-1992 年径流和 1966-1992 年输沙数据按照控制流域面积比转换成中和水文站径流和输沙数据,得到一致的数据序列。中和水文站控制流域面积占到松花坝水源地面积的 60.2%,其径流和输沙特征对于松华坝水源地具有较好的代表性。

2.2 集中度与集中期

集中度(PCD)指要素按月以向量方式累加,其各分量之和与年总量的比值,反映其在年内的集中程度。集中期(PCP)是指要素向量合成后的方位,反映其全年集中的重心所出现的月份,用各月分量之和的比值正切角度表示。

$$PCD = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / R_{year} \quad (1)$$

$$PCP = \arctan(R_x / R_y) \quad (2)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i, R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \quad (3)$$

式中: R_{year} 为要素年值; R_x 、 R_y 分别为要素 12 个月的分量之和所构成的水平、垂直分量; r_i 为要素第 i 月的值; θ_i 为要素第 i 月的矢量角度; i 为月序。集中度越大表示年内分配越不均匀。

2.3 小波分析

水沙变化周期分析采用小波分析法。小波变换将一维信号在时间和频率两个方向上展开,不仅可以给出序列变化的尺度,还可以显现出变化的时间位置。20 世纪 90 年代以来,小波分析作为一种基本分析手段,在众多领域得到广泛应用。

小波变换的离散形式为

$$w_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) y\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right)$$

式中: $w_f(a, b)$ 小波变换函数; a 为频率参数; b 为时间参数,表示波动在时间上的平移; Δt 为取样间隔; n 为样本量; $f(x)$ 和 $y(x)$ 为函数。

在进行小波变换计算时,首先根据研究问题的时间尺度确定出频率参数 a 的初值和时间间隔,再选定并计算母小波函数(一般选用 Mexican hat 小波函数),最后将确定的频率 a 、研究对象序列及母小波函数代入公式(4)计算出小波变换。

2.4 Mann-Kendall 检验

水沙时序突变分析采用 Mann-Kendall 检验法。Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法,不仅可判断时间序列中上升或下降趋势的显著性,而且可判断时间序列是否存在突变并标出突

变开始的时间。其原理与计算方法如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列,构造秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \cdots, n) \tag{5}$$

其中,当 $1 \leq j \leq i, x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$, 否则 $r_i = 0$ 。

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{6}$$

式中: $UF_1 = 0, E(S_k), \text{Var}(S_k)$ 分别是累计数 S_k 的均值和方差,在 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 相互独立且具有相同连续分布时,可由以下式分别求出:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \tag{7}$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{8}$$

UF_k 是按时间序列 x 顺序在 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 计算出的统计量序列,在给定显著性水平 α 下,在正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2}$,若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$,则趋势显著,反之则不显著;按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$,重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \cdots, 1, UB_1 = 0$,分析绘出 UF_k 或 UB_k 曲线图;当 UB_k 或 UB_k 超过临界值时,表示趋势显著,超过临界线的范围出现突变的时间段;若 UF_k 和 UB_k 曲线相交,且交点在临界线之间,则交点对应的时刻为突变的开始时间。

2.5 R/S 分析法

R/S 分析法 (Rescaled Range Analysis)^[9] 通过 Hurst 指数 $H(0 < H < 1)$ 对时间序列趋势变化进行判断,最早由 Hurst 提出,后经 Mandelbrot 与 Wallis 进一步补充完善,把它发展成为研究时间序列的分形理论。原理与计算方法如下:

对时间序列 $k(t), t = 1, 2, \cdots$, 对于任意正整数 $j \geq 1$, 定义均值序列

$$k_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j k(t) \tag{9}$$

累积离差

$$X(t, j) = \sum_{u=1}^t (k(u) - k_j) \tag{10}$$

极差

$$R(j) = \max X(t, j) - \min X(t, j) \quad (1 \leq t \leq j) \tag{11}$$

标准差

$$S(j) = \left[\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (k(t) - k_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

将 $(\ln j, \ln R/S)$ 用最小二乘法拟合,所得拟合直

线的斜率即为 H 值。当 $H = 0.5$ 时,表明序列是完全独立的,即序列是一个随机过程;当 $H < 0.5$ 时,表明未来的变化状况与过去相反,即反持续性, H 越小,反持续性越强;当 $H > 0.5$ 时,表明未来的变化状况与过去一致,即有持续性, H 越接近 1,持续性越强。

