

doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2013.06.001
张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究 [J]. 气候变化研究进展, 2013, 9 (6): 391-397



气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究

张利平¹, 于松延^{1,2}, 段尧彬¹, 闪丽洁¹, 陈心池¹, 徐宗学²

1 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
2 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

摘 要: 以永定河流域为研究对象, 在对永定河流域 1957—2010 年降水、实际蒸发和气温实测资料进行趋势分析的基础上, 建立 SWAT 模型, 验证了还原径流的必要性, 对气候变化和人类活动对永定河流域径流的影响进行了定量研究。结果表明: 20 世纪 60、70 年代为永定河流域的丰水期, 80 年代至今为枯水期。永定河流域 80 年代后的实测径流资料受气候变化和人类活动影响显著, 需进行径流还原后才能保证径流资料的一致性。气候变化是 80 年代后期径流减少的主要原因, 其贡献量约占总减少量的 65.4%, 人类活动的贡献量占 34.6%, 也是不容忽视的因素。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流量; 定量研究

引 言

随着全球气候变化和人类活动影响的加剧, 水资源短缺已成为世界性问题, 也是当前人类面临的重要挑战之一^[1]。气候变化通过气温、降水、蒸发等因素的改变影响陆地水文循环系统, 从而影响水文过程。而人类活动对水文过程的影响, 主要是通过土地利用、水土保持、水利工程等方式改变流域下垫面, 使产汇流机制发生变化。因此开展气候变化和人类活动对水文过程影响的研究, 对变化环境下的水资源规划管理与应用, 具有十分重要的科学意义和应用价值。如何区分气候变化与人类活动对径流变化的贡献率, 是研究其影响的核心问题^[2]。

在气候变化和人类活动对流域径流影响方面,

国内外的专家做了大量的研究, 如姚文艺等^[3]采用分布式水文模型对气候变化情景下的黄河流域径流变化情势进行了研究。Pikounis 等^[4]利用 SWAT 模型研究不同土地利用 / 覆盖变化对水文过程的影响。Barlage 等^[5]应用气象模型对气候变化与土地利用变化对于流域降雨与径流的影响进行了分析, 并对未来气候与土地利用变化情景下的径流进行了模拟。Yang 等^[6]通过分析 Ob 河流域气候变化和人类活动作用下水文要素的变化规律, 揭示了人类活动包括工农业用水以及水库调控比气候变化对该流域径流的影响更大。Seguis 等^[7]采用分布式水文模型对同时期下垫面条件及气候条件下的年径流变化趋势进行了研究, 结果表明土地利用变化对径流的影响比干燥气候环境的影响更大。但是目前的研究偏重于气

收稿日期: 2013-02-28; 修回日期: 2013-06-15
资助项目: 国家自然科学基金(51279139); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(2010CB428406)
作者简介: 张利平, 男, 教授, 主要从事气候变化与水文模拟研究, zhanglp@whu.edu.cn

候变化和人类活动对径流的综合影响,而对区分两种驱动因素对水文过程影响的研究目前处于方法探索阶段^[2]。江善虎等^[8]依据径流对降水及潜在蒸发的敏感性,定量分析了我国老哈河流域气候变化和人类活动对径流的影响,结果表明不同时期气候变化和人类活动对该流域径流的影响有所差异。胡珊珊等^[9]采用气候弹性系数和水文模拟方法定量分析了白洋淀上游水源区唐河流域气候变化和人类活动对径流的影响,表明人类活动对径流的影响起主导作用,占 60%~62%。

本文尝试采用流域水文模型和径流还原相结合的方法甄别气候变化和人类活动的影响,实现新方法探索。以永定河流域为研究对象,基于水量平衡法进行了流域的径流还原,并通过建立的 SWAT 分布式水文模型验证还原得到的天然径流的可靠性,在此基础上识别出气候变化和人类活动对该流域径流影响的贡献。

