

# 佳芦河流域水沙演变及其驱动因素分析

俞奇骏<sup>a</sup>, 张洪波<sup>a,b</sup>, 陈克宇<sup>a</sup>, 顾磊<sup>a</sup>

(长安大学 a. 环境科学与工程学院; b. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在全球气候变暖的大背景下, 人类活动对河川径流的影响持续加强, 导致我国西北干旱半干旱区普遍发生径流减少甚至断流以及水沙关系变异等问题, 为此, 探究该地区流域水沙变化特征、趋势及内在原因显得尤为重要。采用滑动平均法和有序聚类分析法对佳芦河流域 1957–2010 年水沙变化特征进行分析, 并用水文分析法定量分离出降水及人类活动对该流域水沙变化的影响。结果表明: 佳芦河流域年径流及年输沙量均呈现减少趋势, 且两者在 1972 年均发生突变, 突变点后年平均径流仅为突变点前的 21.56%, 年输沙量减少更为显著, 仅为 6.45%。进一步分析发现, 在 1972 年后, 人类活动对年径流和年输沙量的减少的影响分别占 81% 和 67.23%, 并且各个时期影响率不同, 但整体上呈逐步加强趋势。人类活动是导致佳芦河流域径流及输沙量减少的主导因素, 在当前气候条件稳定的情况下这种缩减趋势仍将继续。

**关键词:** 河川径流; 输沙量; 水文分析法; 人类活动影响; 佳芦河流域

中图分类号: TV121.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0151-06

## Analysis of evolution and driving force factor of runoff and sediment in Jialu River watershed

YU Qijun<sup>a</sup>, ZHANG Hongbo<sup>a,b</sup>, CHEN Keyu<sup>a</sup>, GU Lei<sup>a</sup>

(a. School of Environmental Science and Engineering; b. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In the context of global warming, the impact of human activities on river runoff continues to strengthen, which results in happening the problems of runoff reduction, dried up and variation of runoff and sediment in northwest arid and semi-arid regions. Therefore, it's very important to explore the variation characteristics, trend and internal cause of runoff and sediment load in Jialu River. The paper used the methods of moving average and sequential cluster to analyzed the variation characteristics of runoff and sediment load from 1957 to 2010, and applied hydrologic analysis to quantitatively analyze the effect of precipitation and human activities on runoff and sediment load. The result showed that both runoff and sediment load presented the decrease trend, and took place the change point in 1972. The average runoff after 1972 accounts for only that of 21.56% before 1972, the annual sediment load obviously reduces and accounts for 6.45% of that before. The impact of Human activities on the reduction of runoff accounts for 81% and that of sediment load accounts for 67.23%. The impact is different in different periods but possesses the gradual strengthening trend contribution on the whole. Human activities are the dominant factors leading to reduction of runoff and sediment load and the decreasing trend will continue in the current climate conditions in Jialu River watershed.

**Key words:** river runoff; sediment load; method of hydrology analysis; impact of human activities; Jialu River watershed

收稿日期: 2015-01-31; 修回日期: 2015-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009009、51379014)

作者简介: 俞奇骏(1990-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事水资源评价方面研究。

通讯作者: 张洪波(1979-), 男, 辽宁康平人, 博士, 副教授, 主要从事水资源系统工程研究。

# 1 研究背景

受到气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的相互作用,径流及输沙量的演变过程在表现出确定性规律的同时,也有强烈的随机性<sup>[1]</sup>。在全球将继续变暖的情况下,如何更好地探索自然变化和人类活动影响的西北干旱区的水资源演变规律将会成为一个新的水科学问题<sup>[2]</sup>。

