

Research on Streamflow Responses to Land Use Change and Climate Variability in Xunhe Catchment*

Yisheng Liu, Lihua Xiong

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: liuyisheng@whu.edu.cn

Received: Feb. 23rd, 2013; revised: Mar. 9th, 2013; accepted: Mar. 24th, 2013

Copyright © 2013 Yisheng Liu, Lihua Xiong. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The research on hydrological responses to land use change and climate variability is a significant topic in hydrology and water resource researches. With the precipitation data, land-use data etc. of the Xunhe catchment in the year 1980-1990, a DEM-based distributed hydrological model was applied to simulate the rainfall-runoff processes in the study period and to calculate the contribution of land use change and climate variability to the change of streamflow. The conclusion can be drawn that the land use change of the Xunhe catchment as well as its impact is small during the period of 1980-1990, and the climate variability is the main cause of the decrease of the streamflow.

Keywords: Climate Change; Land-Use and Land-Cover Change; Xunhe River; Runoff; Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

气候与土地利用变化对旬河流域径流的影响研究*

刘移胜, 熊立华

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: liuyisheng@whu.edu.cn

收稿日期: 2013年2月23日; 修回日期: 2013年3月9日; 录用日期: 2013年3月24日

摘要: 气候与土地利用变化的水文响应研究是水文水资源领域的一个重要研究课题。本文利用旬河流域 1980~1990 年的降雨、土地利用等数据资料, 采用基于 DEM 的分布式流域水文模型来模拟该时段的径流过程, 并计算气候变化和土地利用变化对径流量变化的贡献率。结果表明: 1980~1990 年间旬河流域土地利用变化很小, 导致径流量减少的主要因素是气候变化。

关键词: 气候变化; 土地利用/土地覆被变化; 旬河; 径流; GLUE

1. 引言

气候变化是二十一世纪世界最重大的环境问题之一, 其中气候变化对水文水资源的影响研究是水问

题研究领域的一个重要课题。同时, 随着经济社会的迅速发展, 人类活动对环境尤其是水文环境的影响的范围和程度也在逐渐加大, 其中一个重要的表现形式就是土地利用的变化。研究气候变化和土地利用/土地覆被变化对区域水资源、水文环境、水旱灾害的影响将会为地区经济建设和社会可持续发展规划、决策提供有效的技术支持^[1]。

*基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190094)和国家自然科学基金(51079098)资助。

作者简介: 熊立华(1972-), 男, 武汉大学教授, 博导, 主要从事水文水资源研究。

气候变化对水文水资源的影响主要是通过气候变化所引起的流域气温、降雨、蒸发等的变化来预测径流可能变化的增减趋势及对其流域供水影响^[2]。土地利用变化的水文效应主要是人类活动如城镇建设、水利工程、森林采伐等导致下垫面条件改变而引起的水文要素的时空变化^[3]。这两大因素是径流变化的主要因素,但各自独立的水文效应则难以分离^[4]。评估环境变化的水文效应的主要研究方法有三种^[5]:流域对比试验法、统计分析方法、水文模型模拟方法。流域对比试验法缺少严格的方法来界定所选流域特别是大中尺度流域的地质地貌土壤条件是否相同或相似^[6];统计分析方法只能对流域水文响应变化结果进行整体综合描述,而很难对研究流域内土地利用变化的产流结果进行分布式描述^[7];而水文模型尤其是分布式水文模型能够很好地反映流域内各要素的变化对径流变化的影响^[8]。本文采用熊立华^[9]等提出的基于DEM的分布式水文模型,以旬河流域为研究对象,来模拟计算这两种因素对径流量变化的贡献率。该模型物理过程明确,参数较少,模型率定校核相对容易。万民^[10]将此模型应用于珠江飞来峡流域,模拟径流过程效果良好,表明该模型能够较好的应用于大中型流域。