1 资料与方法

1.1 研究流域概况

永定河(112°~117°45'E, 39°~41°20'N)是海河的七大水系之一(图 1),全长 747 km,流域面积 47016 km²。该区地处干旱和湿润气候的过渡地带,属中纬度大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥。流域多年平均降水不足 450 mm,且径流量年内分配很不均匀,80%左右集中在汛期。流域内人口增长和经济发展迅速,对水资源的需求量增加很快,该流域

是我国水资源缺乏最为严重的地区之一^[10]。同时,该流域水资源系统适应自然变化的能力很低,是我国水资源系统最脆弱的地区之一,因此永定河流域水文循环过程对气候变化和人类活动的响应研究具有重要的现实意义。

1.2 数据资料

(1) 站点观测数据:包括永定河流域的 6 个气象站点 1957—2010 年的逐日气象要素数据,以及 32 个雨量站 1957—2010 年的逐日降水量数据。站点分布见图 1。实际蒸发量通过 FAO 彭曼蒙特斯公式计算得到。

(2) 流域数字化资料:DEM 高程数据由美国地质调查局(USGS)提供的 GTOPO30 获得,再重采样到 500 m×500 m 的空间分辨率。土壤空间分布资料来源于中国科学院地理科学与资源研究所土壤数据库,并按照中国资源与环境数据库中土地资源与环境大类下土壤小类进行描述。土地利用空间分布资料来源于国家测绘总局提供的国家土地覆盖分幅 TIF 图,并参照 SWAT 模型自带的美国土地利用参数库,将其分为 12 类。

(3) 研究流域的经济、社会资料:通过查阅永定河流域朔州市、张家口市和大同市年鉴^[11-15]的方法,获取了研究流域人口、有效灌溉面积、工业总产值、城镇居民人均用水量、灌水定额以及万元工业产值耗水量等方面的大量翔实可靠数据。

1.3 径流还原计算方法

进行径流还原计算采用水量平衡法。水量平衡法是基于流域内总水量不变而得到的一种径流还原的计算方法,公式^[16]如下:

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{农业}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{城镇生活}} + W_{\text{引水}} + W_{\text{分洪}} + W_{\text{库蓄}}, \quad (1)$$

式中: $W_{\text{天然}}$ 为还原后的天然径流量, 10⁴ m³; $W_{\text{实测}}$ 为水文站实测径流量; $W_{\text{农业}}$ 为农业灌溉耗损量; $W_{\text{工业}}$ 为工业用水耗损量; $W_{\text{城镇生活}}$ 为城镇生活用水耗损量; $W_{\text{引水}}$ 为跨流域(或跨区间)引水量,引出为正,引入为负; $W_{\text{分洪}}$ 为河道分洪决口水量,分出为正,分入为负; $W_{\text{库蓄}}$ 为大中型水库蓄水变量,增加为正,减

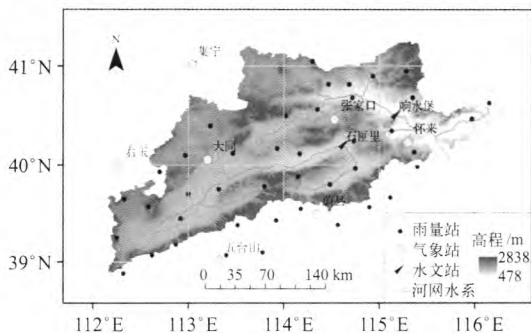


图 1 永定河流域测点分布

Fig. 1 Distribution of the gauge stations in the Yongding River basin

少为负。

考虑到农业用水、工业用水和生活用水是永定河流域水资源的主要利用途径, 故本文还原项主要考虑农业灌溉耗损量、工业用水耗损量和城镇生活用水耗损量3项。

1.4 SWAT 模型与参数率定

SWAT模型由美国农业部农业服务中心于20世纪90年代初期研制开发, 目前已被国内外学者广泛应用于流域水文过程模拟, 以及流域对不同的气候变化、土地利用变化的水文响应, 评价人类活动等对流域的生态环境影响^[17-18]。