针对这一问题,我国的众多学者开展了大量研究,定性定量地分析了区域降水及人类活动对于流域水沙变化的影响。以黄河流域为例,王国庆等<sup>[3]</sup>利用 SWBM 水平衡模型模拟气候变化对径流的影响,认为径流对气候变化的响应是非线性的;并以黄河流域及窟野河流域为案例分别进行研究,研究表明:频繁的人类活动是我国大部分河流径流减少的主要原因<sup>[4-5]</sup>。邵肇悦等<sup>[6]</sup>对秃尾河径流年内、年际的变化进行了分析,得出结论:气温上升及水土保持和水利工程建设等人类活动的共同作用导致了秃尾河流域径流年际减少,年内分配均化。郭巧玲等<sup>[7]</sup>利用降水-径流双累积曲线法揭示了人类是导致窟野河径流量锐减的主要原因。姚文艺等<sup>[8]</sup>认为黄河流域中游总体而言,人类活动的减水作用远大于降雨的影响,但人类活动的减沙作用与降雨影响基本相当。不同区域气候变化和人类活动的不同,使其对水资源的影响程度也有所不同<sup>[9]</sup>。陈利群等<sup>[10]</sup>采用 2 个分布式水文模型(SWAT 和 VIC)分析了黄河源区气候变化和土地覆被对径流的影响,结果表明,引起径流减少的主要原因是气候变化。尽管佳芦河和秃尾河流域彼此相邻,针对秃尾河流域的相关研究也有很多,但佳芦河流域以黄土丘陵为主,秃尾河流域以沙地丘陵为主<sup>[11]</sup>,其在产流与产沙物理模式上有所区别,故本文以陕北佳芦河流域为例,并结合秃尾河流域的研究成果,探讨佳芦河流域水沙对降水及人为驱动的影响。

# 2 研究区概况

佳芦河流域位于黄河中游河龙区间,毛乌素沙漠南缘,陕北黄土高原北段,属黄土丘陵沟壑区,水土流失严重(图 1)。河流发源于榆阳区双山乡断桥村,由西北向东南,至佳县佳芦镇木厂湾村注入黄河。河流全长 93 km,流域面积 1 134 km<sup>2</sup>,平均比降 6.28‰,出口控制站申家湾水文站,控制面积 1 121 km<sup>2</sup>,流域多年平均降雨 400.23 mm,多年平均实测径流量 0.59 亿 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量 0.12 亿 t。

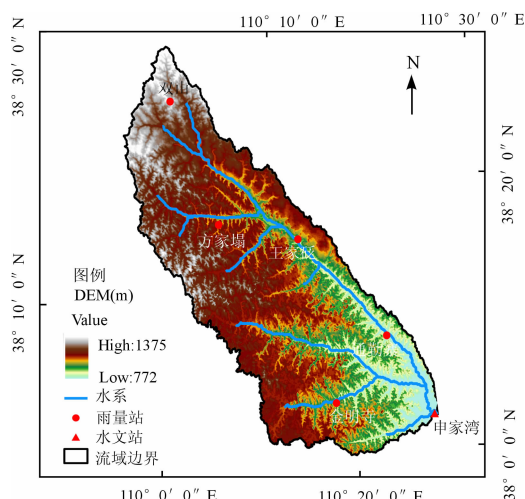


图 1 佳芦河流域地理位置图

# 3 数据与方法

## 3.1 数据

选用佳芦河流域申家湾水文站 1957 - 2010 年的实测年径流与输沙量数据,数据来源于黄土高原水土保持专业数据库以及黄委会水文局汇编的《黄河流域水文资料》。降雨资料采用图 1 所示的雨量站的点数据,资料来源于中国气象数据共享网,经计算后获得佳芦河流域 1957 - 2010 年的逐年平均面降雨量。

## 3.2 研究方法

采用滑动平均法、有序聚类分析法分析佳芦河流域径流量和输沙量的变化特征,并采用水文分析法定量评价降水与人类活动对流域水沙变化的影响。

(1) 滑动平均法。滑动平均法最主要的特点在于简捷性。它相对于其他动态测试数据处理方法而言,算法很简便,计算量较小,尤其是可采用递推形式来计算<sup>[12]</sup>,是目前水文气象研究中常用的一种时间序列检验方法。

