

SCS-CN 模型在巢湖流域地表产流估算中的应用

董文涛¹, 程先富^{1,2}, 张群¹, 赵阳¹, 韩平¹

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241003)

摘要: 降雨径流是引起土壤侵蚀的主要动力, 因此预测不同降雨及下垫面条件下的径流量是土壤侵蚀预报和水土流失治理的关键。应用美国原水土保持局开发的流域水文模型 SCS-CN 模型对巢湖流域降雨—径流过程进行模拟。在 ArcGIS 9.2 软件支持下, 估算 2002—2006 年巢湖流域地表年径流量并分析了不同土地覆被类型的产流状况。结果表明, 巢湖流域地表降雨径流年际变化较大, 径流量变化范围为 591.323~1 557.136 mm。不同土地覆被类型产流能力依次为: 城镇用地>水田>未利用地>旱地>农村居民点>草地>林地>灌木林。

关键词: 地表径流估算; SCS-CN 模型; 巢湖流域; 产流能力

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)03-0174-04

中图分类号: P338+.9

Application of SCS-CN Model Estimating Surface Runoff to Chaohu Lake Basin

DONG Wen-tao¹, CHENG Xian-fu^{1,2}, ZHANG Qun¹, ZHAO Yang¹, HAN Ping¹

(1. College of Territorial Resource and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China; 2. Anhui Provincial Key Research Laboratory for Processes and Prevention of Natural Disasters, Wuhu, Anhui 241003, China)

Abstract: Runoff is the main power causing soil erosion. So, an accurate estimation of runoff in different rainfall and underlying surface conditions is the key to predict soil erosion and control soil and water loss. The SCS-CN model developed by Soil Conservation Service of USDA is applied to the simulation of surface rainfall-runoff processes in the Chaohu Lake basin. With the support of ArcGIS 9.2 software, annual surface runoff in the basin from 2002 to 2006 is estimated and runoff yield capability under different land cover types is analyzed. Results show that there is a greater inter-annual variation of runoff in the basin and runoff depth ranges from 591.323 to 1557.136 mm. The runoff yield capabilities under different land cover types may be ranged in the order of urban land > paddy field > unused land > dry land > rural areas > grassland > forest land > scrubland.

Keywords: surface runoff estimation; SCS-CN model; Chaohu Lake basin; runoff yield capability

降雨径流是引起土壤侵蚀的根本原因所在, 同时也将携带污染物进入水体, 对水环境质量造成严重影响。在水资源持续利用、非点源污染、区域水文循环等研究的推动下, 流域水文模型通过对流域降雨—径流过程的模拟得到广泛的应用, 如当前的集总式水文模型 TOPMODEL, CLASSIC, 分布式水文模型 HBV, DHSVM, HSPF, SCS 等^[1]。在众多的降雨径流量计算经验模型中, 径流曲线法 (SCS-CN) 经过长期发展与改进, 在当前研究中被公认和普遍推广。国内外文献研究也表明, 该方法用于流域地表产流

估算具有较强的适用性, 如 Amutha 和 Porchelvan^[2]通过 SCS 模型根据详细的降雨资料估算 Malattar 河子流域 1971—2007 年逐月径流量及逐年径流量, 刘贤赵等^[3]利用该模型对黄土高原王东沟流域 7 次降雨径流过程进行模拟, 均取得较为满意的模拟效果。

本文以巢湖流域为研究区, 估算流域年地表产流量及不同土地覆被类型下的产流能力, 对于巢湖流域地区水土保持与防洪、城市水文及水环境问题等具有重要意义。

收稿日期: 2011-06-24

修回日期: 2011-09-25

资助项目: 安徽高校省级自然科学研究重点项目“基于遥感和 GIS 的巢湖流域土壤侵蚀及其环境效应评价研究”(KJ2011A143); 教育部人文社会科学研究规划基金项目“水土流失视角下经济损失综合评价与生态管理模式研究: 以安徽大别山区为例”(12YJA790016); 博士点基金联合资助课题“巢湖流域洪涝灾害综合风险时空演变与情景分析”(20113424110002)