SWAT模型参数众多, 可分为两类: 第一类可根据参数的物理意义直接标定, 如土壤物理属性参数、土地利用/植被覆被属性参数的取值, 主要利用SWAT模型自带的数据库中的参数值确定; 第二类参数主要是流量参数的率定, 率定的参数分别有GW_Delay (地下径流延迟期)、Alpha_BF (基流消退系数)、ESCO (土壤蒸发补偿系数)、SLOPE (平均斜率)、CN2 (地表径流曲线数)、GW_REVAP (地下水再蒸发系数)、GWQMN (浅层地下水径流系数)、REVAPMN (浅层地下水再蒸发系数)、RCHRG_DP (深蓄水层渗透系数)。考虑到SWAT模型结构的复杂性, 本文采用SCE-UA算法^[19]自动优选与手工优选相结合的方法优选第二类参数。

2 永定河流域水文气象要素变化情势

2.1 降水变化趋势

从永定河流域年降水量变化和5年滑动平均过程(图2a)可以看出, 永定河流域年降水量呈递减趋势, 达到了0.05显著性水平, 变化率为-0.82 mm/a。M-K检验结果表明, 不存在明显突变现象。从表1可以看出, 永定河流域20世纪60、70年代的年降水量高于多年平均, 年降水量距平百分率分别达到7.78%、3.07%, 说明20世纪60—70年代永定河流域为丰水期。20世纪80、90年代及21世纪初的年降水量距平百分率分别为-3.07%、-4.48%和-6.13%, 说明20世纪80年代到21世纪初永定河流

域处于枯水期。

2.2 气温变化趋势

从永定河流域年平均气温变化及其5年滑动平均过程(图2b)可以看出, 永定河流域年平均气温呈上升趋势, 达到了0.05显著性水平, 变化率约为0.052℃/a。M-K检验结果表明, 气温上升趋势的突变点发生在1991年。从表1可以看出, 永定河流域21世纪初平均气温相对较高, 增幅为1.4℃。20世纪60、70和80年代平均气温分别低于多年平均值0.8℃、0.5℃和0.3℃。

2.3 实际蒸发量变化趋势

从永定河流域年实际蒸发量变化及其5年滑动平均过程(图2c)可以看出, 永定河流域年实际蒸发量呈缓慢下降趋势, 达到了0.10显著性水平, 变

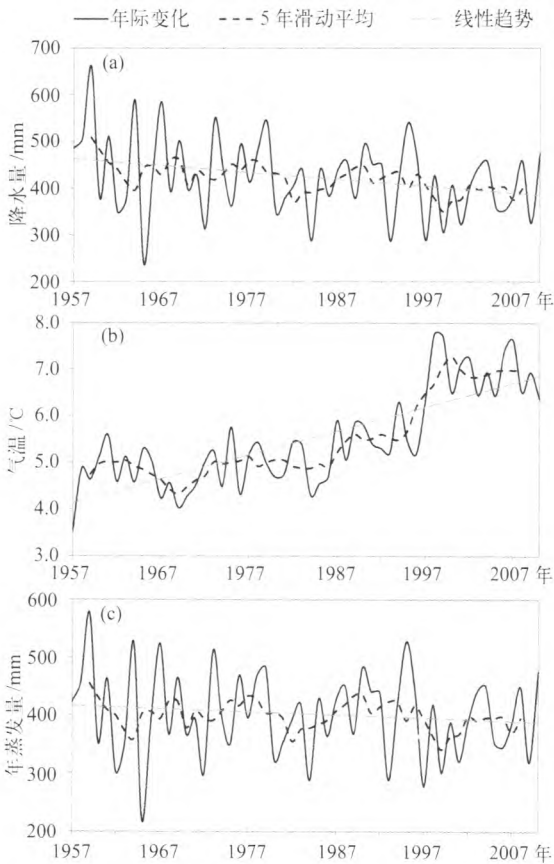


图2 永定河流域1957—2010年年降水量、平均气温及实际蒸发量变化

Fig. 2 Variations of annual precipitation (a), mean surface air temperature (b) and evaporation (c) in the Yongding River basin in 1957–2010