对序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的几个前期值和后期值取平均,求出新的序列  $y_t$ ,使原序列光滑化,数学式为:

$$y_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{i=-k}^k x_{t+i} \quad (1)$$

其中:  $k$  为步长,当  $k=2$  时为 5 点滑动平均,当  $k=3$  时为 7 点滑动平均。若  $x_t$  具有趋势成分,选择合适的  $k$  (不宜太大),  $y_t$  就能把趋势清晰的显示出来<sup>[13]</sup>。

(2) 有序聚类分析法。用“物以类聚”来形容聚类分析,可以形象地表达聚类分析的思想。在分类时若不能打乱次序,这样的分类称为有序分类。以有序分类来推估最可能的突变点  $\tau$  其实质是寻求最优分

割点,使同类之间的离差平方和较小而类与类之间的离差平方和较大。对于水文序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 最优二分割法的要点如下:

$$V_{\tau} = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2$$

(2)

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2$$

(3)

式中:  $\bar{x}_{\tau}$ 、 $\bar{x}_{n-\tau}$  分别为  $\tau$  前后两部分的均值;  $\bar{x}_{\tau}$ 、 $\bar{x}_{n-\tau}$  分别为  $\tau$  前后两部分的离差平方和。

这样总离差平方和为:

$$S_n(\tau) = V_{\tau} + V_{n-\tau}$$

(4)

那么,当  $S = \min_{2 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\}$  时的  $\tau$  为最优二分割点,可推断为突变点。一般地,若序列有两个明显的阶段性过程,则总离差平方和的时序变化呈现单谷底现象;若两个或两个以上的明显阶段性过程,则总离差平方和的时序变化则呈现宽谷底现象,这样,可以根据谷底发生的时间划分序列变化的阶段<sup>[14]</sup>。

(3) 水文分析法。降水和人类活动对于流域水沙变化有不同的影响,为了区分这种不同,本文采用水土保持减水减沙效益的一种计算方法——水文分析法,简称水文法<sup>[15]</sup>。虽然河川径流量与输沙量受降水和下垫面条件控制,但是在天然状态下,两者具有统计相关关系,即在某一特定流域,若下垫面条件保持不变,在一定的降水条件下产生的径流量和输沙量基本是一定的,而如果下垫面条件发生了变化,

那么在相同的降雨条件下产生的径流和输沙量就可能不同<sup>[16]</sup>。根据上述原理,利用基准期的实测水文资料,通过回归分析,建立降雨与径流、输沙量关系的回归方程,应用于检验期即可分别计算降水和人类活动对径流及输沙量的贡献<sup>[17-18]</sup>。

4 结果与分析

4.1 佳芦河流域水沙变化趋势及突变点分析

图 2 为根据滑动平均法得到的佳芦河流域水沙变化趋势和突变点图。如图 2(a) 显示,50 多年来佳芦河流域的年径流量呈现减少的趋势,变率为  $-183 \text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。1957-1971 年的径流量变化相对稳定,而在 1972 年之后径流量急剧减少,尤其是在 2000 年以后,年平均径流量由  $1.038 \text{ 亿 m}^3$  (1957-1971) 骤减至  $0.224 \text{ 亿 m}^3$  (2000-2010),后者仅为前者的 21.56%。根据杨强等<sup>[19]</sup>得出的结论,榆林地区 1970-2010 年的降水量整体变化不明显,波动起伏虽然较大,但均未发生变异,可以认为,该地区人类活动是引起佳芦河流域径流量减少的主要原因。

同径流量变化特征一致,该流域年输沙量也呈减少趋势(图 2(b))。年输沙量由 1957-1971 年的  $0.31 \text{ 亿 t}$  减少至 2000-2010 年的  $0.02 \text{ 亿 t}$ ,减少 93.55%,这归因于 70 年代开始的水土保持措施。采用有序聚类分析法,分别分析申家湾站实测径流量及输沙量的离差平方和的时序变化(图 3)。