2. 研究区域与数据处理

2.1. 区域简介

旬河发源于秦岭主脊南侧,向东南流经旬阳县注入汉江,全长218 km,是汉江的较大支流之一。流域范围大致在北纬 $32^{\circ}24'$ ~ $33^{\circ}94'$ 和东经 $108^{\circ}26'$ ~ $109^{\circ}36'$ 之间,流域面积6000多平方千米。流域全部为山区,岭多坡陡,海拔高度从357 m到2836 m,地表起伏较大。流域在植被分区上属森林区范围,自然景观呈明显的山地和垂直分异特征,分为中低山典型落叶阔叶林带、中山落叶阔叶小叶林带及亚高山针叶林带三个带。由于长期的人类活动,致使流域内出现大量的次生灌丛植被,与森林和草甸等植被类型在垂直带内呈镶嵌分布。旬河流域的气候表现为雨热同季,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温在 7.8°C ~ 15.4°C 之间,年平均极端最高气温 27.7°C ,极端最低气温 3.1°C ,年平均降水量约为777.1~933.4 mm。

2.2. 数据处理

模型采用1 km精度的DEM高程数据

(<ftp://ftp.glc.f.umiacs.umd.edu/glc/SRTM/GTOPO/>)。土地利用资料为来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的1980年和1990年的土地利用数据。

利用Arcgis软件对DEM数字高程数据进行包括填洼、生成流向、集水面积、提取河网水系、确定流域边界等一系列操作。为了检验提取的旬河流域水系的正确性,将提取的水系与国家基础地理信息系统提供的水系进行比较,如图1。结果显示,考虑到精度因素,提取的水系与国家基础地理信息系统提供的水系基本吻合。

土地利用类型分类采用土地分类系统中的一级类型,即分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地六大类。表1所示为旬河流域1980~1990年土地利用类型、相应面积以及面积变化值等,具体分布情况如图2所示。可以看出,旬河流域1980~1990年间主要的土地利用类型为耕地、林地和草地这三大类,1990年较之1980年耕地面积有所减少,草地和建设用地面积有所增加,但是面积变化值都不大。由图3可以看出,林地主要集中在流域北部海拔较高的地区,这一地区山高坡陡,人烟稀少,人类活动程度

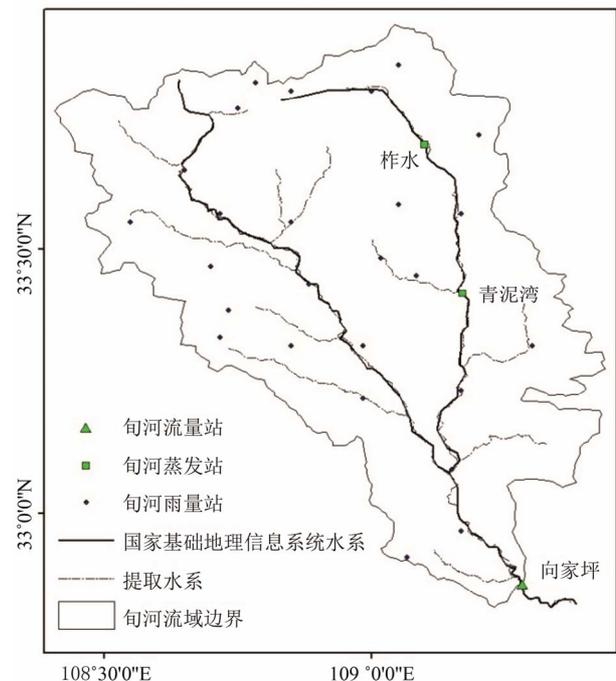


Figure 1. The river network, boundary and hydrological stations of Xunhe catchment