表 1 永定河流域 1957—2010 年年降水量、平均气温和实际蒸发量统计
Table 1 Statistics of annual precipitation, mean surface air temperature and evaporation
in the Yongding River basin in 1957–2010

| 年份 | 降水量 | | 气温 | | 蒸发量 | |
|-----------|--------|---------|-------|------|--------|---------|
| | 年均值/mm | 距平百分率/% | 年均值/℃ | 距平/℃ | 年均值/mm | 距平百分率/% |
| 1957—2010 | 424 | | 5.5 | | 401 | |
| 1957—1970 | 457 | 7.78 | 4.7 | −0.8 | 413 | 2.9 |
| 1971—1980 | 437 | 3.07 | 5.0 | −0.5 | 409 | 2.0 |
| 1981—1990 | 411 | −3.07 | 5.2 | −0.3 | 396 | −1.3 |
| 1991—2000 | 405 | −4.48 | 6.1 | 0.6 | 393 | −2.0 |
| 2001—2010 | 398 | −6.13 | 6.9 | 1.4 | 392 | −2.2 |

化率约为−0.55 mm/a。而由于气温的升高，流域潜在蒸散发呈增加的趋势，这可能与干旱区存在蒸发互补关系及实际蒸散发和潜在蒸散发呈相反的变化趋势有关。从表 1 可以看出，永定河流域年实际蒸发量在 20 世纪 60、70 年代分别比多年平均偏高 2.9%、2.0%，20 世纪 80、90 年代及 21 世纪初年平均实际蒸发量分别较多年平均偏低 1.3%、2.0% 和 2.2%。这与流域的降水量年代变化特征基本一致。

资料显示：20 世纪 70 年代末，永定河流域随着工农业生产和人口的快速增长，水资源供需矛盾日趋突出，为保证平原区农业生产和工业发展，流域内开始了大规模的水利建设，改变了天然河道和下垫面，影响了水文循环和水资源的形成过程^[16]。由于永定河流域径流资料的年限为 1957—2000 年，据此将数据序列分为两部分：1957—1976 年为基准期，也为模型的参数率定期；1980—2000 年为人影响

期，也为模型的检验期。需要说明的是，研究区域 1977—1979 年水文站点径流数据缺失，故不在本次研究范围内。

3 SWAT 模型在永定河流域的径流模拟

本文采用 Nash-Sutcliffe 效率系数（简称 Nash 效率系数）、相关系数和相对误差 3 个指标评价模型在研究区的适用性。Nash 效率系数越大，相关系数越高，表明模拟效果越好。通常取 Nash > 0.5 作为径流模拟效果的评价标准^[20]。

3.1 径流还原前模拟结果

模型参数率定期（1957—1976 年）和检验期（1980—2000 年）模拟评价结果如图 3、图 4 和表 2 所示，可以看到，永定河流域月尺度径流率定期

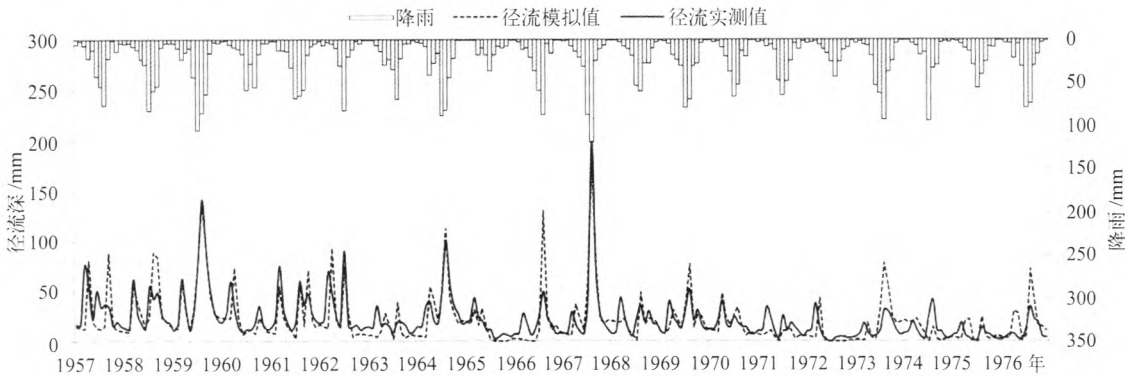


图 3 永定河流域 1957—1976 年率定期月径流量模拟结果
Fig. 3 Simulation result of monthly runoff for the calibration period (1957–1976) in the Yongding River basin