作者简介: 董文涛(1987—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 硕士研究生, 主要从事资源遥感与土地利用研究。E-mail: dwt111@126.com。

通信作者: 程先富(1967—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士生导师, 教授, 主要从事地理空间分析、自然灾害、土壤质量与环境等方面研究。E-mail: xianfucheng@sina.com。

1 流域概况

巢湖位于安徽省中部,水域面积 780 km²,自然条件优越,物产丰富,是我国著名的 5 大淡水湖之一。流域介于长江和淮河 2 大水系之间,其中巢湖闸以上区域面积为 9 130 km²,属于巢湖水体汇水范围,闸下裕溪河是巢湖水入长江的唯一通道。本研究所指即闸上区域,涵盖合肥市、肥东县、肥西县、长丰县、巢湖市、庐江县、含山县、六安市、舒城县等市县。流域属亚热带湿润性季风气候,年均气温 15~16℃,多年平均降雨量 1 100 mm 左右。时间、空间分布不均,6—8 月降雨量占全年总量的 39%。地形以丘陵、平原为主,西南地势较高,属大别山区,西北部为江淮丘陵,湖体东部及北部有零星山地。巢湖流域河网密集,湖泊、水库、渠塘及水田等广泛分布,入湖河流来自西、北、东 3 面,呈向心状分布。在降雨冲刷作用下,径流携带大量污染物质汇入巢湖,严重影响了湖泊水质,造成湖泊水环境恶化。

2 研究方法及应用

2.1 SCS-CN 模型原理

SCS-CN 模型,或称 SCS 径流曲线法,是美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service),即现在的自然资源保持局(NRCS)于 20 世纪 50 年代开发的小流域降雨径流统计经验模型^[4-5]。该方法在时间序列及空间分布基础上,能够客观反映不同土壤及地表覆被条件对降雨径流的影响,其显著特点是模型结构简单,所需输入参数少,是一种较好的集水区径流计算方法。

模型是建立在水量平衡公式(1)和 2 个相关性基础上,即径流量与滞留量的相关性公式(2)和初损量与最大可能滞留量的相关性公式(3):

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

$$F/S = Q/(P - I_a) \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

式中: P ——降雨量(mm); I_a ——初损量(mm),即径流开始前由于低洼储水、植被吸收、蒸发等因素造成的损失量; F ——实际滞留量(mm); Q ——实际径流量(mm); S ——径流开始前的潜在最大滞留量,或称持水系数; $P - I_a$ ——潜在的最大径流量(mm); λ ——初损率,取值范围 0~0.3,USDA—SCS 提出适用于较湿润地区的比例系数为 0.2^[6]。下同。由式(1)~(3)结合得到 Q 的表达式:

$$Q = (P - \lambda S)^2 / (P - \lambda S + S) \quad (P > \lambda S)$$

代入参数 λ 得到 SCS-CN 模型的典型计算公式:

$$Q = \begin{cases} (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) & (P > 0.2S) \\ 0 & (P \leq 0.2S) \end{cases} \quad (4)$$

可以看出,集水区的径流量取决于该区实际降雨量 P 以及降雨前潜在滞留量 S ,而潜在滞留量又与集水区的土壤质地、土地利用方式和降雨前的土壤湿润状况有关。SCS-CN 模型通过一个经验性的、综合反映上述因素的无量纲参数 CN 来推求 S ,即:

$$S = 25\,400 / CN - 254 \quad (5)$$

理论上,CN 取值范围为 0~100,实际条件下为 30~100。CN 反映了降雨前流域的综合特征,是 SCS 模型的最主要参数。CN 值的大小取决于土地利用现状、土壤类型及前期土壤湿润程度^[7]。美国水土保持局根据各种土壤渗透性将土壤类型分为 A(透水),B(较透水),C(较不透水),D(不透水)4 类水文学土壤组(hydrologic soil group, HSG),可以通过查找 NRCS—TR 55 手册^[8-9] 获取中等湿润状态(记为 AMC_2 ,其中 AMC 表示前期土壤湿润程度)下各土壤属性的 CN 值。处于干燥(AMC_1)及湿润(AMC_3)状态下的 CN 值,可以通过不同的方法进行校正,如 Sobhani(1975 年)所提出的校正方法^[10]:

$$AMC_1: CN_1 = CN_2 / (2.334 - 0.01334CN_2) \quad (6)$$

$$AMC_3: CN_3 = CN_2 / (0.4036 + 0.0059CN_2) \quad (7)$$

2.2 模型参数的确定

2.2.1 降雨量 P 值 在 ArcGIS 9.2 软件中,将巢湖流域各县区 2002—2006 年降雨量数据(表 1)添加到雨量站点图层属性表中,通过空间分析中的样条插值命令,将点状数据在全流域表面化,得到巢湖流域年降雨量参数 P 。

表 1 巢湖流域各县市降雨量

县市名	降雨量/mm				
	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
肥东县	987.9	1 305.7	868.6	976.5	954.0
巢湖市	1 061.7	1 278.8	1 143.7	1 235.8	1 044.6
含山县	1 125.3	1 290.1	1 139.1	1 185.0	1 065.3
无为县	1 364.6	1 549.0	1 174.7	1 255.4	1 187.2
庐江县	1 275.9	1 553.9	1 123.5	1 375.3	1 208.1
舒城县	1 296.4	1 402.7	981.3	1 079.0	1 123.0
六安市	1 352.3	1 505.7	903.4	1 044.2	1 102.0
肥西县	1 197.3	1 303.3	850.2	966.2	1 005.6
合肥市	1 085.3	1 404.6	908.3	1 003.5	995.7
长丰县	1 087.9	1 474.0	757.4	978.7	955.9
岳西县	1 494.0	1 389.0	1 437.0	1 546.0	1 462.0
潜山县	1 650.8	1 528.3	1 159.2	1 177.9	1 389.0
桐城市	1 316.6	1 374.0	1 162.0	1 173.0	1 250.5
霍山县	1 542.5	1 865.5	1 284.1	1 437.1	1 379.0

2.2.2 径流曲线数 CN 值 CN 是 SCS-CN 模型的主要参数,是一个定量化综合指标。CN 反映了流域下垫面条件对产流汇流的影响,可用一组曲线描述,故又称径流曲线数^[11]。CN 值与流域的土地覆被类型、土壤的土地覆被透水性及前期土壤含水量有关。图 1 表示利用 GIS 软件提取 CN 因子的流程。

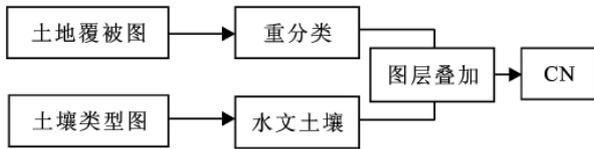


图 1 CN 因子提取流程

土地覆被及土壤类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所地球系统科学数据共享平台及人地系统主题数据库,均为 2000 年数据。首先,参照 SCS-CN 估算模型的取值条件^[12],将现有土地覆被类型分为 9 类有利于 CN 取值的类型,即水田、旱地、林地、灌木林、草地、水体、城镇用地、农村居民点用地和未利用地。将道路、工矿区、采石场等用地归为城镇用地;草地所占面积较小,仅为 3.4%,不在划分其覆

盖度类型。参照美国水土保持局 TR-55 手册给出的取值条件^[11],各种土地覆被类型所对应的水文土壤组(HSG)分类值如表 2 所示。其次,根据研究区土壤资料,巢湖流域约有 9 个土类,20 个亚类,51 个土属。将 51 种土属类型按表 3 中所示划分 CN 类别,得到 4 类水文土壤组(不含水体),可见巢湖流域土壤类型以 C 类较不透水为主。由于本文是采用年降雨资料估算年地表直接产流量,而不是模拟单场降雨径流事件,参数的校正在考虑流域多年平均降雨量及土壤含水量基础上,选择中等湿润状态下的 CN 值^[12]。