图1. 旬河流域水系、边界及水文站点

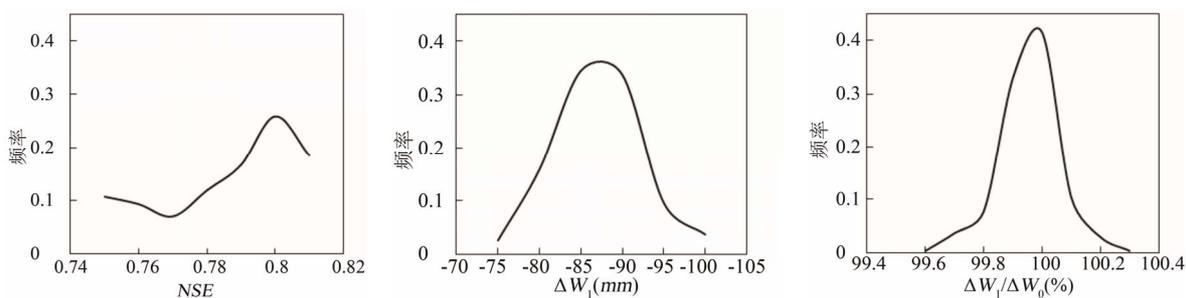


Figure 2. The distribution of NSE , ΔW_1 and $\Delta W_1/\Delta W_0$.

