

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220131

基于水文模拟的流域水文相似度分析

梁美霞¹, 陈志彪^{2,3}, 陈志强^{2,3}, 陈海滨⁴, 区晓琳^{2,3}

1. 泉州师范学院 资源与环境科学学院, 福建 泉州 362000;
2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007;
3. 福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007;
4. 闽南师范大学 历史地理学院, 福建 漳州 363000

摘要:选取福建省长汀县朱溪流域与其所属的游屋圳子流域作为研究区, 构建流域间的水文相似性评价指标, 量化评估母流域与子流域之间的水文相似度。结果表明朱溪流域与游屋圳小流域的水文相似度为完全相似水平, 可将游屋圳小流域模型参数应用于缺实测资料朱溪流域的水文模拟。

关键词:水文相似度; 相似元值; 水文模拟; 无资料流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2023)05-0001-05

0 引言

目前很多流域由于缺乏实测的观测资料, 使得模型参数的率定产生了不确定性, 影响了模型的应用效果。缺实测资料地区的水文模拟已成为国际上水文研究重点之一^[1]。2003年国际水文科学协会启动了无资料流域的水文预测 PUB (Prediction in Ungauged Basins) 研究计划^[2], 无资料地区的水文预报蓬勃发展, 而分布式 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型在无资料或资料稀缺流域的应用成为近年来 PUB 国际水文计划研究的难点^[3]。2004年中科院地理所筹建 IAHS-PUB 计划中国工作委员会, 在我国开展围绕新技术、新理论和新方法问题的讨论, 推动了学者们对无资料地区水文研究的热情^[4-7]。

常用的方法为区域化方法, 即通过参数移植、参数回归或空间差值等方法, 将同一地区有资料流域已率定好的参数应用于无资料流域^[8]。随着对 PUB 问题深入研究, 参数移植法在实际预报工作中的应用日趋广泛^[7,9]。一般而言, 若两个流域的基本属性相似, 其水

文模拟运行参数应该是一致的。因此, 有必要进行相近流域或属性相似流域间的水文相似度分析。已有研究多集中于对相邻两个流域间的分析, 而对于流域与其子流域之间的水文相似度分析较少。

福建省长汀县由于境内多陡坡山地丘陵, 土壤贫瘠, 抗蚀性极差, 保水保肥能力弱等原因, 水土流失严重。朱溪流域是长汀县水土流失的典型流域, 但由于缺乏实测资料, 很难使用水文模型进行水沙模拟。因此, 本文选取具有实测资料的游屋圳小流域作为参证流域, 构建朱溪流域与其子流域游屋圳小流域之间的水文相似性评价指标, 量化其水文相似度, 旨在评判游屋圳小流域 SWAT 模型参数在缺实测资料朱溪流域的径流泥沙模拟的适用性。

1 研究区概况

朱溪流域位于福建省长汀县河田镇东部, 地理坐标为 (25° 38' 15" ~ 25° 42' 55" N, 116° 23' 30" ~ 116° 30' 30" E), 流域土地面积约为 44.96 km²^[10]。而游屋圳小流域属于朱溪流域的子流域^[10], 该小流域面积仅 5.29 km², 是

收稿日期: 2022-04-08

网络首发日期: 2023-08-21

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20230818.1604.010.html>

基金项目: 福建省科技厅自然科学基金(面上)项目(2020J01780); 福建省科技厅高校产学研合作项目(2020N5007); 福建省大学生创新创业训练计划项目(S202210399048)

作者简介: 梁美霞(1981—), 女, 福建南安人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水土保持、生态恢复。E-mail: lmx2003440@163.com

通信作者: 陈志彪(1962—), 男, 福建平潭人, 博士生导师, 教授。主要研究方向为水土保持、自然资源与环境。E-mail: zhibiao@fjnu.edu.cn