3 结果分析

3.1 水沙年际变化趋势

昆明市松华坝水源地中和站多年平均径流量为 $2.59 \text{ m}^3/\text{s}$,产水模数为 $22.9 \text{ 万 m}^3/\text{km}^2$,年际变差系数为 58.8% 。其中 1966 年径流量最大,达 $5.65 \text{ m}^3/\text{s}$,2011 年径流量最小,仅 $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$,年径流量最大值是最小值的 11 倍。中和站多年平均输沙率为 1.06 kg/s ,产沙模数为 93.8 t/km^2 ,年际变差系数为 70.5% 。其中 1979 年输沙量最大,达 4.16 kg/s ,2011 年输沙量最小,仅 0.01 kg/s ,年输沙量最大值是最小值的 416 倍。2011 年径流量与输沙量极端偏少除了与当年降水偏少有关之外,还与 2009-2011 年连旱土壤前期含水率偏低、径流系数大幅降低有关。2009 年以来的连续干旱导致的土壤缺水还将对后期产流及水库蓄水带来不利影响。从图 1 可知,年径流量与输沙量均呈波动下降趋势,且年际变化较大,这与区域气候变化导致的水文情势变化大趋势一致^[10]。

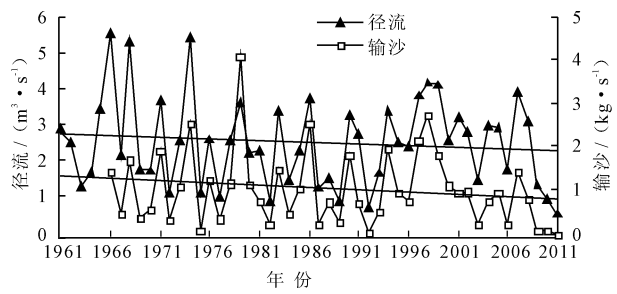


图 1 中和站径流与输沙变化趋势

3.2 水沙年内分配

将中和水文站径流和输沙按年代划分为 5 个不同时期,计算各时期的逐月平均径流量和输沙率。由图 2 可知:松华坝水源地各时期径流和输沙均呈现出“单峰型”特征,且输沙年内分配的峰型更为“尖瘦”,表明输沙集中程度更高;径流峰值多出现在 8 月,最低值多出现于 4 月;输沙几乎全部集中于雨季(5-10 月),峰值多出现在 7 月或 8 月;径流峰值变化呈减小趋势,与年径流变化趋势一致;各时期输沙峰值差异大,无明显变化趋势。

为定量评价径流与输沙年内分配集中程度,对

径流和输沙序列进行集中度和集中期计算,并同样按 5 个不停时期统计。由表 1 可知:松华坝水源地径流和输沙年内分配集中度多年平均值均较高,分别为 0.521 和 0.659,输沙年内分配集中度总体上高于径流;径流年内分配集中度呈明显下降趋势,而输沙年内分配集中度呈明显上升趋势;径流和输沙多年平均集中期分别出现在 8 月 14 日和 8 月 2 日,各时期集中期时间与峰值出现时间基本对应;从各时期集中期时间变化来看,径流和输沙的集中期均

呈现出提前趋势。

3.3 水沙变化周期分析

由图 3、4 可知:中和站年径流 26 年左右长周期最为明显,年输沙 24 年左右长周期最为明显,且均存在 2 年组短期波动,与降水周期基本一致^[11];2009 - 2011 年为明显的偏枯期,由小波分析和总体变化趋势来看,2009 年以来的径流偏枯期将持续 13 年左右,即 2012 - 2021 年径流仍将处于偏枯期,松华坝水库入库水量与多年平均水平相比将有所下降。