图 2. NSE 、 ΔW_1 以及 $\Delta W_1/\Delta W_0$ 的分布情况

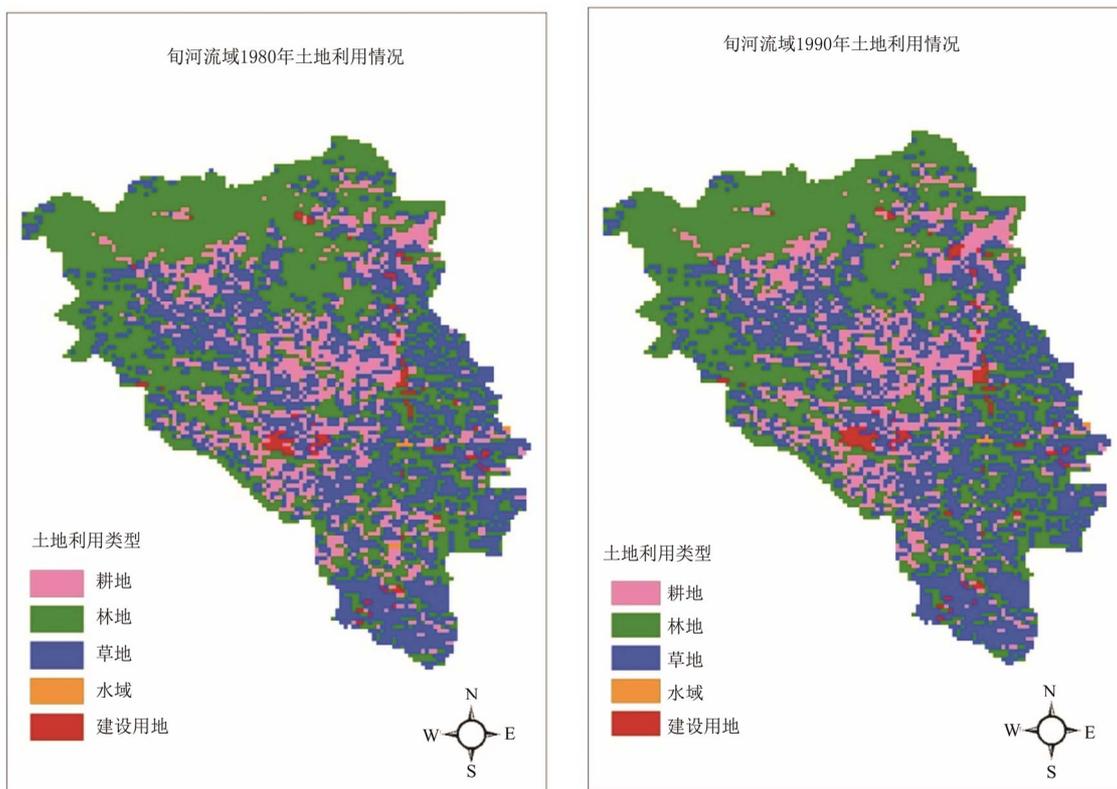


Figure 3. The land use distribution of Xunhe catchment in the year 1980 and 1990

图 3. 旬河流域 1980 年及 1990 年土地利用分布图

低, 植被保护良好。中部及南部地区则为耕地、林地及草地的镶嵌体, 这里林地也以次生林、次生灌丛为主。

旬河流域 1980~1990 年间各年的降雨、径流量情况如表 2 所示, 由表中可得旬河流域在此期间的降雨、径流的年际变化较大。

3. 研究方法

3.1. 基于 DEM 的分布式流域水文模型概化

熊立华^[9]等在 2004 年提出了一个基于 DEM 的分

布式流域水文模型。该模型假定流域产流机制为蓄满产流, 降雨 P 落在地表后会直接进入地下土壤, 而没有被植被截留。在每一个 DEM 栅格上假设有三种不同的蓄水单元: 地下土壤、地表和河道。

地下土壤的蓄水能力用 S_{mc} 表示, 实际蓄水量用 S 表示。与土壤蓄水量有关的物理过程包括蒸散发 ET , 地下水入流 QS_{in} 以及地下水出流 QS_{out} 。其中地下水入流 QS_{in} 是比当前栅格高程更高的各个相邻栅格的地下水出流之和。

当某一栅格地下水入流量超过其实际缺水量时,

Table 1. The land use of Xunhe catchment in the year 1980 and 1990
表 1. 旬河流域 1980 年、1990 年土地利用情况表

土地类型	土地利用形态	面积 (km ²)		面积变化值	变化值占流域面积比值
		1980 年	1990 年		
耕地	以种植农作物为主的土地。	1117.5	1083.2	-34.3	0.54%
林地	包括针叶林、阔叶林、混交林、灌丛等。	2989.3	2983.3	-6	0.09%
草地	以草本植物为主, 包括灌丛草地、疏林草地等。	2147.7	2173.8	26.1	0.41%
水体	天然陆地水域或水利设施。	7.5	5.2	-2.3	0.04%
建设用地	被建筑物覆盖的区域, 包括城乡居民点等。	91.1	107.5	16.4	0.26%

Table 2. The rainfall-runoff of Xunhe catchment each year during 1980 and 1990
表 2. 旬河流域 1980~1990 年各年降雨、径流量表

年份	年降雨量/mm	年平均径流/m ³ /s	径流深/mm	径流系数
1980 年	793	51	265	0.33
1981 年	908	76	393	0.43
1982 年	746	57	295	0.39
1983 年	1264	155	802	0.63
1984 年	1124	121	630	0.56
1985 年	830	67	348	0.42
1986 年	683	37	194	0.28
1987 年	1005	90	466	0.46
1988 年	909	80	415	0.46
1989 年	849	71	370	0.43
1990 年	753	66	344	0.46
平均	896	79	411	0.46

多余的水量就会冒出地面形成浅层地表水 S_p , 浅层地表水在重力作用下形成坡面流 Q_p , 从而汇入河道。

对于栅格单元上的每段河道, 其水文属性用上下游断面处的流量来描述, 分别记为 Q_{in} 和 Q_{out} 。同 QS_{in} 相似, Q_{in} 也是各个相邻高程更高的栅格的河道出流量之和。 Q_{out} 的计算运用马斯京根河道流量演算法。

该模型共有 6 个参数, 分别为: 反映地下水水流特性的时间常数 TS 、反映地表水水流特性的时间常数 TP 、表示全流域蓄水能力变化幅度的参数 SM 、指数 n 以及马斯京根河道流量演算中的两个参数 c_1 和 c_2 。该模型可以模拟径流过程以及流域内土壤蓄水量的空间分布情况。

3.2. 考虑土地利用因素时的模型改进

从上述模型概化可以看出, 该模型物理过程明确, 结构简单, 且参数较少, 模型的率定和校核相对容易。该模型没有涵盖土地利用模块, 但是为了研究土地利用/覆被变化的水文效应, 需要考虑到土地利用在径流形成时的作用。张晓明^[11]等人分析了黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域土地利用/覆被变化的径流调节效应, 结果表明土地利用/覆被变化对径流有显著的调节作用。因此需要在该模型中添加土地利用模块。

