

降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究

张雪松¹, 郝芳华¹, 张建永²

(1. 北京师范大学水科学研究所, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘要: 对降雨空间分布变化的不完全理解, 以及缺乏足够的数据来描述降雨的空间分布, 阻碍了分布式水文模型的发展。以黄河下游洛河卢氏水文站以上流域为研究区, 在 GIS 技术支持下, 采用目前分布式水文模型中应用广泛的 Thiessen 多边形法确定降雨空间分布, 选取分布式水文模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 研究降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟的影响。结果表明雨量站密度、雨量站分布和降雨空间分布变化均对模拟结果产生了较大影响, 这在一定程度上限制了分布式水文模型的应用和参数识别。此外, Thiessen 多边形法对面雨量的估算结果是令人满意的, 但对降雨空间分布的描述能力较差。

关键词: 降雨空间分布不均匀性; 分布式水文模型; Thiessen 多边形法; 径流; 泥沙

中图分类号: S 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)01-0009-04

Study on Effect of Uncertainty in Spatial Distribution of Rainfall on Runoff and Sediment Modeling

ZHANG Xue-song¹, HAO Fang-hua¹, ZHANG Jian-yong²

(1. Key Laboratory to Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: The development of distributed modeling technology has been hampered by incomplete understanding of spatially variable process and the lack of adequate data to characterize spatially varying inputs. This seems to be particularly true with respect to rainfall distribution. The effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff and sediment modeling was studied. The upper watershed of Luohe River was selected as the study area. Thiessen polygon method was used to estimate the spatial distribution of rainfall field. Using GIS and SWAT model, the effect of the density of raingauge network, different spatial arrangement of raingauge, and different spatial variability of rainfall field on runoff volume and sediment yield were examined. The results indicate that utility of a spatially distributed approach to model catchment response is compromised by large uncertainties in the spatial distribution of rainfall input. And estimates of areal rainfall using Thiessen polygon method may be accurate at the watershed scale but do not produce accurate estimates of rainfall distribution for distributed watershed modeling.

Key words: uncertainty in spatial distribution of rainfall; distributed hydrologic model; Thiessen polygon method; runoff; sediment

1 引言

分布式水文模型应用反映流域空间变化的输入参数来预测流域响应。降雨的空间分布和模型中的许多参数都表现出不同程度的随机性, 故模型的输出也必然具有一定的随机性^[1]。对降雨随空间变化的不完全理解阻碍了分布式水文模拟技术的发展, 其中缺乏足够的数据来描述降雨的空间不均匀性是其中主要的限制, 因此降雨的空间分布不均匀性通常被认为是流域模拟不确定性的主要来源之一^[2]。次暴雨的降雨量、强度以及空间分布对流域模拟的影响是显著的^[3-5]。

Osborn^[6]和 Lopes^[2]分别在 1.6 km² 和 6.73 km² 的流域上以具有不同空间分布特征的次暴雨数据作为模型的输入, 结果表明降雨的空间分布不均匀性对流域径流和泥沙负荷有显著影响。Chaubey 等^[7]在面积为 610 km² 的美国 Little Washita 流域分别采用 17 个雨量站的次暴雨数据作为模型输入模拟了流域径流和泥沙负荷, 所得到的模拟结果具有较大的差异。我国的一些学者对降雨的空间分布不均匀性进行了一些研究, 但是涉及对流域径流和泥沙模拟影响的研究还不多见^[8-10]。以上研究集中在次暴雨空间分布对流域径流和泥沙模拟影响, 而作为非点源污染负荷模拟的基础, 在面

① 收稿日期: 2003-08-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043605); 教育部博士点基金资助项目(20010027013)

作者简介: 张雪松(1979-), 男, 山东聊城人, 硕士, 主要从事水资源水环境方面的研究。

积较大流域的长期连续模拟更具实际意义。因此,本文应用分布式水文模型,在中尺度流域应用降雨的长期连续资料,主要从雨量站密度、雨量站分布和降雨空间分布角度研究降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙负荷模拟的影响。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

本文选择黄河下游洛河卢氏水文站以上流域(卢氏流

域)为研究区域,其地理位置与水系如图 1 所示。洛河是黄河三门峡以下最大支流,发源于陕西省华山南麓蓝田县境内,在河南省巩县境内汇入黄河,河道长 447 km,流域面积 18 881 km²,流域形状狭长,流域地势西南高东北低,河流走向大致与黄河干流平行。卢氏流域河道长 196.3 km,流域面积 4 623 km²,该区为土石山区,植被较好,并有大片森林覆盖,水源涵养条件较好,具有多种不同的土地利用和土壤类型。