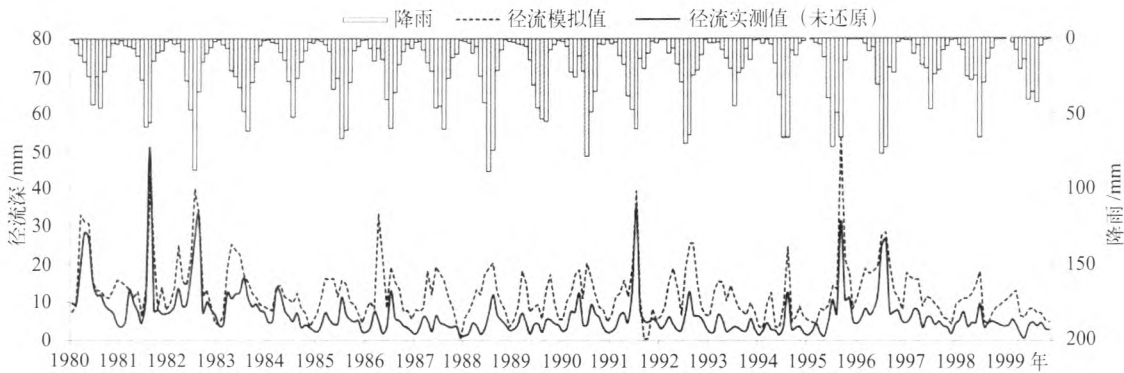


图4 永定河流域 1980—2000 年径流还原前检验期模拟结果

Fig. 4 Simulation result of monthly runoff without restoration for the validation period (1980–2000) in the Yongding River basin

| 表 2 永定河流域模型率定期和检验期径流评价 | | | |
|---|------|---------|------|
| Table 2 Assessment of the runoff for the calibration and validation periods in the Yongding River basin | | | |
| 时间 | 效率系数 | 相对误差 /% | 相关系数 |
| 率定期 | 0.68 | 4 | 0.79 |
| 检验期 (径流还原前) | 0.10 | 49 | 0.35 |
| 检验期 (径流还原后) | 0.73 | 3 | 0.81 |

Nash效率系数达到0.68, 相对误差仅为4%, 相关系数为0.79, 说明永定河流域1957—1976年受人类活动影响相对较小; 检验期Nash效率系数仅为0.10, 相对误差达49%, 相关系数为0.35。分析原因, 可能是由于在20世纪80年代后大规模人类活动影响了流域土地利用和植被类型, 一定程度上改变了流域下垫面, 致使其降雨径流关系发生改变, 因而检验期模拟效果较差。

3.2 径流还原后模型检验结果

根据上述结果, 本文基于水量平衡法进行了永

定河流域的径流还原计算, 并用于SWAT模型的检验, 径流还原后模型检验结果见图5和表2。与图4相比可以看出, 经过径流还原后模型的检验结果得到明显改善, Nash效率系数提高到0.73, 相对误差减少到3%, 相关系数提高到0.81, 由此可以进一步说明永定河流域在20世纪80年代后径流受到了人类活动的明显影响。

4 径流量影响因子的定量识别

假定人类活动和气候变化是影响径流变化的两个相互独立的因子^[2], 以流域基准期的实测径流量作为基准值, 则人类活动影响时期的实测径流量与基准值之间的差值包括两部分: 其一为人类活动影响部分, 该部分可以由人类活动影响期间还原的天然径流量与相应时期的实测径流量计算得到; 其二为气候变化影响部分, 该部分为人类活动影响期间还原的天然径流量与基准值之间的差值^[21], 据此, 分离评估气候变化和人类活动对永定河流域径流的