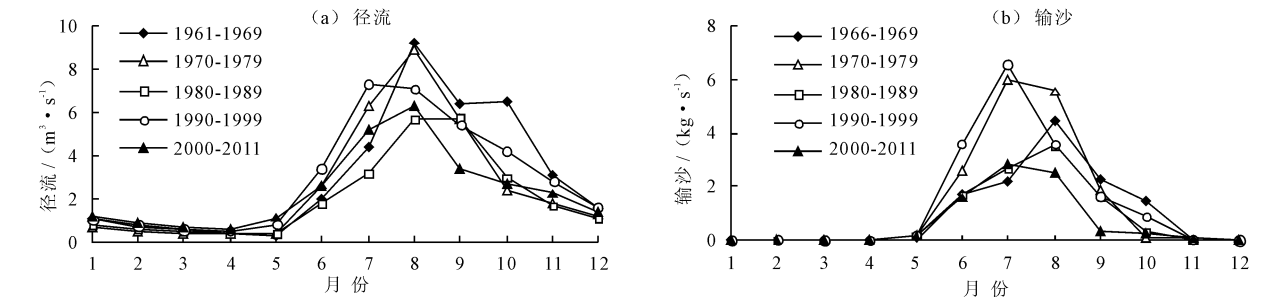


图 2 中和站径流、输沙不同时期年内分配变化

表 1 中和站径流和输沙不同时期年内分配集中度与集中期 (°)

时 段	径 流			悬移质输沙		
	集中度	集中期方向	集中期时间	集中度	集中期方向	集中期时间
1961(1966) - 1969	0.584	235.5	08-23	0.559	235.0	08-26
1970 - 1979	0.575	220.8	08-09	0.574	221.3	08-12
1980 - 1989	0.544	226.2	08-14	0.556	226.0	08-17
1990 - 1999	0.521	217.4	08-05	0.719	199.2	07-21
2000 - 2011	0.408	218.3	08-06	0.789	192.1	07-14
多年平均	0.521	223.2	08-14	0.659	210.8	08-02

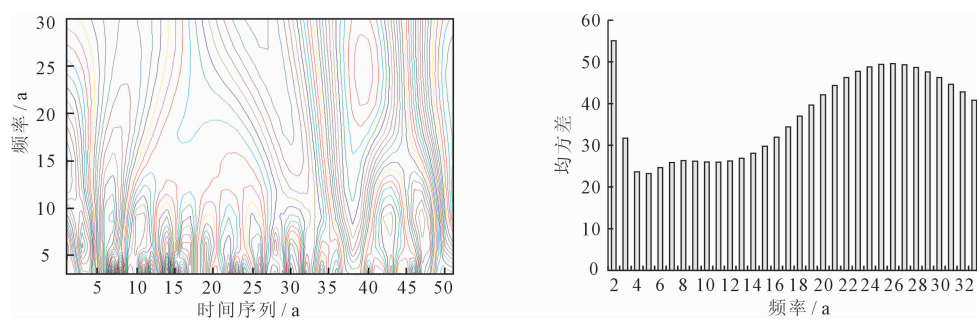


图 3 中和站年径流小波分析

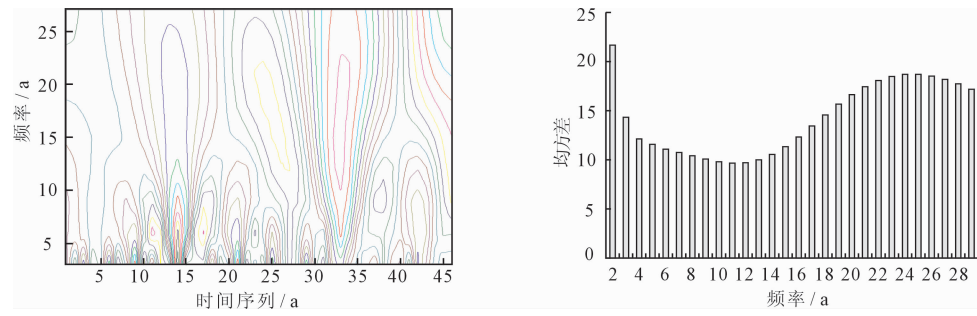


图 4 中和站年输沙小波分析

3.4 水沙突变分析

由图 5 可知:中和站径流 UF 与 UB 曲线几次相交,但只有 1998 年 UF 曲线超过信度 $\alpha = 0.01$ 临界值线,为突变时段; UF 与 UB 曲线 2009 年开始趋势急剧变化,且于 2011 年相交,表明径流于 2011 年开始发生突变。由图 6 可知:输沙 UF 曲线 1994 - 1999 年超过信度 $\alpha = 0.01$ 临界值线,为突变时段; UF 与 UB 曲线 2009 年开始趋势急剧变化,且于 2010 年相交,表明输沙于 2010 年开始发生突变。