在改进模型时主要考虑土地利用/覆被变化对土壤含水量的影响, 它实际上包括对截留和填洼的影响。栅格蓄水能力计算式如式(1):

$$S_{mc,i} = s_0 + \left[\frac{\ln(\alpha/\tan \beta)_i - \min_j \{\ln(\alpha/\tan \beta)_j\}}{\max_j \{\ln(\alpha/\tan \beta)_j\} - \min_j \{\ln(\alpha/\tan \beta)_j\}} \right]^n \cdot SM \quad (1)$$

不考虑土地利用情况时, SM 为一常数, 表示全流域栅格蓄水能力变化幅度一致。考虑土地利用/覆被变化时, SM 将因不同的土地利用类型而有所差异。具体形式用下式表达:

$$SM_i = a_i \cdot SM_0 \quad (2)$$

式中, SM_0 为一常数, 通过率定得到; i 表征土地利用类型; SM_i 为对应于不同土地利用情况的栅格蓄水能力的变化幅度; a_i 为土地利用类型 i 所对应的系数。

旬河流域为山区, 经济社会发展相对落后, 城镇化水平低。采用土地分类系统的一级类型分类时, 水域、建设用地和未利用土地所占面积比重偏小, 变化也不大, 主要类型为耕地、林地和草地。因此基于式(2), 在模型中增加三个参数 a_1 、 a_2 、 a_3 , 分别对应耕地、林地和草地这三大类, 而其余的土地利用类型所对应的系数均取为 1。

3.3. 气候和土地利用变化对年径流量变化的贡献率

为了分离气候和土地利用变化对径流的影响, 本文采用控制变量法, 即先固定某一个因素, 来计算另一个因素的变化对径流变化的影响程度^[4]。由于掌握的旬河流域的径流资料历时比较短, 只有 1980~1990 年这 11 年, 无法用趋势分析的方法寻找突变点, 因此主观地将径流期分为基准期和变化期两个时期(简称前期和后期), 即以 1980~1985 年为基准期, 以 1986~1990 年为变化期。利用改进的模型对整个径流过程进行模拟, 通过模型率定得到模型在该区域该时段的最优参数。

分析气候变化影响时以基准期的土地利用数据、变化期的降雨数据来模拟变化期的径流过程; 分析土地利用变化影响时以基准期的降雨数据、变化期的土地利用数据来模拟变化期的径流过程。通过这种控制变量的方法得到相应的径流量变化:

$$\Delta W_0 = \text{mean}(W_{\text{后期模拟}}) - \text{mean}(W_{\text{前期模拟}}) \quad (3)$$

$$\Delta W_1 = \text{mean}(W_{\text{控制土地不变}}) - \text{mean}(W_{\text{前期模拟}}) \quad (4)$$

$$\Delta W_2 = \text{mean}(W_{\text{控制气候不变}}) - \text{mean}(W_{\text{前期模拟}}) \quad (5)$$

其中 ΔW_0 为两种因素变化共同作用下导致的基准期和变化期的径流量变化, ΔW_1 为因气候变化导致的径流量变化, ΔW_2 为因土地利用变化导致的径流量变化。将它们分别除以 ΔW_0 即可得到各个因素的变化对径流量变化的贡献率:

$$k_i = \frac{\Delta W_i}{\Delta W_0} \quad (6)$$

k_i 值表征了因素 i 的变化对径流量变化的贡献率。

3.4. 水文模型不确定性研究

2.3 中计算对径流量变化的贡献率时只考虑气候和土地利用变化这两个因素的作用而忽略误差的影响, 在理想的情况下 $\sum k_i = 1$ 。而实际上模型的结构误差、参数的冗余及相关性、数据的输入输出误差等因素都会对计算结果造成一定的影响, 从而会导致上式不成立。为此, 本文采用 *GLUE* 方法^[12,13]来评价模型的不确定性, 其主要思路如下: 选择似然函数并设定似然阈值; 在预先设定的参数分布取值区间内, 利用随机取样方法获得一定数量的有效参数组(即似然函数值大于似然阈值的参数组); 计算所求值的给定置信度下的置信区间。