朱溪流域内重点治理的区域,2007年游屋圳作为南方红壤丘陵区的代表小流域,被列入全国30条典型小流域和全国50个典型监测点之一。

2 流域水文相似度分析

2.1 构建水文相似性评价指标体系

流域水文系统是指相互关联而组合在一起的水文要素的集合^[9]。流域水文系统中的3个组成部分驱动力、结构要素及水动力也是水文相似的三要素。其中驱动力(外部的能量和水分输入)和结构要素(植被、地形、地质等)决定了流域水文循环的动力学机制^[11]。根据流域水文相似性评价的目的,科学、合理地选取合适的水文相似性指标体系。结合流域的具体情况,建立3大类6小类的水文相似性评价指标体系(见图1)。

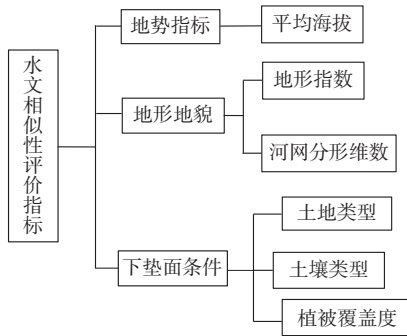


Fig.1 The evaluation index system of hydrological similarity

2.2 水文相似元值的计算

水文相似元是指水文系统间具有共同的属性和特征,而在数值上存在组成差异的要素构成的单元^[12]。当流域A中要素 a_i 与流域B要素 b_i 为对应的水文相似要素时,用水文相似元描述,记为 $u_i(a_i, b_i)$ ^[11]。设A流域水文指标值为 y_s ,B流域相应的水文指标值为 y_r ,则水文相似元的值为:

$$q(u_i) = 1 - \frac{|y_r - y_s|}{y_r} \quad (1)$$

基于流域水文相似性基本原理和公式(1),分别计算两流域间6个相似指标的相似元值。

(1)平均海拔水文相似元值。利用朱溪流域的6幅1:1万地形图为底图,在ArcGIS9.3软件的支持下,矢量化等高线,利用3D analyst创建不规则三角网TIN,得到朱溪流域 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的高精度DEM。在此基础上利用ArcGIS软件的裁剪和DEM数据计算,可得到朱溪流域的平均海拔为355.25 m,游屋圳小流域的平均海拔为347.30 m。

因此,考虑相对一致的地表情况下,两流域平均海拔水文相似元值的计算公式如下:

$$S_E(A, B) = 1 - \frac{|E_B - E_A|}{E_A} \quad (2)$$

式中: $S_E(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的平均海拔水文相似元值; E_A 为流域A的平均海拔; E_B 为流域B的平均海拔。

(2)地形指数水文相似元值。1979年Beven和Kirkby提出的地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 是反映流域地形的一个重要物理指标。其中,以栅格形式的DEM表示流域, \ln 是自然对数, α 为通过单位等高线长度进入网格单元的集水面积, $\tan\beta$ 为网格单元的坡度。在同一流域内,具有相同地形指数值的点对降雨具有相同的水文响应,将该结论或假定推广到不同的流域,即具有相同地形指数的不同流域具有水文相似性。

地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 式中, $\alpha=(\text{flowacc}+1) \times$ 单位栅格面积/Flow width,主要利用ArcGIS Spatial Analys来求取,已有的原始数据为流域的DEM栅格数据,过程数据为洼地填充后的洼地流向flowdirfill和汇流累积量flowacc。最终计算得出朱溪流域的地形指数平均值为5.33,游屋圳小流域的地形指数平均值为5.19。

$$S_{DT} = 1 - \frac{|DT_B - DT_A|}{DT_A} \quad (3)$$

式中: $S_{DT}(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的地形指数水文相似元值; DT_A 为流域A的地形指数值; DT_B 为流域B的地形指数值。