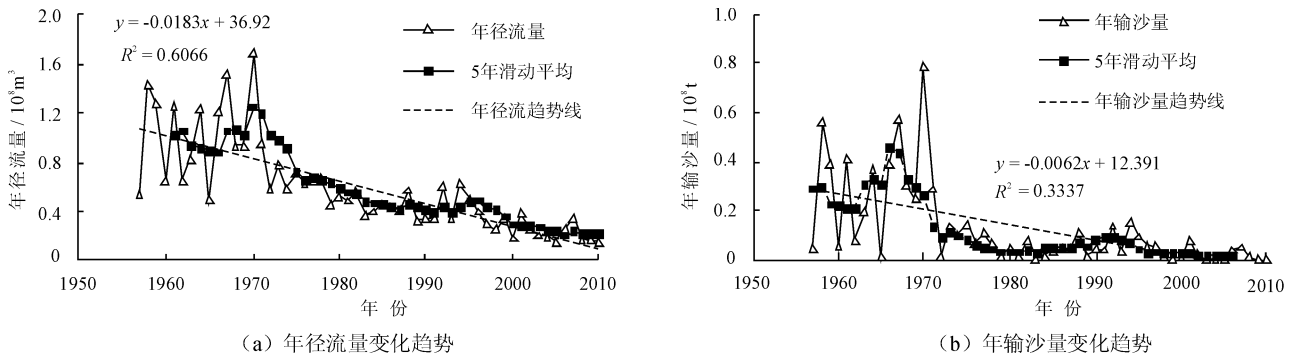


图 2 申家湾站年径流及输沙量变化趋势图

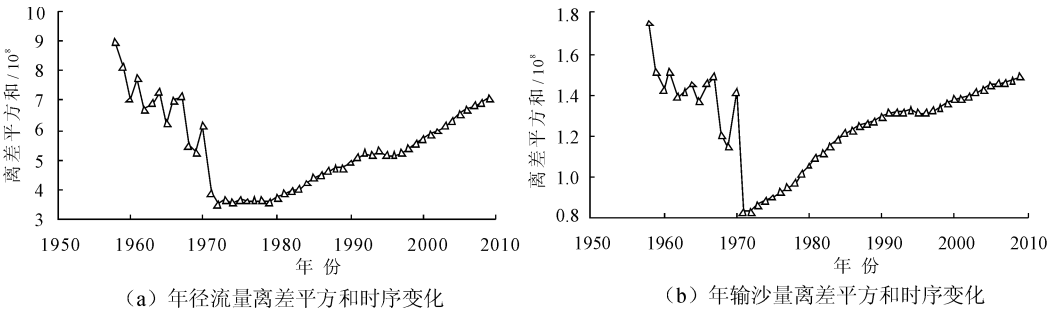


图 3 申家湾站年径流及输沙量离差平方和时序变化

由图 3(a)可以看出,实测年径流量离差平方和总体呈现宽谷底的变化情况,于 1972 年进入谷底并达到最低点,于 1978 年前后发生转折离开谷底。由此可以初步推测,申家湾站实测年径流变化以 1972 和 1978 年为分界,总体可以划分为 3 个变化阶段,分别为 1957 – 1971,1972 – 1977,1978 – 2010 年。

由图 3(b)可知,年输沙量的离差平方和时序变化与径流量不同,总体呈现单谷底变化,于 1972 年发生强烈转折,由此可以初步推断,申家湾站实测年输沙量变化以 1972 年为界划分为两个阶段,分别是 1957 – 1971 和 1972 – 2010 年。

为了进一步确认年径流量的突变年份,采用 F 检验法对径流各阶段进行显著性检验。首先判断 1972 年是否为突变年份,计算得到:  $F = 25.190$ ,查表得  $F_{0.05(14,5)} = 4.639$ ,由于  $F > F_{0.05(14,5)}$ ,说明 1972 年前后实测径流差异显著,可以认为 1972 年为突变年份;同样对 1978 年进行判断,计算得到  $F = 3.915 < F_{0.05}(32,5) = 4.490$ ,故此认为 1978 年