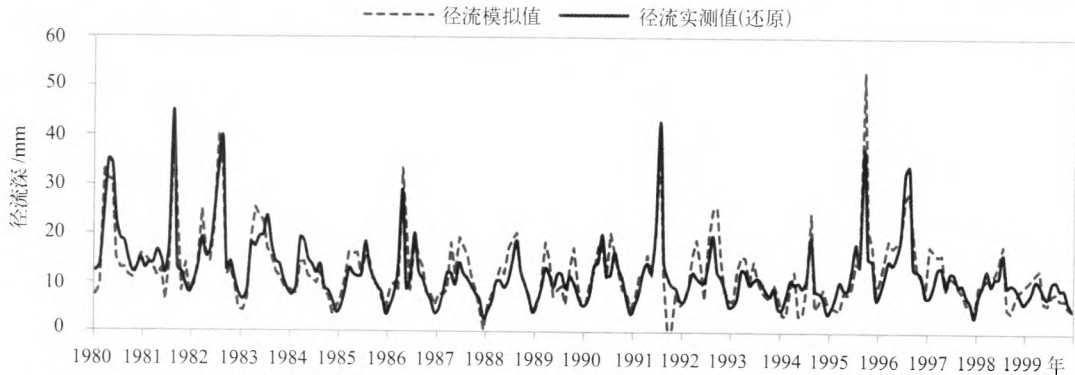


图5 永定河流域 1980—2000 年径流量还原后检验期模拟结果

Fig. 5 Simulation result of monthly runoff with restoration for the validation period (1980–2000) in the Yongding River basin

影响。文中将1957—1976年作为流域基准期,1980—2000年为人类活动影响期。气候变化和人类活动对永定河流域径流影响的定量计算结果如表3所示,永定河流域1980—2000年气候变化对径流的

影响占主导地位,占65.4%;其次是人类活动对径流的影响,占34.6%。因此气候变化是近几十年来永定河流域径流减少的主要因素,人类活动对永定河流域径流的影响也不容忽视。

表3 气候变化和人类活动对永定河流域径流影响的定量评估
Table 3 Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on the runoff in the Yongding River basin

| 起止年份 | 实测径流深 / mm | 天然径流深 / mm | 总减少量 / mm | 气候因素 | | 人类活动 | |
|-----------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | 影响量 / mm | 影响比重 / % | 影响量 / mm | 影响比重 / % |
| 1957—1976 | 22.13 | 22.13 | | | | | |
| 1980—1990 | 7.47 | 12.87 | 14.66 | 9.26 | 63.2 | 5.40 | 36.8 |
| 1990—2000 | 5.50 | 10.88 | 16.63 | 11.25 | 67.6 | 5.38 | 32.4 |
| 1980—2000 | 6.49 | 11.88 | 15.64 | 10.25 | 65.4 | 5.39 | 34.6 |

5 结 论 与 讨 论

随着气候变化和人类活动对水文要素影响范围的扩大、影响程度的加强,以及社会经济发展对水资源依赖程度的日益增大,水文要素对气候变化和人类活动两种主要驱动因素的响应机制成为当前研究的热点。本文在分析永定河流域水文气象要素变化特征的基础上,利用SWAT分布式水文模型验证了经过还原后的径流资料的适用性,并进一步定量识别气候变化和人类活动对流域径流的影响程度,得到以下结论:

(1) 永定河流域20世纪60、70年代为丰水期,80年代至今为枯水期。20世纪60年代之后气温呈上升趋势,年降水量表现出递减趋势,同时实际蒸发量也呈现出减小趋势,其原因可能与降水量在20世纪80年代后期减少率较大有关。

(2) 1980—2000年气候变化对永定河流域径流的影响量约占径流减少量的65.4%,是该流域径流变化的主要因素,人类活动对径流的影响占34.6%,这与江善虎等^[8]、胡珊珊等^[9]在其他流域的结果不尽相同,这可能是由不同流域人类活动影响不同造成的,且与经济开发程度密切相关。