(3)河网分形维数水文相似元值。流域地貌系统的水系是一种自然分形集合,其分形维数(也称分维或分数维)具有特殊含义^[13]。水系的分维能够体现其发展水平,并揭示其受侵蚀的基本情况^[14]。对于河网分形维数,采用不同的方法,得到的数值有差别。本文采用欧阳晓^[13]的DEM水系盒维数的计算方法,通过ArcGIS软件来实现,主要是计算在不同栅格大小的情况下,水系栅格网络占用的栅格数。通过把河流栅格网络进行重分类,得出水系栅格和背景栅格两个值,便于计算水系的盒维数。朱溪流域和游屋圳小流域水系盒维数的计算结果见表1。

在SPSS里分别作以 $\ln \delta$ 为横坐标和以 $\ln N(\delta)$ 为纵坐标的回归分析,结果呈线性,依线性回归结果,朱溪流域回归方程为: $y=-2.030x+13.892, R^2=0.999, Dc=2.030$;游屋圳小流域回归方程为: $y=-2.248x+12.440, R^2=0.999, Dc=2.248$ 。

表1 朱溪流域和游屋圳小流域盒维数计算

Table 1 Box dimension calculation of Zhuxi watershed

水系盒宽度 δ	朱溪流域			游屋圳小流域		
	$N(\delta)$	$\ln \delta$	$\ln N(\delta)$	$N(\delta)$	$\ln \delta$	$\ln N(\delta)$
10	9 518	2.303	9.161	1 259	2.303	7.138
20	2 358	2.996	7.766	281	2.996	5.638
40	570	3.689	6.346	75	3.689	4.317
80	128	4.382	4.852	19	4.382	2.944
160	36	5.075	3.584	2	5.075	0.693

基于DEM水系盒维数的河网分形维数水文相似元值的计算公式如下:

$$S_D(A, B) = 1 - \frac{|D_B - D_A|}{D_A} \quad (4)$$

式中: $S_D(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的河网分形维数水文相似元值; D_A 为流域A(游屋圳小流域)基于分形定义的分形维数计算值; D_B 为流域B(朱溪流域)基于分形定义的分形维数计算值。

(4)土地利用水文相似元值。本研究采用林地率、耕地率和园地率作为反映两流域之间土地利用相似性的评价指标,朱溪流域与游屋圳流域土地利用类型面积占比见表2。土地利用水文相似元值的计算公式如下:

$$S_L(A, B) = 1 - \frac{\sum (L_{i,B} - L_{i,A})^2}{\sum (L_{i,A} - \overline{L_{i,A}})^2} \quad (5)$$

式中: $S_L(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的土地利用水文相似元值; $L_{i,A}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种土地利用类型分布的面积百分比; $L_{i,B}$ 为流域B(朱溪流域)中第*i*种土地利用类型分布的面积百分比; $\overline{L_{i,A}}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种土地利用类型分布的面积百分比的平均值, $i=1, 2, 3$ 。

表2 朱溪流域与游屋圳流域土地利用类型面积占比(%)

Table 2 The area proportion of every land use type of Zhuxi watershed and Youwuzhen watershed (%)

	林地率	耕地率	园地率
朱溪	63.16	22.15	6.23
游屋圳	60.00	21.90	14.55

(5)土壤类型水文相似元值。本研究以两流域共有的土壤类型作为反映两流域之间土壤相似性的评价指标,朱溪流域与游屋圳流域土壤类型面积占比见表3。

土壤类型水文相似元值的计算公式如下:

$$S_s(A, B) = 1 - \frac{\sum (S_{i,B} - S_{i,A})^2}{\sum (S_{i,A} - \overline{S_{i,A}})^2} \quad (6)$$

表3 朱溪与游屋圳土壤类型面积占比(%)

Table 3 The area proportion of every soil type of Zhuxi watershed and Youwuzhen watershed (%)

土壤类型	朱溪	游屋圳
黄泥沙田	18.95	15.77
酸性岩粗骨性红壤	5.99	14.17
乌泥田	4.07	3.10
酸性岩红壤	8.08	19.44
酸性岩侵蚀红壤	60.12	47.59