4. 结果与分析

4.1. 模型率定与校核

以 1980~1985 年为模型的率定期, 以 1986~1990 年为模型的校核期。模型参数优选采用 *SCE-UA* 算法^[14], 目标函数选取应用普遍的纳希效率系数 *NSE*, 其形式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{io} - Q_{is})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{io} - \bar{Q}_{io})^2} \quad (7)$$

式中, Q_{io} 为实测流量值, Q_{is} 为模拟流量值, \bar{Q}_{io} 为实测流量均值, N 为时段的总数。NSE 的值越接近 1 说明模型模拟的效果越好。

4.2. 考虑不确定性的径流量变化归因分析

利用 *GLUE* 方法评价模型不确定性时, 似然函数

Table 3. The contribution of land use change and climate variability to the change of streamflow when considering the uncertainty of model
表 3. 考虑不确定性时的气候和土地利用变化对径流量变化贡献表

	模拟均值 ($\pm\sigma$)	基准期土地 基准期气候	基准期土地 变化期气候	变化期土地 基准期气候	变化期土地 变化期气候
年均径流深/mm		411.92(± 15.58)	322.48(± 17.85)	411.90(± 15.56)	322.47(± 17.83)
	实测值	456			358
变化量均值 ($\pm\sigma$)/mm			-89.44(± 5.20)	-0.02(± 0.07)	-89.45(± 5.19)
变化量所占百分比/%			100(± 0.1)	0	

选择纳希效率系数如式(7)所示, 似然阈值取为 0.75, 取样方法采用 *SCE-UA* 方法, 得到约 300 组有效参数组, 其模拟效果如图 2 所示。计算对应的模拟的年均径流深值以及模拟变化量值等, 并对各个系列求出均值、均方差以及特定置信度下的置信区间, 得到气候和土地利用变化对径流量变化的贡献情况如表 3 所示。以控制土地利用不变情况时的 ΔW_1 为例, 作出 ΔW_1 以及 $\Delta W_1/\Delta W_0$ 的分布图如图 2 所示。

由表 3 可得, 基准期和变化期的年均径流深的模拟值均比实测值要小, 但是变化趋势一致, 即均表现为径流深减少。在基准期土地、基准期气候情景下年均径流深模拟值为 411.92(± 15.58)mm, 在变化期土地、变化期气候情景下模拟值为 322.47(± 17.83)mm, 年均径流深总的变化情况为减少了 89.45(± 5.19)mm。其中由气候变化引起的年均径流深减少值为 89.44(± 5.20)mm, 占总变化值的百分比为 100(± 0.1)%, 其分布情况如图 2 所示。从图中可以看出, 由于考虑到模型的不确定性, 这两个值均存在着一个分布区间, 而图中有一部分超过 100%, 这是一种极不合理的现象。结合表 1 可以看出, 旬河流域 1990 年较之 1980 年, 其各种土地利用的面积变化值占全流域面积的比值均不超过 1%, 最大值也仅为 0.54%, 变化微小, 其水文效应势必不明显, 因此模型的误差或输入数据的误差的影响效应得以凸显, 从而导致了这一不合理现象。综上可以得出: 旬河流域 1980~1990 年间后期径流深较之前期减少的主要原因是气候变化, 土地利用变化对其径流深减少的贡献微小。

5. 结论

本文采用了熊立华等提出的基于 *DEM* 的分布式流域水文模型, 并在此基础上考虑土地利用对水文过程的作用, 根据旬河流域 1980 年、1990 年的土地利

用数据资料及 1980~1990 年的降雨资料来模拟旬河流域的径流过程, 并分离出气候变化和土地利用变化对径流量变化的影响程度。在这一时期流域内的土地利用变化并不大, 各种土地利用类型面积变化值占流域总面积的百分比均在 1%以下, 分析得出气候变化是导致这一时期径流量变化的主要因素。

