
应用
技术

径流模拟对 DEM 分辨率的敏感性分析

张雪松¹, 郝芳华¹, 杨志峰¹, 刘虹¹, 王庆斋², 戴东²

(1. 北京师范大学 环境科学研究所 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875;

2. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450003)

摘要: 在 GIS 技术的支持下应用 SCS 模型, 以黄河下游支流洛河卢氏水文站以上流域为研究区, 基于 1:250 000 DEM 和 1:1 000 000 DEM 对 1992—2000 年的流域径流量进行了模拟, 研究了径流模拟对 DEM 分辨率的敏感性, 结果表明 1:250 000 DEM 的模拟值比 1:1 000 000 DEM 为高。由不同分辨率的 DEM 得到流域面积、河网结构、高程等空间参数相差较小, 而坡度相关的变化较大。根据 SCS 模型敏感参数 C_n , 从坡度参数变化角度分析了不同分辨率的 DEM 对流域径流量影响。

关键词: DEM; 水平分辨率; SCS 模型; 径流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2004)01-0032-04

中图分类号: P333.1

Effect of DEM's Resolution on Watershed Hydrologic Modeling

ZHANG Xue-song¹, HAO Fang-hua¹, YANG Zhi-feng¹, LIU Hong¹, WANG Qing-zhai², DAI Dong²

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Bureau of Hydrology, YRCC, Zhengzhou 450003, He'nan Province, China)

Abstract: With the support of GIS technology, the SCS (soil conservation service) model was selected to model runoff of the upper watershed of the Luohe River (a tributary of the Yellow River) using a 1:250 000 DEM and a 1:1 000 000 DEM. By comparison of the simulated annual average runoff yield from 1992 through to 2000, it was found that a higher runoff volume was obtained using the 1:250 000 DEM. There are marginal differences in area, elevation, slope, channel length, and drainage network between the DEMs of different resolution, but there is a greater difference in slope change. Through analysis of the sensitive parameter CN of the SCS model, the sensitivity of runoff modeling to DEM resolution is described from the perspective of slope change.

Keywords: DEM; resolution; SCS curve number method; runoff

1 引言

20 世纪 50 年代 Miller 首次提出数字地面模型 (Digital Terrain Model, DTM) 概念, 1978 年 Doyle 将 DTM 定义为描述地面诸特性空间分布的有序值阵列, 其本质属性是二维地理空间定位和数字表达。通常将地面高程分布的数字地面模型称作数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)^[1]。DEM 与等高线图所提供的信息是一样的, 但由于其数字格式适用于计算机系统的处理以及其可得性的增加, 在流域水文模拟中的应用日益普遍^[2]。

流域水文模拟基于流域空间地形参数, 其准确性有赖于输入数据对流域特征的描述。应指出基于地理信息系统 (GIS) 的流域模拟结果对空间数据 (如 DEM 等) 的分辨率具有一定的敏感性^[3-6]。国外学者大量的研究表明^[7-11], DEM 的分辨率对流域模拟有

一定的影响: 由不同分辨率 DEM 得出的流域面积、河网结构、高程、河道长度等在大体上是一致的, 但是由不同分辨率 DEM 提取的坡度差别较大; 国内学者^[12-13]也研究了不同分辨率 DEM 对空间参数提取的影响。本研究的目的是量化不同分辨率 DEM 对流域径流模拟的影响, 并进行敏感性分析。

2 资料与方法

2.1 研究区简介

选择黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域为研究区域。洛河是黄河三门峡以下最大支流, 发源于陕西省华山西麓蓝田县境内, 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, 流域地势西北高东南低, 河流走向大致与黄河干流平行。卢氏水文站以上流域河道长 196.3 km, 流域面积 4 623 km², 该区为土石山区, 植被较好,

收稿日期: 2003-06-13

修回日期: 2003-09-16

资助项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 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 (汉族), 硕士生, 主要从事水资源与水环境方面的研究。E-mail: glare99@tom.com。