本文应用分布式水文模型与径流还原的方法分离了气候变化和人类活动对永定河流域径流的影响,但仍然存在不足之处,如SWAT模型的参数较多和

结构的复杂性及不确定性影响了径流的准确模拟。此外,永定河流域受人类活动干扰强烈,在利用SWAT模型进行模拟时未考虑人类活动的影响,从而给气候变化和人类活动影响的分离带来误差。■

参 考 文 献

[1] 张利平,陈小凤,胡志芳. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2008, 27 (3): 60-67
[2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23 (2): 278-285
[3] 姚文艺,徐宗学,王云璋. 气候变化背景下黄河流域径流变化情势分析[J]. 气象与环境科学, 2009 (2): 1-6
[4] Pikounis M, Varanou E, Baltas E, et al. Application of the SWAT model in the Pinios River basin under different land-use scenarios [J]. Global Nest: The Int J, 2003, 5 (2): 71-79
[5] Barlage M J, Richards P L, Sousounis P J, et al. Impacts of climate change and land use change on runoff from a Great Lakes watershed [J]. Journal of Great Lakes Research, 2002, 28 (4): 568-582
[6] Yang D Q, Ye B S, Shiklomanov A. Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5 (4): 595-610
[7] Seguis L, Cappelaere B, Milesi G, et al. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment [J]. Hydrological Processes, 2004, 18 (17): 3401-3413
[8] 江善虎,任立良,雍斌,等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护, 2010 (6): 1-4
[9] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012 (1): 62-70

[10] 付意成,阮本清,许凤冉,等.永定河流域水生态补偿标准研究[J].水利学报,2012,43(6):740-748

[11] 朔州市统计局,国家统计局朔州调查队.朔州年鉴(2003)[M].北京:中国统计出版社,2003

[12] 张家口市人民政府.张家口经济年鉴(1994)[M].北京:中国统计出版社,1994

[13] 张家口市人民政府.张家口经济年鉴(1995—2000)[M].北京:中国统计出版社,2001

[14] 大同市统计局,国家统计局大同调查队.大同统计年鉴(2002)[M].北京:中国统计出版社,2002

[15] 大同市统计局,国家统计局大同调查队.大同统计年鉴(2008)[M].北京:中国统计出版社,2008

[16] 魏茹生.径流还原计算技术方法及其应用研究[D].西安理工大学,2009

[17] Zhang L P, Qin L L, Yang Z. Climate change impacts on hydrological processes in the water source area of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Water International, 2012, 37 (5): 564-584

[18] 张利平,曾思栋,夏军.漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应研究[J].自然资源学报,2011,26(7):1217-1226

[19] 白薇,刘国强,董一威,等.SWAT模型参数自动率定的改进与应用[J].中国农业气象,2009(增刊2):271-275

[20] 王巧平,王成建.海河流域人类活动对径流的影响分析[J].海河水利,2009,28(1):4-6

[21] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展,2006,17(6):853-858

Quantitative Assessment of the Effects of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Yongding River Basin

Zhang Liping¹, Yu Songyan^{1,2}, Duan Yaobin¹, Shan Lijie¹, Chen Xinch¹, Xu Zongxue²

1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: As climate change and human activities have had a profound and lasting impact on the hydrologic progresses, it is urgent to assess and separate the responses of runoff to the two driving factors. In this study, the variations of precipitation, evaporation and temperature in the Yongding River basin were examined for over five decades in 1957–2010. The results show that it is a wet period during the 1960s and 1970s but a dry period since 1980s. Climate change and human activities have significant influences on the runoff in this basin. The SWAT hydrological model was established to confirm the need of runoff restoration for the following research. With regard to the runoff quantitative responses to climate change and human activities, climate change is the dominant influence factor with a contribution of 65.4%. However, as the value of observed stream flow is almost equal to that caused by human activities, the driving factor of human activities cannot be neglected in future study.

Key words: climate change; human activities; runoff; quantitative assessment