表 2 巢湖流域不同土地覆被类型的 CN 值

土地覆被类型	A	B	C	D
水田	74	80	85	91
旱地	68	77	83	89
林地	38	58	70	77
灌木林	41	56	68	77
草地	46	67	79	84
水体	100	100	100	100
城镇用地	72	83	90	92
农村居民点用地	64	75	81	85
未利用地	72	80	85	91

表 3 巢湖流域土壤各土属的 CN 类别

CN 类别	土属类型
A	砾质土、砂砾土
B	砂土、麻砂土、黄棕壤性土、暗棕土、砂质田
C	黄棕壤、暗黄棕壤、马肝土、黄白土、黑色石灰土、棕色石灰土、紫色土、泥质田、砂泥田、石灰泥田、潮沙泥田、棕红泥田、黄白土田、黑姜土田、复石灰泥田、青泥田、青石灰泥田、青丝泥田、烂泥田、淀板田、澄白土田
D	红棕土、淹育马肝土、马肝田、青马肝田、青沙泥田、脱青马肝田、湖泥田、青湖泥田、脱青湖泥田

在 ArcGIS 9.2 环境下,将土地利用图与土壤分类图叠加,在栅格计算器中给各种类型的栅格进行赋值,得到 SCS-CN 模型的 CN 值因子栅格图(如图 2 所示),然后输出巢湖流域 2006 年地表径流量图(图 3)。

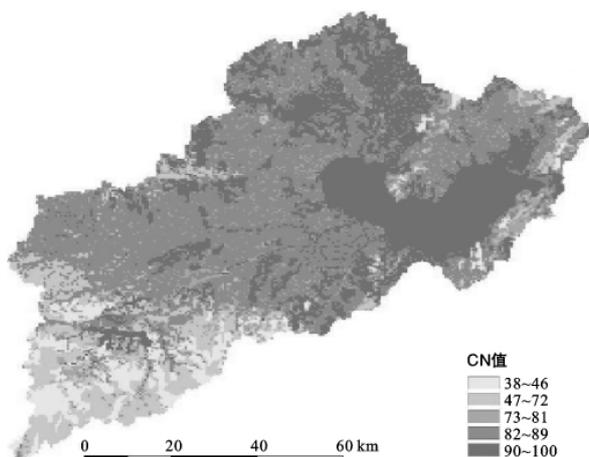


图 2 巢湖流域 CN 参数

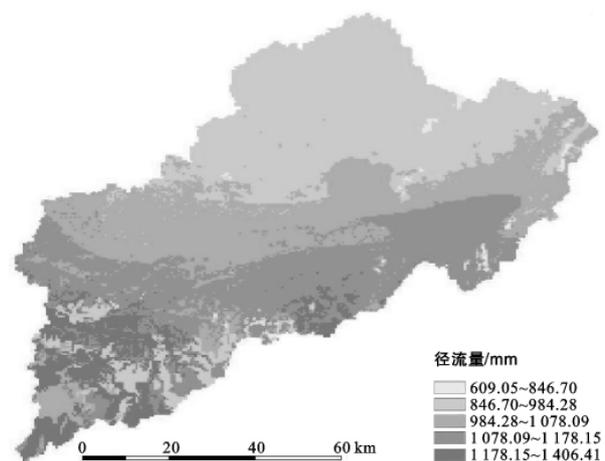


图 3 巢湖流域 2006 年地表径流量

2.3 结果输出

CN 值因子确定后,利用式 5 通过栅格计算器输入计算潜在最大滞留量 S ,将参数 S 及参数 P 代入式(4),可得巢湖流域 2002—2006 年年地表径流量 Q 及