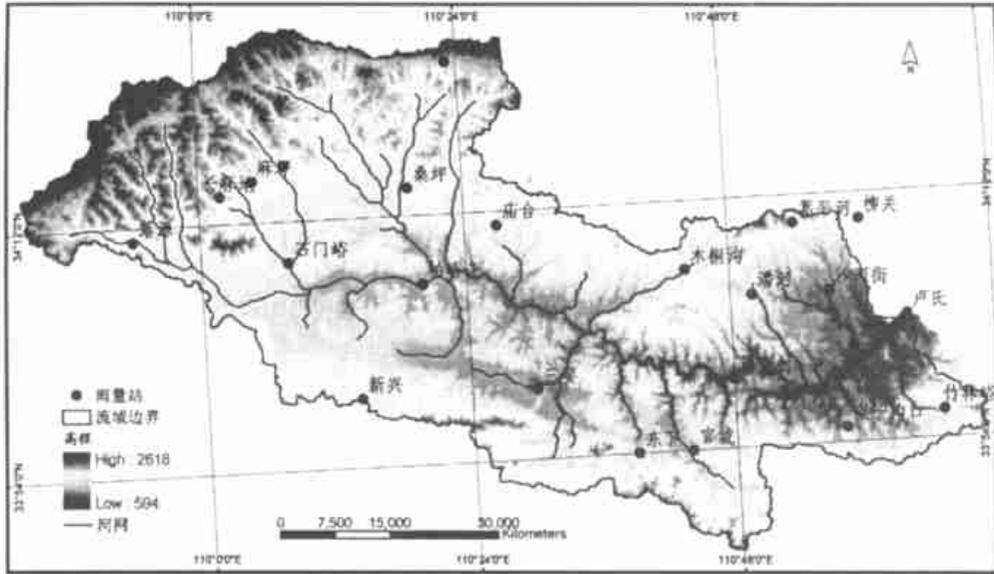


图 1 卢氏流域水系及主要雨量站

2.2 模型简介

本文所选用的分布式水文模型为 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)^[11],应用 Thiessen 多边形法描述降雨空间分布,降雨输入数据为日值,输出结果可以为日、月和年值,由于本文进行的是长期连续模拟,因此采用的输出结果为月值和年值。本文中选用 SCS 模型模拟产流, Muskingum 法模拟河道汇流,应用 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)和 Bagnold 泥沙输移方程来模拟流域泥沙负荷。卢氏流域 DEM 采用 1:25 万国家基础地理信息系统数据,另外还采用了黄河流域 1:100 万的土壤类型图和 1:10 万土地利用图。用两阶段“Brute Force”法对模型进行参数率定^[12]:采用 1992~1997 年的卢氏水文站径流和泥沙月均数据进行模型参数校准,1998~1999 年数据进行验证,并应用验证后的模型研究降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙负荷的影响^[13]。

2.3 降雨空间分布不均匀性指标

选择流域面雨量离差系数 C_v 和流域降雨不均匀系数 η 两种指标来表示降雨空间分布的不均匀性。流域面雨量离差系数 C_v 为降雨特征值均方差与均值的比值,可表示不同均值系列的离散程度。 C_v 越接近于 1,离散程度越大, C_v 越接近于 0,离散程度越小。流域降雨不均匀系数 η 为降雨特征平均值与最大值的比值,反映了降雨的点面折减程度。 η 越接近于 1,表示降雨越均匀。其计算公式分别为:

$$C_v = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1} \quad (1)$$

$$\eta = H / H_{\max} \quad (2)$$

式中: K_i —— H_i 与 \bar{H} 的比值(H_i 为流域内某一雨量站的降雨量(mm)); \bar{H} 流域平均雨量(mm); H_{\max} ——流域最大点降雨量(mm); n ——雨量站数量。

2.4 降雨数据输入

降雨数据从卢氏流域雨量站选取,由于数据缺测等原因,本文中实际采用 24 个雨量站的降雨数据。降雨空间分布的确定采用目前分布式水文模型中应用广泛的 Thiessen 多边形法,假设根据 24 个雨量站所勾绘的 Thiessen 多边形作为准确的流域面降雨空间分布(如图 2 所示),并将以验证后模型计算的面雨量以及模拟的径流、泥沙负荷作为准确值。以相对误差表示不同模拟情景对流域径流和泥沙模拟的影响,相对误差的计算公式为:

$$R_e = (V_i - V_{24}) / V_{24} \quad (3)$$

式中: R_e ——相对误差; V_{24} ——根据 24 个雨量站所计算的面雨量、径流和泥沙负荷; V_i ——不同降雨空间分布情景下所计算的面雨量、径流和泥沙负荷。