前后差异不显著,1978 年不是突变年份。所以,实测径流的突变年份为 1972 年。同样对实测泥沙各阶段进行 F 检验,确认 1972 年为其突变年份。据此结果,本文设定 1972 年以前为径流、泥沙序列的基准期,1972 年以后为检验期。

4.2 降水变化及人类活动对佳芦河流域的水沙影响

由于气候变化与人类活动共同作用于地表水文过程,近年来,如何有效地分离和辨析其对流域水沙变化的影响是目前水文学的研究热点之一<sup>[17]</sup>。依据基准期(1957 – 1971)内申家湾水文站降水、年径流量及年输沙量的资料,采用水文分析法分别建立基准期降雨 – 径流、降雨 – 输沙量之间回归方程,如图 4 所示。由图 4 可知,基准期内径流深和年输沙量与降水均呈现了较好的响应关系。

利用图 4 中建立的回归方程,计算不同阶段降水变化及人类活动对佳芦河流域水沙变化影响的定量结果,如表 1、2 所示。

表 1 降水量与人类活动对流域径流影响计算结果

| 年份          | 降雨/<br>mm | 径流深/mm |       | 总减少/<br>mm | 降水因子   |       | 人类活动   |       |
|-------------|-----------|--------|-------|------------|--------|-------|--------|-------|
|             |           | 实测值    | 计算值   |            | 影响值/mm | 影响率/% | 影响值/mm | 影响率/% |
| 1957 – 1971 | 441.13    | 92.60  | 92.61 |            |        |       |        |       |
| 1972 – 1980 | 356.85    | 55.21  | 76.79 | 37.39      | 15.81  | 42.28 | 21.58  | 57.72 |
| 1981 – 1990 | 372.63    | 38.70  | 79.75 | 53.90      | 12.85  | 23.83 | 41.05  | 76.17 |
| 1991 – 2000 | 371.19    | 34.52  | 79.48 | 58.08      | 13.12  | 22.59 | 44.96  | 77.41 |
| 2001 – 2010 | 434.56    | 20.34  | 91.38 | 72.26      | 1.22   | 1.69  | 71.04  | 98.31 |
| 1972 – 2010 | 384.50    | 36.73  | 81.98 | 55.87      | 10.62  | 19.00 | 45.25  | 81.00 |

表 2 降水量与人类活动对流域输沙量影响计算结果

| 年份          | 降雨/<br>mm | 输沙量/亿 t |        | 总减少/<br>亿 t | 降水因子    |       | 人类活动    |       |
|-------------|-----------|---------|--------|-------------|---------|-------|---------|-------|
|             |           | 实测值     | 计算值    |             | 影响值/亿 t | 影响率/% | 影响值/亿 t | 影响率/% |
| 1957 – 1971 | 441.13    | 0.3123  | 0.2824 |             |         |       |         |       |
| 1972 – 1980 | 356.85    | 0.0766  | 0.1982 | 0.2357      | 0.1141  | 48.42 | 0.1216  | 51.58 |
| 1981 – 1990 | 372.63    | 0.0406  | 0.2139 | 0.2717      | 0.0983  | 36.20 | 0.1734  | 63.80 |
| 1991 – 2000 | 371.19    | 0.0588  | 0.2125 | 0.2535      | 0.0998  | 39.37 | 0.1537  | 60.63 |
| 2001 – 2010 | 434.56    | 0.0204  | 0.2759 | 0.2919      | 0.0364  | 12.48 | 0.2555  | 87.52 |
| 1972 – 2010 | 384.50    | 0.0484  | 0.2258 | 0.2639      | 0.0865  | 32.77 | 0.1774  | 67.23 |

由表 1 可以看出,降水变化及人类活动对佳芦河流域径流量的影响率分别为 19% 和 81%,进一步分析表 1 可以发现,不同时期人类活动对于径流减少的影响率有所不同,但整体上人类活动的影响率呈持续增长趋势。