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。

2.2 基础数据处理

在 GIS 技术支持下对 1:250 000 DEM 和 1:1 000 000 DEM 进行图幅拼接,并将其投影转化为 Albers 等积圆锥投影。应用 AVSWAT 模型^[14]中的 Automatic delineation 空间数据分析处理工具,对输入的栅格型 DEM 进行处理,定义流域范围,划分亚流域,确定河网结构和计算子流域参数。此外还利用了黄河流域 1:400 万的土壤类型和 1:100 万土地利用图,并根据不同土地利用和土壤类型的组合在每一个亚流域内进一步划分水文响应单元(HRU),HRU 以非空间方式模拟,即以在某一亚流域中土壤和土地利用协同变化特征的概率分布来表达。每个 HRU 都单独计算径流量,然后演算得到流域总径流量。应用 1992—2000 年的日降水数据,基于 2 种不同分辨率的国家基础地理信息系统 DEM 数据模拟流域径流量。1:250 000 DEM 的栅格大小约为(83 m×83 m),而 1:1 000 000 DEM 的栅格大小约为(953 m×953 m),其图像分别如图 1 所示,图中深色代表高程较高处,浅色代表高程较低处。

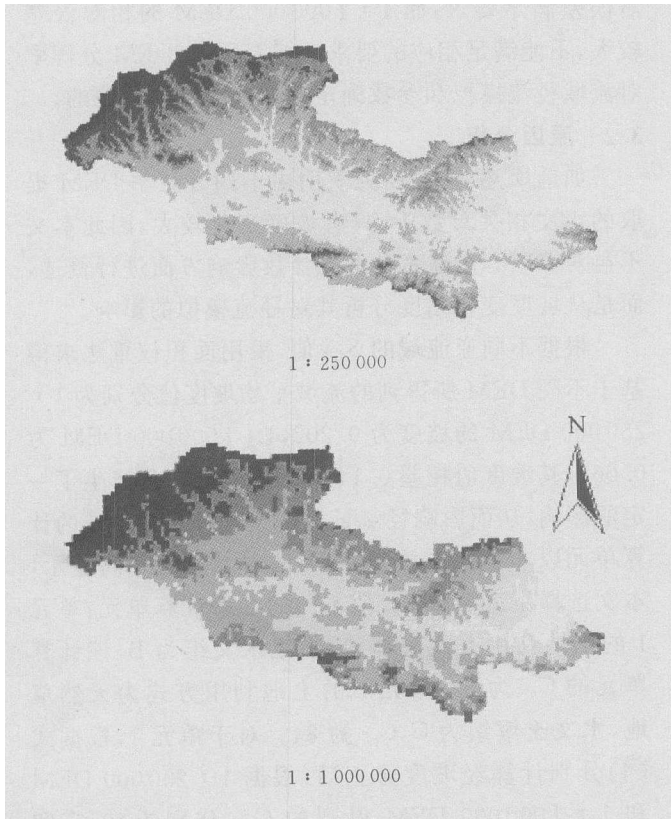


图 1 1:1 000 000 和 1:250 000 DEM 图像

2.3 SCS 模型简介

SCS 模型是由美国水土保持局提出的,目前该模

型在我国已经得到了一定程度的应用,如袁艺、史培军将 SCS 模型应用于深圳市研究土地利用变化对降雨径流关系的影响^[15],贺宝根等将 SCS 模型修正之后应用于上海郊区^[16],徐秋宁等将 SCS 模型在陕北、渭北的多个小型集水区降雨径流量进行了分析与计算^[17],罗立芳等在黄土高原对 SCS 模型进行了应用^[18]。本文中所使用模型的建立思路参考张建云、何惠基于地理信息系统技术和 SCS 模型所建立的流域径流模拟模型^[19],根据 AVSWAT 模型中包含的相对独立的计算模块,本研究中径流模拟选用了 AVSWAT 模型中空间数据分析处理模块,SCS 模型计算产流模块和 Muskingum 法计算河道汇流模块。SCS 模型的基本方程为^[20]:

$$Q = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)} \quad (1)$$

式中: Q ——径流量(mm); R ——降水深(mm); I_a ——前期损失量(mm),包括降雨在产流前的地表储存、中途拦截和下渗; S ——流域最大可能滞留量(mm),在空间上与土壤类型、土地利用、管理和坡度有关。