通过采用 3 种雨量站降雨资料处理,反映降雨空间分布不均匀性的降雨数据输入:(1)雨量站密度变化对径流、泥沙模拟影响:雨量站密度分别采用不同的雨量站网,勾绘 Thiessen 多边形,并根据 Thiessen 多边形所确定的降雨空间分布作为模型的降雨空间输入数据,计算面雨量、年径流量、最大月径流量、年泥沙负荷和最大月泥沙负荷;(2)雨量站分布变化对径流、泥沙负荷模拟影响,在相同的雨量站密度条件下选取不同的雨量站数据,比较其流域模拟结果;(3)降雨空间分布特征变化对径流、泥沙模拟影响:选取面雨量相近,但降雨空间分布特征不同的年份来模拟降雨空间分布变化对流域模拟的影响。

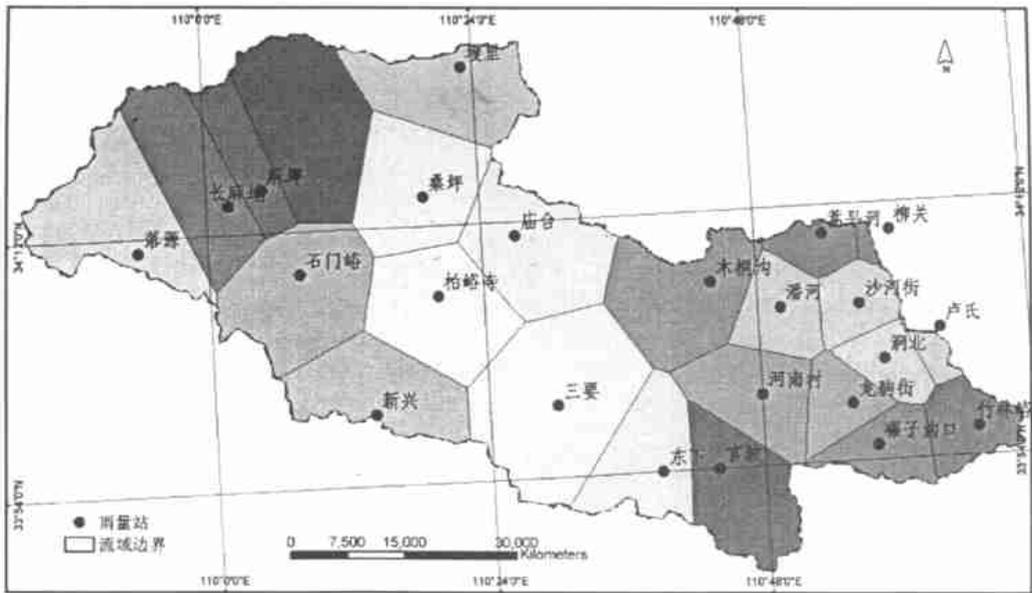


图 2 研究区 24 个雨量站及相应 Thiessen 多边形

3 结果与讨论

3.1 雨量站密度

以 1999 年各雨量站的降雨数据(面雨量为 602 mm, C_v 为 0.17, η 为 0.74) 为例说明雨量站密度对流域模拟的影响, 依次采用不同的雨量站网(分别为 24, 18, 3, 8, 4 和 1)。在选取雨量站时采取随机排除的方法(没有考虑雨量站在描述流域降雨量的相对重要性), 以这种方法选择的雨量站称为情景 A。对于每一种雨量站密度, 勾绘 Thiessen 多边形, 并根据 Thiessen 多边形所确定的降雨空间分布作为模型的降雨空间输入, 对于每一种雨量站密度, 计算面雨量、径流量和泥沙负荷的相对误差(如图 3 所示), 结果表明雨量站密度对流域模拟有一定的影响。从图 3 中可以发现雨量站密度变化对面雨量估算的影响较小, 相对误差只有在仅使用 1 个雨量站的时候较大, 达到了 19.9%, 在其它时候均小于 5%; 年径流量预测的相对误差在使用 8 个雨量站时最小, 为 4%, 当只