结合佳芦河流域 1972 – 2010 年取用水量的分析(图 5),可知申家湾流域的取用水量总体呈现递增趋势,因此可以认为人类活动是引起佳芦河流域径流减少的主导因素,同时也很好地解释了人类活动对流域径流减少的影响持续增长。

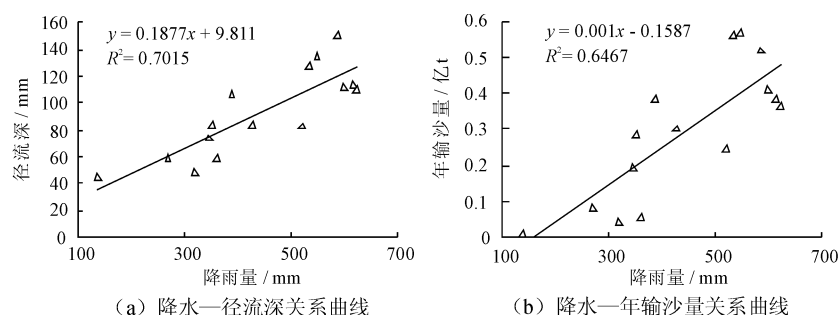


图4 佳芦河流域基准期降水与水沙关系曲线

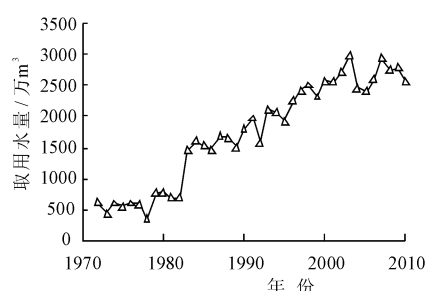


图5 佳芦河流域1972-2010年取用水量

孙天青等<sup>[20]</sup>曾分析秃尾河流域径流变化的潜在因素,发现在不考虑气温及蒸发影响的情况下,降水与人类活动在1956-1971年影响率为62.5%和37.5%,在1972-2005年影响率分别为21.8%和78.2%。与本文的结果相对比,可发现在人为活动干扰时期,两者的结果基本一致,即在20世纪70年代以后,人类活动在此时期对径流的影响处于主导地位。

表2中对泥沙的影响分析与径流结果相似,即佳芦河流域年输沙量的减少主要也是由于人类活动引起的,这与该流域大量实施水土保持措施有关。统计数据显示:从1997-2006年的10 a间,佳芦河流域水土保持措施数量逐年增加,其中梯(条)田、坝地、造林、种草和封禁治理分别增加了2 417、560、12 056、5 706和651 hm<sup>2</sup>,合计增加治理面积21 390 hm<sup>2</sup>。同时,1997-2008年间该流域还新增骨干坝7座,中型坝20座<sup>[21]</sup>,这些水土保持措施在其影响期均产生了巨大的拦沙效益,成为佳芦河泥沙量变化的重要因素。此外,本文认为佳芦河河川径流的减少,也是河道输沙量骤减的重要原因之一。

## 5 结 语

(1)佳芦河流域的降水整体上变化不明显,但是年径流量及年输沙量在1957-2010年均呈现显著地减少趋势。有序聚类分析法的判别结果显示,实测径流和年输沙量均在1972年发生突变。

(2)利用水文分析法量化了佳芦河流域水沙对降水变化及人类活动的响应。降水变化及人类活动对流域径流的影响率分别为19%和81%,对输沙量的影响率分别为32.77%和67.23%,各个阶段降水及人类活动对于佳芦河流域水沙的影响率有所不同,但总体来说,人类活动是引起佳芦河流域水沙变化的主要因素,并且呈现持续增长趋势。可以认为,在当前气候不发生剧烈改变的前提下,人类活动的