其空间分布。图3仅表示2006年流域地表年径流量。通过该方法估算流域年产流量其结果的可靠性可以根据实际监测资料计算产流偏差 D_v :

$$D_v = (Q_m - Q) / Q_m \times 100\% \quad (8)$$

式中: Q_m ——实际监测所得到的产流量; Q ——估算产流量。与流域水文年鉴数据对比表明,结果偏差 D_v 在可接受的范围内,因此用SCS方法模拟巢湖流域降雨径流过程是可行的。

2002—2006年地表年径流量值按照不同土地利用类型进行区域栅格统计,可以得到不同土地覆被类型的产流状况。结合年均降雨数据,以此可以比较不同覆被类型的产流能力(表4)。因为模型以年降雨量作为输入参数,且不考虑径流形成后的损耗情况,以此计算的产流量及产流能力数值相对偏大因而使对比效果不明显,但可以反映实际地表即时产流状况^[13]。

表4 巢湖流域不同土地覆被类型的产流能力比较

年份	水田	旱地	林地	灌木林	草地	城镇用地	农村居民点	未利用地
2002	0.961	0.949	0.854	0.836	0.900	0.970	0.946	0.962
2003	0.967	0.958	0.861	0.840	0.911	0.976	0.955	0.965
2004	0.953	0.942	0.823	0.804	0.888	0.964	0.935	0.952
2005	0.958	0.948	0.835	0.815	0.862	0.968	0.942	0.956
2006	0.956	0.945	0.838	0.821	0.893	0.967	0.940	0.957

注:产流能力是指产流量平均值与降雨量平均值的比值。

3 结论

本文利用巢湖流域的年降雨资料及土地利用、土壤类型等GIS数据,根据流域自然条件对模型参数进行选择并修正,通过SCS-CN模型估算流域地表产流状况。

(1) 巢湖流域降雨径流年际变化比较大。2002—2006年,流域年降雨量变动范围为823.13~1630.96mm,年径流量变动范围为591.32~1557.136mm。各年份地表径流量平均值分别为1167.11,1363.57,946.05,1066.16,1036.72mm。2003年流域年地表径流量数值最大,主要是由于该年流域平均降雨量明显多于其他年份。从空间上看,流域南部年地表径流量值较大,是因为该处降雨量因子大于CN值对年地表径流量的影响,由此可见,地表径流量取决于降雨量 P 和综合指标CN这2个参数。

(2) 各种土地覆被类型产流能力依次为:城镇用地>水田>未利用地>旱地>农村居民点>草地>林地>灌木林。结果表明,城镇用地、耕地、农村居民点等用地类型产流能力较强,而植被覆盖度较大的草地、林地等覆被类型对径流有明显的截留效应。

SCS-CN模型结构简单,所需参数易于获取,在集水区地表径流等水文估算中应用较为广泛。以该方法估算径流量能够反映不同地表覆被条件下的产流情况,尤其是在小流域地表径流模拟中取得了较好的模拟效果^[14]。通过在巢湖流域的应用,一方面验证了

SCS径流曲线方法在流域的适用性,同时对不同覆被类型的产流能力做了初步分析。另一方面可为流域的水土保持及非点源污染等进一步研究提供数据支撑。

[参考文献]

- [1] 徐宗学,程磊.分布式水文模型研究进展与展望[J].水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [2] Amutha R, Porchelvan P. Estimation of surface runoff in malattar sub-watershed using SCS-CN Method[J]. Indian Society of Remote Sensing, 2009,37(2):291-304.
- [3] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,等.基于地理信息的SCS模型及其在黄土高原小流域降雨径流关系中的应用[J].农业工程学报,2005,21(5):93-97.
- [4] Bosznay M. Generalization of SCS curve number methods[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1989,155(1):139-144.
- [5] Mishra S K, Singh V P, Sansalone J J, et al. A modified SCS-CN method: characterization and testing[J]. Water Resources Management, 2003,17(1):37-68.
- [6] 房孝铎,王晓燕,欧洋.产流曲线数法(SCS法)在降雨产流量计算中的应用:以密云石闸产流试验小区为例[J].首都师范大学学报:自然科学版,2007,28(1):89-92,102.
- [7] 沈涛,刘良云,马金峰,等.基于L-THIA模型的密云水库地区非点源污染空间分布特征[J].农业工程学报,2007,23(5):62-68.
- [8] Soil Conservation Service. Hydrology, Section 4. SCS National Engineering Handbook [S]//U. S. Department of Agriculture. Washington, D. C., 1985.