径流曲线数(runoff curve number, C_n),是反映降雨前流域特征的一个综合参数,也是影响径流量的主要参数^[21],它与流域前期土壤湿润度、坡度、植被、土壤类型和土地利用现状等相关。上式成立的条件是 $R > I_a$,否则径流量为零。通常选取 $I_a = 0.2S$,从而 SCS 曲线方程可简化为式(2):

$$Q = \frac{(R - 0.2S)^2}{(R + 0.8S)} \quad (2)$$

S 可根据式(3)求得:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{C_n} - 10 \right) \quad (3)$$

由上述方程可知对于不同的 C_n 值,降水量和径流量有着不同的对应关系。 C_n 值的大小变化在 0~100 间,据不同前期土壤水分条件取不同 C_n 值,在实际应用中一般用此次降雨前 5 d 的降雨量来确定前期土壤湿度是干旱、中等还是湿润,分别对应 C_{n1} 、 C_{n2} 和 C_{n3} 。SCS 模型中提供的是坡度约为 0.05 m/m 的 C_n 值,并引入了方程(4)对 C_n 值进行坡度修正:

$$C_{n2s} = \frac{(C_{n3} - C_{n2})}{3} \times$$

$$[1 - 2 \times \exp(-13.86 \times S_{LP})] + C_{n2} \quad (4)$$

式中: C_{n2s} ——经过坡度修正后的中等条件下的 C_n 值; S_{LP} ——亚流域平均坡度值(m/m)。

本文中 C_{n2} 的确定由文献^[22]中所提供的 C_n 值表来确定。并在模型基本输入文件.mgt 中针对每个亚流域修正 C_{n2} 值。

3 敏感性分析

敏感性分析可用来研究输入资料与参数变化对定量模型行为和输出结果的影响^[23],分析模型组成部分和输入资料的相对重要性和所需精度^[24]。本研究中敏感性分析基于 2 种 DEM 所产生的坡度参数。

3.1 模拟结果

由于本文中所采用的基础数据只有 DEM 的分辨率是不同的,所以模型的模拟结果反映了径流模拟

对 DEM 空间分辨率的敏感性。根据参考文献[22]的内容,确定流域各计算单元的 C_{n2} 值,并采用式(4)进行坡度修正后,应用 1992—2000 年水文气象数据模拟了流域 9 a 径流量,表 1 中列出了基于不同 DEM 所得到的流域径流量以及其相对误差,相对误差计算公式为:

$$R_E = |(M_i - M_0)/M_0 \times 100\%|$$

式中: M_i —— 基于不同分辨率 DEM 所得到的模拟值; M_0 —— 实测值。

表 1 基于不同 DEM 模拟的年径流量

| 项 目 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 均值 |
|------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 实测值/mm | 159.00 | 69.00 | 117.00 | 28.00 | 165.00 | 23.00 | 194.00 | 29.00 | 95.00 | 98.00 |
| 模拟值 1/mm | 163.00 | 60.00 | 91.00 | 40.00 | 135.00 | 30.00 | 181.00 | 42.00 | 106.00 | 94.00 |
| 模拟值 2/mm | 111.00 | 37.00 | 69.00 | 23.00 | 108.00 | 17.00 | 161.00 | 21.00 | 85.00 | 70.00 |
| $R_{E_1}/\%^{①}$ | 2.52 | 10.14 | 13.68 | 25.00 | 12.12 | 30.43 | 6.70 | 10.34 | 11.58 | 13.61 |
| $R_{E_2}/\%^{②}$ | 30.19 | 46.38 | 41.03 | 17.86 | 34.55 | 26.09 | 17.01 | 27.59 | 10.53 | 27.91 |

注: ①代表 1:250 000 DEM; ②代表 1:1 000 000 DEM。

由表 1 可知 1992—2000 年基于 1:250 000 DEM 的模拟径流量比 1:1 000 000 DEM 所得到的结果高,年均径流量之差为 24mm。1:250 000 DEM 的径流模拟相对误差相对较小,年均均为 13.61%,最高达 30.43%;1:1 000 000 DEM 的径流模拟相对误差较大,年均达到了 27.91%,最高为 46.38%。基于 2 种分辨率 DEM 模拟的年径流量与实测径流量的累积对比如图 2 所示。