式中: $S_s(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的土壤水文相似元值; $S_{i,A}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种土壤类型分布的面积百分比; $S_{i,B}$ 为流域B(朱溪流域)中第*i*种土壤类型分布的面积百分比; $\overline{S_{i,A}}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种土壤类型分布的面积百分比的平均值, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

(6)植被覆盖度水文相似元值。本研究以两流域各植被覆盖度分级面积占比作为反映两流域之间植被相似性的评价指标,朱溪流域与游屋圳流域植被覆盖度面积占比见表4。

表4 朱溪与游屋圳各植被覆盖度面积占比(%)

Table 4 The area proportion of vegetation coverage of Zhuxi watershed and Youwuzhen watershed (%)

植被覆盖度	朱溪	游屋圳
0 ~ 30	5.38	3.78
30 ~ 45	3.09	2.71
45 ~ 60	4.84	4.63
60 ~ 75	10.47	11.27
75 ~ 100	76.21	77.61

植被覆盖度水文相似元值的计算公式如下:

$$S_V(A, B) = 1 - \frac{\sum (V_{i,B} - V_{i,A})^2}{\sum (V_{i,A} - \overline{V_{i,A}})^2} \quad (7)$$

式中: $S_V(A, B)$ 为流域B(朱溪流域)相对于流域A(游屋圳小流域)的植被覆盖度水文相似元值; $V_{i,A}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种植被覆盖度的面积百分比; $V_{i,B}$ 为流域B(朱溪流域)中第*i*种植被覆盖度的面积百分比; $\overline{V_{i,A}}$ 为流域A(游屋圳小流域)中第*i*种植被覆盖度的面积百分比的平均值, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

综上,根据朱溪流域与游屋圳小流域平均海拔、地形指数、河网分形维数、土地类型、土壤类型和植被覆盖度相似元值计算公式(2)~(7)可分别得到各指标的相似元值结果,见表5。

表5 水文相似性指标相似元值

水文相似指标	平均海拔	地形指数	河网分形维数	土地利用	土壤类型	植被覆盖度
相似元值	0.977	0.973	0.903	0.933	0.669	0.999

2.3 水文相似权重的确定

由于前面构建的各个流域水文相似性指标对衡量流域相似性的贡献程度有差异,因此必须计算各个指标的重要性值,即权重^[12]。本文采用层次分析法^[15]通过邀请水文领域的专家对图1中的6个小类指标按照1~9的标度方法,进行两两因素间的重要性值比较,综合各专家的打分构成比较矩阵(见表6),并计算出权重系数 β_i ,经一致性检验均有 $CR < 0.1$,说明 β_i 符合要求,可用于衡量各指标的重要性,作为各指标在水文相似度评价中的权重值。

表6 水文相似性指标重要性比较矩阵

Table 6 The importance comparison matrix of hydrological similarity indicators

指标	平均海拔	土壤类型	河网分形维数	土地利用	地形指数	植被覆盖度	β_i
平均海拔	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	0.042
土壤类型	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.064
河网分形维数	3	2	1	1/2	1/3	1/4	0.101
土地利用	4	3	2	1	1/2	1/3	0.160
地形指数	5	4	3	2	1	1/2	0.252
植被覆盖度	6	5	4	3	2	1	0.381

注: $\lambda_{\max}=6.122$; $CI=0.024$; $RI=1.24$; $CR=0.019$ 。

2.4 流域间水文相似度评价

流域A中有k个水文要素组成,流域B由r个水文要素组成,系统A、B间存在n个相似水文要素,构成n个水文相似元,水文相似元值记为 $q(u_i)$ 。每一水文相似元对水文相似系统的相似程度影响权重为 β_i , $\beta_i \in [0, 1]$,且 $\sum \beta_i = 1$ 。则水文相似系统的相似度可以定义为:

$$\text{Similar}(A, B) = \frac{n}{k+r-n} \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i) \quad (8)$$

当两个流域采用相同个数、相同的水文相似评定指标的时候,即公式中的 $k=r=n$,则将公式(8)简化为:

$$\text{Similar}(A, B) = \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i) \quad (9)$$