3.5 水沙量及其集中度趋势变化

由图 7、8 可知:中和站径流的 H 值为 0.6013,大于 0.5,表明径流的未来趋势与过去一致,即仍将延续波动下降的趋势,但趋势性不强;输沙的 H 值为 0.5016,接近 0.5,表明输沙序列基本上是一个随机过程,即未来变化趋势具有极高的不确定性。中和站径流和输沙年内分配集中度的 H 值分别为 0.6583、0.8655,均大于 0.5,表明径流与输沙年内分配集中度的未来趋势与过去一致,即径流年内分配集中度仍将延续波动下降的趋势,而输沙年内分配集中度仍将延续波动上升的趋势;输沙年内分配

的 H 值大于径流,表明输沙年内分配未来变化的趋势性更强。

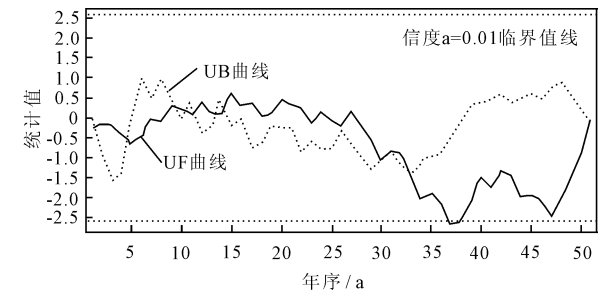


图 5 中和站年径流 Mann - Kendall 检验 $UF \sim UB$ 曲线

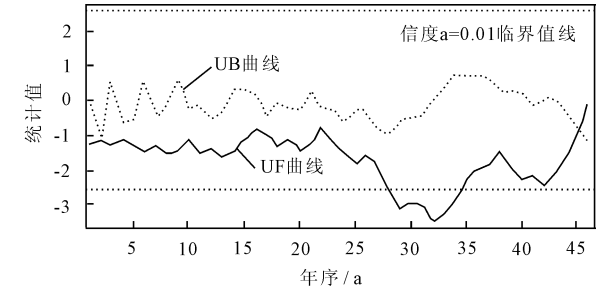


图 6 中和站年输沙 Mann - Kendall 检验 $UF \sim UB$ 曲线

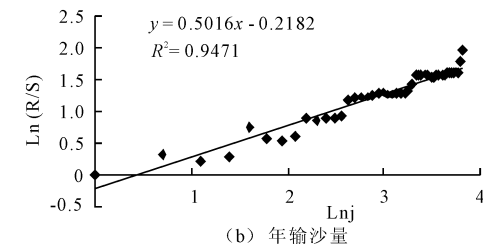
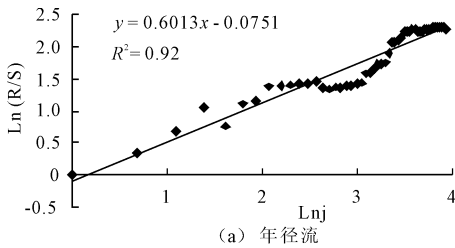


图 7 中和站年径流和年输沙 H 值拟合

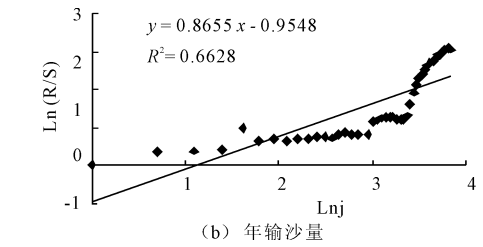
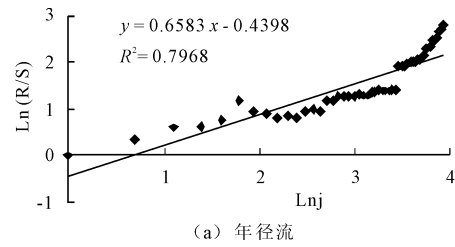


图 8 中和站年径流和年输沙年内分配 H 值拟合

4 结 语

(1)松华坝水源地径流和输沙过去均呈波动下降趋势,且年际变化较大,这种变化趋势与区域气候变化有关;2009 - 2011 年 3 年连旱期,松华坝水源地径流和输沙明显偏少,特别是 2011 年达到 20 世纪 60 年代以来的最低值,且连续干旱导致的土壤缺水还将对水源地产流和水库蓄水造成不利影响。