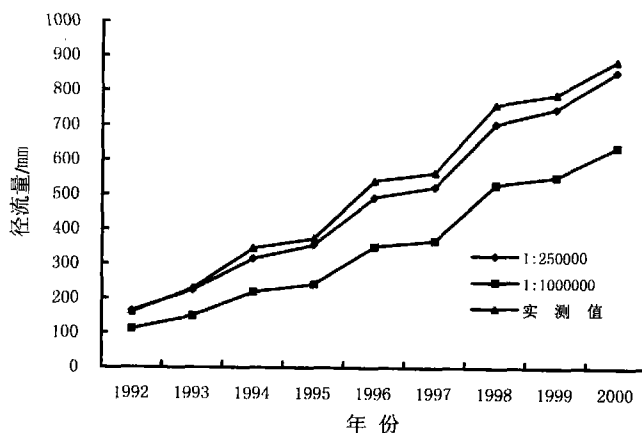


图 2 基于不同 DEM 的年累积径流量对比

总体而言,由 2 种分辨率 DEM 计算的径流量与实测值相比均偏小,但 1:250 000 DEM 的模拟径流与实测值相比相对误差较小,而 1:1 000 000 DEM 的模拟径流相对误差较大。Walling 和 Webb^[25]的研究成果表明,由于误差的放大作用,在径流模拟相对误差较小的情况下,也会导致泥沙负荷误差较大。

Santhi 根据 Winter (1981)、Robertson 和 Roerish (1999)的研究成果,为保证泥沙和非点源污染负荷模拟精度,多年平均径流模拟相对误差应小于 15%。而上述结果表明 1:250 000 DEM 的模拟径流年均相对误差满足要求,而 1:1 000 000 DEM 的相对误差较大,不能满足相应的要求。综上所述,DEM 分辨率对流域径流模拟和参数确定的影响是不容忽略的。

3.2 原因分析

如前所述,许多研究表明由不同分辨率 DEM 提取的水文相关参数中,只有坡度变化较大,因此本文不再对 DEM 分辨率对水文参数影响方面进行赘述,而是从坡度变化角度分析其对径流模拟的影响。

根据不同亚流域的 S_{LP} 值,采用面积权重法求得基于不同 DEM 所得到的流域平均坡度值分别为 1:250 000 DEM 的坡度为 0.202,1:1 000 000 DEM 为 0.061。其坡度值相差 0.141,对 C_{n2} 值的变化产生了一定的影响,从而影响径流量。由于在每个亚流域的计算单元以非空间方式表达,无法对其进行空间显示,本文选择了流域内 C_{n2} 值不同的 2 个计算单元:单元 1 的土地利用方式为林地,土壤水文组为 B,该计算单元的 C_{n2} 为 55;单元 2 的土地利用方式为天然草地,水文土壤组为 C, C_{n2} 为 84。对于单元 1,根据式(4)分别计算经坡度修正后,根据 1:250 000 DEM 和 1:1 000 000 DEM 得到的 C_{n2s} 分别为 60.65 和 55.83;对于单元 2, C_{n2s} 分别为 86.78 和 84.41。以降雨量为 100mm 为例来分析坡度修正对不同计算单元产流量的变化,根据式(2)和式(3)分别计算了 2 个

单元和整个流域的产流量(见表 2)。对于单元 1 产流量相差 4.67, 分别占 1:250000 DEM 和 1:1000000 DEM 产流量的 29.2% 和 41.3%; 对于单元 2 产流量相差 5.11, 分别占 1:250000 DEM 和 1:1000000 DEM 产流量的 7.9% 和 8.6%; 对于流域面积平均值而言, 产流量相差 6.51, 分别占 1:

250000 DEM 和 1:1000000 DEM 产流量的 16.63% 和 20.00%。由计算结果可以看出, 经过坡度修正后, 由于 C_n 值的变化, 计算单元的产流量变化是不容忽视的。产流量对不同分辨率 DEM 所提取的坡度有较大的差别, 因此在进行流域径流模拟时应考虑 DEM 分辨率的影响。