将所获取的两流域的各指标值和权重代入公式(9),即可计算朱溪流域与游屋圳流域之间的水文相似度(表7)。

表7 朱溪流域与游屋圳小流域水文相似度值

Table 7 Hydrological similarity value between Zhuxi watershed and Youwuzhen watershed

水文相似指标	平均海拔	地形指数	河网分形维数	土地利用	土壤类型	植被覆盖度
相似元值	0.977	0.973	0.903	0.933	0.669	0.999
权重	0.042	0.252	0.101	0.160	0.064	0.381
相似度	0.950					

依据流域水文相似度评价标准^[12]判断流域之间的相似性程度,可知朱溪流域与游屋圳小流域完全相似。

3 流域相似度评估方法的适用性

基于游屋圳小流域实测资料构建的SWAT模型采用该小流域水文站2013—2017年月径流、泥沙实测数据作为流域实测值;选取相对误差 Re 、决定性系数 R^2 和Nash-Sutcliffe效率系数 Ens 三个指标来评价模型的适用性。构建的游屋圳小流域SWAT模型率定期和验证期的月均流量和月泥沙量模拟效果如图2、图3所示。一般来说,当 $Re < 25\%$, $R^2 > 0.5$ 和 $Ens > 0.5$ ^[16]模拟结果可以接受。根据已有经验,当 $Ens > 0.75$ 时,可以认为模型模拟效果好;当 $0.36 \leq Ens \leq 0.75$ 时,模拟效果令人满意;当 $Ens < 0.36$ 时,模型模拟效果较差^[17]。由于该小流域面积仅有 5.29 km^2 ,受野外实测资料准确性的影响,