使用 1 个雨量站时相对误差最大, 为 -45%; 最大月径流量预测的相对误差在使用 4 个雨量站时最小, 为 5%, 当只使用 1 个雨量站时相对误差最大, 为 -46%; 年泥沙负荷预测的相对误差在使用 13 个雨量站时最小, 为 -3%, 当只使用 1 个雨量站时相对误差最大, 为 64%; 最大月泥沙负荷预测的相对误差在使用 4 个雨量站时最小, 为 -5%, 当使用 8 个雨量站时相对误差最大, 为 -55%。通过上述分析可知: 相对来说雨量站密度变化对面雨量影响较小, 但是对径流和泥沙负荷模拟影响较大; 径流和泥沙负荷的最小误差并没有出现的雨量数量最多的 18 个, 最大相对误差也并不是都出现在只使用 1 个雨量站时, 雨量站密度变化对径流和泥沙模拟的影响并没有严格的规律, 存在较大的不确定性, 同时应注意到, 面雨量、径流量和泥沙负荷随雨量站密度变化的趋势和范围, 只是情景 A 在不同雨量站密度条件下所选择的雨量站空间分布的反映, 在不同的情景条件下会有不同的响应过程, 下面将进行进一步分析。

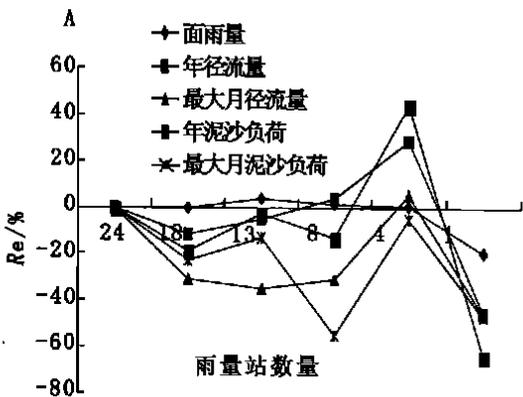


图 3 雨量站密度变化对径流和泥沙模拟影响

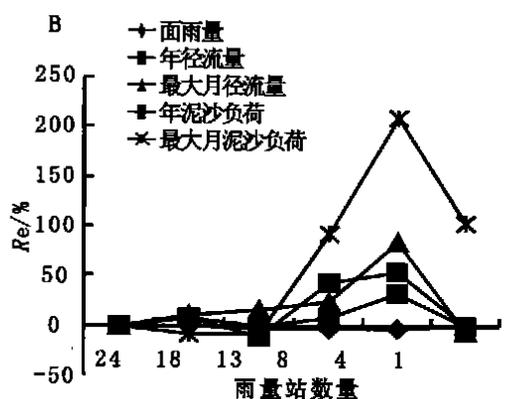


图 4 雨量站分布对径流和泥沙模拟影响

3.2 雨量站空间分布

在相同的降雨空间分布条件下, 不同位置的雨量站对于流域降雨空间分布描述的作用是不同的, 以及由此产生的对流域模拟结果的影响也是不同的。以 1999 年数据为例, 在与情景 A 相同的雨量站密度条件下选取不同的雨量站分布进行模拟计算, 雨量站的选择根据各个雨量站的控制面积(由

24 个雨量站所绘制的 Thiessen 多边形确定), 按照从小到大的顺序进行去除, 以这种方法选择的雨量站称为情景 B。不同雨量站密度下计算的面雨量、径流量和泥沙负荷的相对误差如图 4 所示。由图 4 分析可知, 在相同的雨量站密度下, 面雨量、径流量和泥沙负荷的变化趋势和范围与情景 A 均不相同: 面雨量的估算在各种雨量站密度条件下, 相对误差均小于

4%；年径流量预测的相对误差在使用 13 个雨量站是最小，为 -1%，当采用 4 个雨量站时相对误差最大，为 31%；最大月径流量预测的相对误差在使用 1 个雨量站是最小，为 -7%，当采用 4 个雨量站时相对误差最大，为 83%；年泥沙负荷预测的相对误差在使用 1 个雨量站时最小，为 -1%，当使用 4 个雨量站时相对误差最大，为 55%；最大月泥沙负荷预测的相对误差在使用 18 个雨量站时最小，为 -9%，当使用 4 个雨量站时相对误差最大，为 209%。通过上述分析可知：即使在相同雨量站密度条件下，选取不同的雨量站分布，对流域径流和泥沙模拟的影响是不同的，也就是说由于降雨空间分布的不均匀，不同的雨量站对流域模拟结果的影响程度是不同的。