表 2 经坡度修正后的单元 1 和单元 2 径流量对比

| 单元 | C_{n2} | $C_{n2}(a)$ | $C_{n2}(b)$ | 径流量 a | 径流量 b | 差值 | 差值占径流量 a 百分比 | 差值占径流量 b 百分比 |
|------|----------|-------------|-------------|-------|-------|------|--------------|--------------|
| 单元 1 | 55.00 | 60.65 | 55.83 | 19.39 | 13.72 | 5.67 | 29.20 | 41.30 |
| 单元 2 | 84.00 | 86.78 | 84.41 | 64.82 | 58.71 | 5.11 | 7.90 | 8.60 |
| 面积平均 | 69.20 | 73.87 | 69.95 | 39.14 | 32.63 | 6.51 | 16.63 | 20.00 |

注: a 代表 1:250000 DEM; b 代表 1:1000000 DEM。

研究区地势高峻, 约有 40% 的地区坡度在 0.35 以上, 30% 在 0.25~0.35 之间, 20% 在 0.06~0.25 之间, 10% 在 0.05 以下。从参数的物理意义角度来看, 由 1:250000 DEM 所提取的坡度值更接近于实际。虽然采用 1:250000 DEM 所需的数据准备、模拟计算以及后续处理工作量较大, 但对于流域径流模拟来说更可取。

4 结 语

(1) 本文应用 1992 至 2000 年资料模拟了研究区流域的径流量, 所得到的结果表明: 由 DEM 直接获取的数据和参数受到 DEM 分辨率的影响, 不同分辨率 DEM 对流域径流量有一定影响。在相同的输入数据条件下, 低分辨率的 DEM 较高分辨率的 DEM 径流量较小。

(2) 由不同分辨率的 DEM 所获取的坡度值相差较大, 对 SCS 模型中决定径流量的主要参数 C_n 值的变化有一定影响, 从而对流域径流量产生影响。

(3) 高分辨率 DEM 所得到的空间参数更能反映流域地形的实际情况, 虽然所需的处理工作量也较大, 但从参数物理意义和模拟精度角度来说更适于流域径流模拟。

[参 考 文 献]

- [1] 任立良, 刘新仁. 数字高程模型信息提取与数字水文模型研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 463—469.
- [2] Cho S M, Lee M W. Sensitivity considerations when modeling hydrologic processes with digital elevation model[J]. Journal of American Water Resources Association, 2001, 37(4): 931—934.
- [3] Piwowar J, LeDrew E F. Integrating Spatial Data: A User's Perspective. PE&RS, 1990, 56(11): 1497—1502.
- [4] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modeling: A Review of hydrological, geomorphological and biological application[J]. Int. J. of Hydrological Process, 1991, 5(1): 3—30.
- [5] Wolock D M, Price C V. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model [J]. Water Resources Research, 1994, 30(11): 3041—3052.
- [6] Wolock DM, McCabe G J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in topmodel. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1315—1324.
- [7] Kenward T, Lettenmaier D P, et al. Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. Remote Sensing of Environment, 2000(3): 432—444.
- [8] Valeo C, Moin S M. Grid—resolution effects on a model for integrating urban and rural areas. Hydrol Processes, 2000, 14(14): 2505—2525.
- [9] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modeling: A review of hydrological geomorphological, biological applications. Int. J. of Hydrological Processes, 1991, 5(1): 3—30.
- [10] Yin Z Y, Wang X H. A cross-scale comparison of drainage basin characteristics derived from digital elevation models[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(6): 557—562.
- [11] Wise S. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: (11—12): 1909—1929.
- [12] 汤国安, 杨勤科, 张勇. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究[J]. 水土保持通报, 2001(1): 53—56.
- [13] 赵牡丹, 陈正江, 晋锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模拟[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 55—57.

(下转第 56 页)

4.4 采用施吸水树脂等人工保水措施调节土壤水分

吸水树脂能包容大量水分子,在水中高度溶胀,因此,它与有机无机肥混合后施进丘陵土壤,在降水渗到土壤后,即大量吸持水分和溶于水中的非重金属

离子,提供植物吸收。施吸水树脂处理的土壤平均含水量分别比未施用的多7.2及17.2mm,甘蔗增产率分别高20.78%及17.68%。所以大田中每1/15hm²施用5kg吸水树脂的增产幅度也很可观(表4)^[2-4]。