(2)径流和输沙年内分配集中度多年平均值均较高,且输沙年内分配集中度总体上高于径流;径流年内分配集中度呈明显下降趋势,而输沙年内分配集中度呈明显上升趋势,说明径流与输沙的相关性逐渐降低,这可能与松花坝水源地日益加剧的人类活动有关。径流和输沙多年平均集中期分别出现在 8 月中旬和 8 月上旬,且均呈现出提前的趋势。

(3)径流和输沙分别以 26 a 和 24 a 长周期最

为明显,且均存在 2 a 组短期波动,表明 2009 年以来的径流偏枯期将持续 13 a 左右,即 2012 – 2021 年径流仍将处于偏枯期,松华坝水库入库水量和可供水量将受到影响。

(4)径流 1998 年为突变时段,回归非突变时段后,于 2011 年开始发生突变;输沙 1994 – 1999 年为突变时段,回归非突变时段后,于 2010 年开始发生突变。

(5)径流的未来趋势与过去一致,即仍将延续波动下降的趋势,但趋势性不强;输沙基本上是一个随机过程,未来变化趋势具有极高的不确定性。径流与输沙年内分配集中度的未来趋势与过去一致,即径流年内分配集中度仍将延续波动下降的趋势,而输沙年内分配集中度仍将延续波动上升的趋势,且输沙年内分配未来变化的趋势性更强。

由于水土流失及输沙量除了与降水、径流密切相关外,还与下垫面状况有关。各时段人类活动导致的下垫面变化可能是引起输沙变化趋势与径流在保持基本一致的基础上又存在一定差异的原因。

参考文献:

[1] 夏 军,左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展,2006,21(3):256 – 261.

[2] 国家发展和改革委员会、水利部、建设部、环保总局、卫生部. 关于印发全国城市饮用水安全保障规划的通知(发改地区[2007]2798 号)[Z],2007.

[3] 李云驹,潘剑君,许建初,等. 气候和土地利用变化对松华坝流域水资源的相对作用研究[J]. 南京农业大学学报,2012,35(1):80 – 86.

[4] 许成娟,梁 川. 昆明市松华坝水源保护区水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报,2012,12(1):161 – 165.

[5] 邱学礼,付 斌,夏体渊,等. 松华坝水库入库河流牧羊河水质时空变异特征[J]. 水土保持学报,2012,26(1):255 – 258.

[6] 李宗逊. 水源保护区保护的概念框架 – 以昆明市松华坝水源保护区为例[J]. 生态经济,2007(6):137 – 139.

[7] 陈加莉,尹 浩. 松华坝水库源区旱地生态修复研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(24):11696 – 11698.

[8] 牛芳兵,朱克西. 昆明市松华坝水源区人口容量分析[J]. 云南农业大学学报(社会科学版),2010,4(2):1 – 4.

[9] 赵 晶,王乃昂. 近 50 年来兰州市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理,2002,25(1):90 – 95.

[10] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(1):39 – 44 + 63.

[11] 刘新有,黄英,袁树堂. 昆明松华坝水源区降水特征及小波分析[J]. 水文,2013,33(2):59 – 63.

(上接第 72 页)

[11] 张志辉,薛禹群,谢春红,等. 含水层热量运移中自然热对流作用的数值模拟[J]. 水科学进展,1996,7(2):99 – 104.

[12] Huyakorn P S, Thomas S D, Thompson B M. Techniques for making finite elements competitive in modeling flow in variably saturated porous media[J]. Water Resources Research, 1984, 20(8):1099 – 1115.

[13] 张志辉,吴吉春,薛禹群,等. 含水层热量输运中自然热对流和水 – 岩热交换作用的研究[J]. 工程地质学报,1997,5(3):269 – 275.

[14] 赵延林,曹 平,赵阳升,等. 双重介质温度场 – 渗流场 – 应力场耦合模型及三维数值研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):4024 – 4031.

[15] 强 晟,赵 燕,张 杨. 不连续岩体温度场的复合单元模型初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2094 – 2100.

[16] 刘泉声,刘学伟. 裂隙岩体温度场数值流形方法初步研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(4):635 – 642.

[17] 高 娟,冯梅梅,杨维好. 渗流作用下裂隙岩体冻结温度场分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(1):68 – 73.

[18] 刘泉声,刘学伟. 裂隙岩体温度场数值流形方法初步研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(4):635 – 642.

[19] 徐维生,周创兵. 岩体裂隙网络渗流变水温影响分析[J]. 岩土力学,2014,35(1):204 – 210.