持续加强可能会导致佳芦河流域径流及输沙量的持续减少。

(3)人类活动的归因分析认为,佳芦河径流的减少主要是受到区域取用水量增加的影响,而输沙量的变化则受到水土保持措施和径流挟沙能力减少的双重影响。

本次研究中虽然定量分析了佳芦河流域水沙变化对降水及人类活动的响应,但并没有定量考虑其他因素的影响率,如气温、蒸发量以及流域土地利用的变化等,如何尽可能准确地区分上述因素对流域水沙的影响并将其定量化将是今后研究工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [2] 夏军,孙雪涛,谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2003,18(1):58-67.
- [3] Wang G Q, Zhang J Y, Xuan Y Q, et al. Simulating the impact of climate change on runoff in a typical river catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013,14(5):1553-1561.
- [4] Wang G Q, Yan X L, Zhang J Y, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950-2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013,4(3):252-264.
- [5] Wang G Q, Zhang J Y, Pagano T C, et al. Identifying contributions of climate change and human activity to changes in runoff using epoch detection and hydrologic simulation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013,18(11):1385-1392.
- [6] 邵肇悦,管仪庆,张丹蓉,等. 秃尾河1967-2007年径流变化特性分析[J]. 人民黄河,2013,35(5):18-20+24.
- [7] 郭巧玲,陈新华,刘培旺,等. 窟野河流域径流变化及人类活动对其的影响率[J]. 水土保持通报,2014,34(4):110-113+117.

- [8] 姚文艺,冉大川,陈江南,等. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [9] 何旭强,张勃,孙力伟,等. 气候变化和人类活动对黑河上中游径流量变化的贡献率[J]. 生态学杂志,2012,31(11):2884-2890.
- [10] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565.
- [11] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等. 应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响[J]. 地球科学进展,2008,23(4):382-389.
- [12] 裴益轩,郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报,2001(1):21-23.
- [13] 王文圣,丁晶,金菊良. 随机水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [14] Bazargan-Lari M R, Kerachian R, Afshar H, et al. Developing an optimal valve closing rule curve for real-time pressure control in pipes[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013,27(1):215-225.
- [15] 王金花,张胜利,孙伟营,等. 皇甫川流域近期水土保持措施减沙效益分析[J]. 中国水土保持,2011(3):57-60.
- [16] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Yoshiki S, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4):331-354.
- [17] 赵广举,穆兴民,温仲明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013,11(4):1-8.
- [18] 姚允龙,吕宪国,王蕾,等. 气候变化对挠力河径流量的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2009,21(6):153-159.
- [19] 杨强,覃志豪,王涛,等. 榆林地区1970-2010年气候因子变化特征分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):695-707.
- [20] 孙天青,张鑫,梁学玉,等. 秃尾河径流特性及人类活动对径流的影响分析[J]. 人民长江,2010,41(8):47-50.
- [21] 姚文艺,徐建华,冉大川,等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.

(上接第150页)

- [5] 殷桂琴,张公社,刘志军,等. 树枝状注水管网布局优化设计方法研究[J]. 断块油气田, 2007, 13(5):58-60.
- [6] 姜建国,刘永青,刘梦楠,等. 类电磁机制算法研究与改进[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1):135-140.
- [7] Debels D, De Reyck B, Leus R, et al. A hybrid scatter search/electromagnetism meta-heuristic for project scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(2):638-653.
- [8] Wu Peitsang, Yang Wenhung, Wei Naichief. An electromagnetism algorithm of neural network analysis: an application to textile retail operation[J]. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2004, 21(1):59-67.
- [9] Tsou Ching-Shih, Kao Chia-Hung. An electromagnetism-like meta-heuristic for multi-objective optimization [C]// Evolutionary Computation, IEEE Congress, 2006.
- [10] 魏巍. 类电磁机制的全局优化算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [11] 袁琨. 基于类电磁机制的神经网络训练算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [12] 武晓勇. 基于改进蚁群算法的油田注水管网规划设计研究[D]. 大庆:东北石油大学,2011.
- [13] Birbil S I, Fang S C. An electromagnetism-like mechanism for global optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2003, 25(3):263-282.
- [14] Birbil S I. Stochastic Global Optimization Techniques [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2002.