表4 施用吸水树脂的效果

| 处理 | 0~30cm 土层含水量/mm | | | | 甘蔗增产/ % | 0~30cm 土层含水量/mm | | | | 甘蔗增产/ % |
|----|-----------------|--------|--------|------|------------|-----------------|--------|--------|------|------------|
| | 198610 | 198611 | 198612 | 平均 | | 198710 | 198711 | 198712 | 平均 | |
| 未施 | 49.2 | 48.4 | 57.5 | 51.1 | 0.0 | 65.9 | 57.8 | 70.5 | 64.8 | 0.0 |
| 施用 | 61.3 | 57.7 | 55.9 | 58.3 | 20.78 | 75.4 | 85.7 | 85.1 | 82.0 | 17.68 |

注:测定时间为198610,其余类推。

关于大田施用吸水树脂的情况,一般与腐熟有机肥、碎土、尿素、磷酸二氢钾充分混合后,施进已开浅沟的根际层,随后进行覆土掩埋;其施用时间最好放在每年9月上旬雨季结束之前。如果施用后长时间没有发生降雨,则应该通过灌溉补水,这样才能充分发挥吸水树脂的作用。

4.5 发展节水灌溉技术解决旱季土壤水源问题

灌溉是解决亚热带丘陵赤红壤旱季水分不足的最可靠办法。传统的地面灌溉,其灌溉用水浪费严重,大力推广和应用先进的节水灌溉技术势在必行。喷灌、滴灌技术的节水潜力很大,尤其是滴灌,因其属于局部灌溉,节水更多。研究表明^[5],传统的地面灌溉、喷灌、滴灌3种灌溉方式的用水量的大致比例为1:0.5:0.3;微灌还有一定的增产效果,与地面灌溉相比,果园滴灌省水68.1%以上,增产26.7%,

柑橘雾灌省水50%,增产30%~50%。可见,先进节水技术的节水增产效果是可观的。

[参 考 文 献]

- [1] 彭少麟,任海编. 亚热带森林生态系统的能量生态研究[M]. 气象出版社,1998. 11—13.
- [2] 张秉刚,卓慕宁,骆伯胜,等. 广东丘陵土壤水热资源及其开发利用[M]. 广州:广东科技出版社,1994. 1—76.
- [3] 钟继洪,张秉刚,唐淑英. 广东农业发展中的土壤物理问题及其管理[M]. 广州:广东科技出版社,1998. 63—120.
- [4] 郭庆荣,张秉刚,钟继洪,等. 丘陵赤红壤水分循环与平衡数学模型[M]. 热带亚热带土壤科学,1998,7(2): 138—142.
- [5] 石元春,刘昌明,龚元石. 节水农业应用基础研究进展[M]. 中国农业出版社,1995. 7—19.
- [14] Luzio M D, Srinivasan R, Arnold J F. ArcView Interface for SWAT2000, user's guide[M]. Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station,2001.
- [15] 袁艺,史培军. 土地利用变化对降雨径流关系的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2001,37(1): 131—136.
- [16] 贺宝根,周乃晟,高效江,等. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系—SCS法的修正[J]. 环境科学研究,2001,14(3):49—51.
- [17] 徐秋宁,马孝义,安梦雄,等. SCS模型在小型集水区降雨径流计算中的应用[J]. 西南农业大学学报,2002,24(2):97—100.
- [18] 罗立芳,张科利,符素华. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报,2002,22(3):58—61.
- [19] 张建云,何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. 水科学进展,1998,9(4):345—350.
- [20] USDA—SCS. National Engineering Handbook, hydrology Section 4, chap. 4—10[M]. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC, USA, 1972.
- [21] Thapa K. Accuracy of spatial data used in geographic information systems[J]. PE&RS, 1992(6):835—841.
- [22] Neitsch S L, Arnold J G. Soil and water assessment tool theoretical documentation[M]. Temple, Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service,2001.
- [23] Howes S, Anderson M G. Computer Simulation in Geomorphology[M]. In: Modeling Geomorphological Systems, M. G. Anderson(Editor). John Wiley and Sons Ltd., 1988. 320.
- [24] Overton D E, Meadows M E. Stormwater modeling [M]. Academic Press, New York, 1978. 320.
- [25] Walling D E, Webb B W. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: Some further comments[J]. In: Sediment Budgets. IAHS Publ, 1988,174:337—350.

(上接第35页)