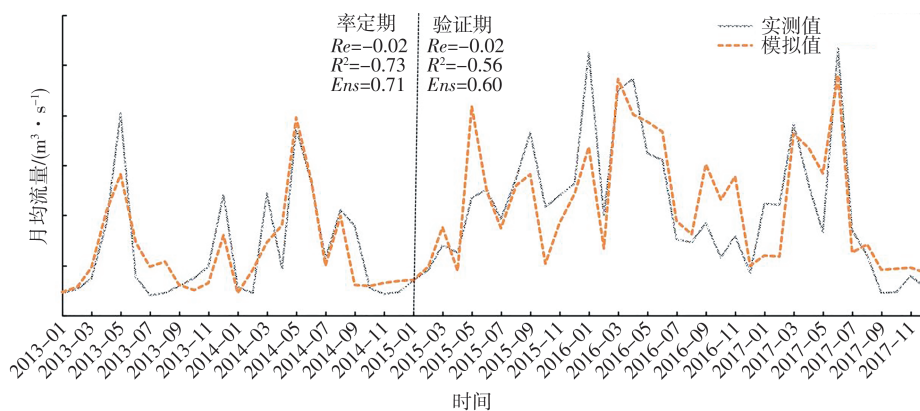


图2 模型月均流量率定期和验证期的模拟效果比较

Fig.2 Calibration and validation results of monthly runoff during 2013—2017

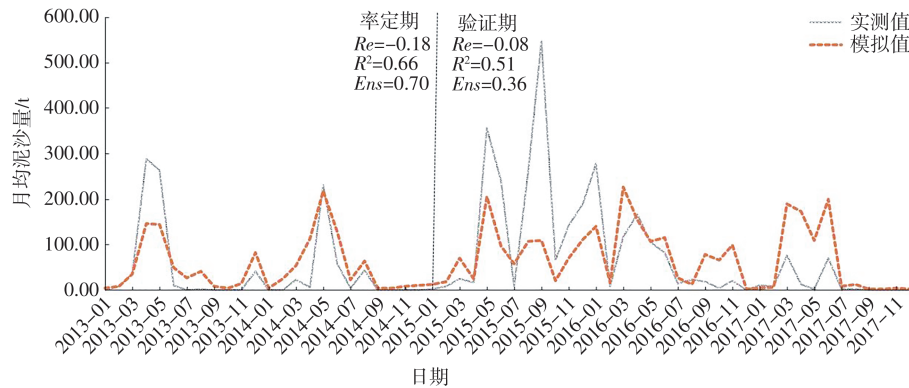


图3 模型月均泥沙率定期和验证期的模拟效果比较

Fig.3 Calibration and validation results of monthly sediment during 2013—2017

泥沙的不确定性因素更大,相比于径流,泥沙的校准和验证标准可适当放宽。综合评价结果,游屋圳小流域率定的参数能符合基本的评价指标值要求,说明经率定参数以后的模型可用于游屋圳小流域径流和泥沙模拟。

依据朱溪流域与游屋圳小流域水文相似度评价结果可知朱溪流域与游屋圳小流域完全相似。可将游屋圳小流域率定的参数采用参数移植法进行朱溪流域 SWAT模型的产流产沙模拟。

本文中构建的流域水文相似度评价方法主要适用于子母流域之间的相似性评价,具有一定的推广性,但具体流域的指标选取应结合研究区的具体情况来选定。

4 结论

(1)从流域间的水文相似元值来看,两流域间的相似元值依次为植被覆盖度>平均海拔>地形指数>土地利用>河网分形维数>土壤类型。

(2)从水文相似性指标来看,其重要性分别为植被覆盖度>地形指数>土地利用>河网分形维数>土壤类型>平均海拔。

(3)朱溪流域与游屋圳小流域达到完全相似的标准,说明将有实测资料的游屋圳小流域率定后的模型参数移植到朱溪流域进行流域水文过程的模拟具有适用性。本研究探讨的构建流域与其子流域之间的水文相似度评价指标体系及评价方法具有一定的推广性。

参考文献:

[1] 谈戈,夏军,李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. 冰川冻土,2004,26(2):192-196.
 [2] 刘苏峡,刘昌明,赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1333-1339.
 [3] 罗吉忠,张新华,肖玉成,等. 基于SWAT模型的缺资料流域径流模拟研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2013,39(1):

80-86.

- [4] YAO C, LI Z J, YU Z B, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xin'anjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468-469:47-62.
 [5] 李红霞,张新华,张永强,等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J]. 水文,2011,31(3):13-17.
 [6] 李红霞,张永强,敖天其,等. 无资料地区径流预报方法比较与改进[J]. 长江科学院院报,2010,27(2):11-15.
 [7] 姚成,章玉霞,李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(2):108-113.
 [8] 程艳,敖天其,黎小东,等. 基于参数移植法的SWAT模型模拟嘉陵江无资料地区径流[J]. 农业工程学报,2016,32(13):81-86.
 [9] 孙伟. 基于SWAT模型石羊河流域径流模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2013.
 [10] LIANG M X, CHEN Z B, LIN Q, et al. Assessing the Transport of Rare Earth Elements in Runoff in a Small Watershed Developed on a Coarse-Grained Granite Area in Southern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(13):1-12.
 [11] 杨亚慧. 基于SWAT模型的西安市秦岭北麓流域径流分析[D]. 西安:长安大学,2015.
 [12] 戚晓明,陆桂华,吴志勇,等. 水文相似度及其应用[J]. 水利学报,2007,38(3):355-360.
 [13] 欧阳晓,赵牡丹,秦慧杰. 基于ArcGIS的DEM水系盒维数的计算[J]. 地下水,2010,32(6):184-185.
 [14] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996,16(2):124-128.
 [15] 马立平. 层次分析法——现代统计分析方法的学与用(七)[J]. 北京统计,2000(7):38-39.
 [16] BENAMAN J, SHOEMAKER C A, HAITH D A. Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(5):363-374.
 [17] 陈媛,郭秀锐,程水源,等. 基于SWAT模型的三峡库区流域污染源分析及重点控制区域识别[J]. 北京工业大学学报,2013,39(5):761-768.

(下转第11页)