(下转第187页)

模型影响显著;摩擦系数取值对费祥俊模型和 Iverson 模型影响均较大,因此还需要进一步开展这 2 个参数的取值研究。

(3) 各模型建模的基本假定不同: Bagnold 模型和 Takahashi 模型认为黏性泥石流为牛顿体,费祥俊模型认为黏性泥石流处于紊流状态。一些研究者已经开始了泥石流内部流速的测量工作^[18-19],因此除利用平均流速对模型进行检验外,对垂向流速分布的研究有望提供进一步的检验手段。

[参 考 文 献]

- [1] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004:21-22,106-109,229-230.
- [2] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990:118-123.
- [3] 中国科学院兰州冰川冻土研究所,甘肃省交通科学研究院. 甘肃泥石流[M]. 北京:人民交通出版社,1982:27-43.
- [4] 程尊兰,刘雷激. 西藏古乡沟泥石流流速[J]. 山地研究,1997,15(4):293-295.
- [5] 舒安平,费祥俊. 黏性泥石流运动流速与流量计算[J]. 泥沙研究,2003(3):7-11.
- [6] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonian fluid under shear [C]// Proceedings of the Royal Society A, 1954,225:49-63.
- [7] Takahashi T. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures [M]. Taylor & Francis, Leiden, 2007:92-101.
- [8] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004:160-178.
- [9] Iverson R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997,35(3):245-296.
- [10] Phillips R J, Armstrong R C, Brown R A. A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration [J]. Phys. Fluids, 1992,A4(1):30-40.
- [11] Savage S B, Iverson R M. Surge dynamics coupled to pore-pressure evolution in debris flows [C]// Rickenmann D, Chen C L. Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Rotterdam: Millpress, 2003:503-514.
- [12] 王裕宜,詹钱登,严璧玉,等. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2001:5-7.
- [13] 康志成,崔鹏,韦方强,等. 中国科学院东川泥石流观测研究站观测实验资料集(1961—1984)[M]. 北京:科学出版社,2006:136-138.
- [14] 王裕宜,邹仁元,刘岫峰. 泥石流启动与渗透系数的相关研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):76-82.
- [15] 王裕宜. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究[J]. 中国地质灾害和防治学报,1996,7(2):12-20.
- [16] 胡明鉴,汪稔,张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(12):1831-1934.
- [17] 魏厚振,汪稔,胡明鉴,等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学,2008,29(1):48-52.
- [18] Itakura Y, Kitajima T, Endo K, et al. A new double dual-axes accelerometer debris-flow detection system [C]// Wiczorek G F, Naeser N D. Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Rotterdam: Balkema, 2000:273-281.
- [19] Hanisch J, Ergenzinger P, Bonte M. Dumpling: an “intelligent” boulder for studying internal process of debris flows [C]// Rickenmann D, Chen C L. Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Rotterdam: Millpress, 2003:843-849.
- [12] Shadeed S, Almasri M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine [J]. Water Science and Engineering, 2010,3(1):1-13.
- [13] Mishra S K, Singh V P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(17):3323-3345.
- [14] Liu Xianzhao, Li Jiazhu. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China [J]. Chinese Geographical Science, 2008,18(3):235-241.

(上接第 177 页)

- [9] U. S. Soil Conservation Service. Technical Release 55: Urban hydrology for small watersheds[M]. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C., 1986(55):49-52.
- [10] Mishra S K, Jain M K, Babu P S, et al. Comparison of AMC-dependent CN-conversion formulae [J]. Water Resources Management, 2008,22(10):1409-1420.
- [11] Iowa State University Institute for Transportation. 2C-5 NRCS TR-55 methodology[Z]. Iowa Stormwater Management Manual, 2008,12.