3.3 降雨空间分布

选取面雨量相近但降雨空间分布不同年份的降雨数据，分析在不同降雨空间分布特征条件下，相同雨量站对降雨空间分布描述的重要性及对流域模拟结果的影响。实际模拟计算中，选取 1992 年和 1996 年降雨数据，其面雨量和降雨空间分布特征见表 1。在这两种不同的降雨空间分布情景下，采用流域 24 个雨量站数据计算得到的面雨量、径流量和泥沙负荷见表 2，年径流量、最大月径流量、年泥沙负荷和最大月泥沙负荷差值占 1992 年特征值的百分率分别为 21.9%、39.03%、17.2% 和 42.1%，占 1996 年特征值的百分率分别为 28.04%、64.01%、20.77% 和 72.1%。综上所述，在面雨量相近但降雨空间分布相差较大的情景下，径流量和泥沙负荷的模拟值相差较大，降雨空间分布特征对流域径流和泥沙负荷模拟的影响是不容忽视的。

表 1 1992 和 1996 年面雨量和降雨空间分布特征

| 年 份 | 面雨量/mm | C_v | η |
|------|--------|-------|--------|
| 1992 | 834 | 0.09 | 0.71 |
| 1996 | 830 | 0.14 | 0.79 |

参考文献:

- [1] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 18(1): 94- 98.
- [2] Lopes, V L. On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modeling[J]. Catena, 1996, 28: 107- 119.
- [3] Wilson, C B, Valdes, J B Rodriguez- Iturbe, I. On the influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff [J]. Water Resources Research, 1979, 15(2): 321- 328.
- [4] Woolhiser, D A Goodrich, D C. Effects of storm rainfall intensity patterns on surface runoff[J]. Journal of Hydrology, 1988, 102: 335- 354.
- [5] Krajewski, F W, Lakshmi, V, Georgakakos, K P, et al. A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model[J]. Water Resources Research, 1991, 27(1): 119- 128.
- [6] Osborn, H B. Storm-cell properties influencing runoff from small watersheds[M]. Transportation Research Record 922, Washington, DC: National Resources Council. National Academy of Sciences, 1984. 24- 32.
- [7] Chaubey, I, C T Haan, S Grunwald, et al. Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall[J]. Journal of Hydrology, 1991, 220: 48- 61.
- [8] 焦菊英, 王万忠. 黄土高原降雨的空间分布的不均匀性研究[J]. 水文, 2001, 21(2): 20- 24.
- [9] 李丽娟, 王娟, 李海滨. 无定河流域降雨量空间变异性研究[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 434- 440.
- [10] 朱红耕, 黄红虎, 周建康. 长江下游水情与降雨时空变化[J]. 人民长江, 2002, 33(12): 2- 3.
- [11] Arnold, J G, R Srinivasan, R S Muttiah, et al. "Large area hydrologic modeling and assessment," Part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73- 89.
- [12] Allred, B, Haan, C T. Small watershed monthly hydrologic modeling system[M]. Users Manual, Stillwater: OK. Biosystems and Agricultural Engineering Department, Oklahoma State University, 1996, 10(4): 38- 42.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38- 42.
- [14] 芮效芳, 朱庆平. 分布式流域水文模型研究中的几个问题[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(3): 56- 58.

表 2 1992 年和 1996 年径流量与泥沙负荷

| 年 份 | 年径流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 最大月径流 量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 年泥沙负 荷/万 t | 最大月泥沙 负荷/万 t |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 1992 | 27.4 | 115.3 | 195.4 | 120.9 |
| 1996 | 21.4 | 70.3 | 161.8 | 70.6 |
| 差值 | 6 | 45 | 33.6 | 50.9 |
| 差值占 1992 年% | 21.90 | 39.03 | 17.20 | 42.10 |
| 差值占 1996 年% | 28.04 | 64.01 | 20.77 | 72.10 |

4 结 语

本文应用分布式水文模型- SWAT, 在面积为 4 623 km² 的卢氏流域研究了降雨空间分布不均匀性对流域模拟的影响, 在此基础上得到如下结论:

(1) 对降雨空间分布不均匀性对分布式水文模型径流和泥沙模拟的影响较大。由于只有在雨量站密度非常稠密的地区才可能对降雨的空间分布进行符合实际的描述, 因此分布式水文模型的实际应用和参数识别受到了一定程度的限制。

(2) 采用 Thiessen 多边形法, 由根据点数据估算的面雨量相对误差较小, 但是 Thiessen 多边形法对流域降雨空间分布不均匀性的描述能力较差。应加强对降雨空间分布描述方法的研究, 如将由雷达和遥感获取的降雨面信息与地面雨量站的降雨点信息相结合以确定降雨空间分布, 应是未来的发展方向。