本文由于受数据资料仅仅 11 年的长度限制, 土地利用及覆被变化很小, 因此没能达到研究土地利用变化对径流过程的影响的这一预期目标, 如果选取时段较长或者土地利用变化较大的系列资料进行研究可能效果会好些。另外, 在对模型的改进方面有待完善, 可以考虑土地利用变化在蒸发和下渗等过程中的作用, 从而定量的评估其水文水资源效应。总之, 考虑怎样在水文模型中更好的表征土地利用是需要进一步探讨的课题。

参考文献 (References)

- [1] 邓慧平. 气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 436-441.
DENG Huiping. Impacts of climate change and land use-land cover change on hydrology and water resources. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 436-441. (in Chinese)
- [2] 张利平, 陈小凤, 赵志鹏, 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.
ZHANG Liping, CHEN Xiaofeng, ZHAO Zhipeng and HU Zhifang. Progress in study of climate change impacts on hydrology and water resources. *Progress in Geography*, 2008, 27(3): 60-67. (in Chinese)
- [3] 胡彩虹, 管新建, 吴泽宁, 王爱琴. 水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 12-16.
HU Caihong, GUAN Xinjian, WU Zening and WANG Aiqin. Analysis for contribution of soil and water conservation and climate change to runoff in the upper reaches of Fenhe reservation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 12-16. (in Chinese)
- [4] 陈军锋, 李秀彬, 张明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响[J]. 地球科学, 2004, 34(7): 668-674.
CHEN Junfeng, LI Xiubin and ZHANG Ming. Model simulation of impact of land use change and climate variability in

- Suomohe watershed. Science in China Series D, 2004, 34(7): 668-674. (in Chinese)
- [5] 郭军庭. 潮河流域土地利用/气候变化的水文响应研究[D]. 北京林业大学, 2012.
GUO Junting. Hydrological responses to land use change and climate variability in Chaohe watershed. Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [6] LORUP, J. K., REFSGAARD, J. C. and MAZVIMAVI, D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modeling. Case studies from Zimbabwe. Journal of Hydrology, 1998, 205(3-4): 147-163.
- [7] 王盛萍. 典型小流域土地利用与气候变异的生态水文响应研究[D]. 北京林业大学, 2007.
WANG Shengping. Eco-hydrological response of small watershed to land use change and climate variation. Beijing Forestry University, 2007. (in Chinese)
- [8] 董艳萍, 袁晶瑄. 流域水文模型的回顾与展望[J]. 水力发电, 2008, 3: 20-23.
DONG Yanping, YUAN Jingxuan. The retrospect and looking into the future of watershed hydrological model. Water Power, 2008, 3: 20-23. (in Chinese)
- [9] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 517-520.
XIONG Lihua, GUO Shenglian and TIAN Xiangrong. DEM-based distributed hydrological model and its application. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese)
- [10] 万民, 熊立华, 董磊华. 飞来峡流域基于栅格 DEM 的分布式水文模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(5): 549-553.
WAN Min, XIONG Lihua and DONG Leihua. Grid DEM-based distributed hydrological modeling for Feilaixia watershed. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(5): 549-553. (in Chinese)
- [11] 张晓明, 曹文洪, 余新晓, 武思宏. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用覆被变化的径流调节效应[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 641-650.
ZHANG Xiaoming, CAO Wenhong, YU Xinxiao and WU Sihong. Effect of LUCC on runoff regulation in watershed in loess gullied-hilly region of China. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 641-650. (in Chinese)
- [12] BLASONE, R. S., VRUGT, J. A. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. Advances in Water Resources, 2008, 31(4): 630-648.
- [13] 卫晓婧, 熊立华. 改进的 GLUE 方法在水文模型不确定性研究中的应用[J]. 水利水电快报, 2008, 29(6): 23-25.
WEI Xiaojing, XIONG Lihua. Application of the modified generalized likelihood uncertainty estimation method to hydrological model uncertainty analysis. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(6): 23-25. (in Chinese)
- [14] DUAN, Q., SOROOSHIAN, S. and GUPTA, V. K. Optimal use of the SCE-UA optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology, 1994, 158(3-4): 265-284.