深圳市土地利用变化对流域径流的影响

史培军, 袁 艺, 陈 晋
(北京师范大学资源科学研究所, 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京, 100875)

摘要: 土地利用所引起的流域下垫面变化严重影响着洪涝灾害的致灾过程。以深圳市为例, 探讨下垫面条件对流域径流过程的影响, 应用美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service)研制的小流域设计洪水模型——SCS 模型对深圳市部分流域进行了径流过程的模拟, 重点分析了土地利用方式、土壤类型、前期土壤湿润程度等下垫面因素以及降雨因素对降雨-径流关系的影响。结果表明, 随着人类活动的加剧, 土地利用的变化使径流量趋于增大; 降雨强度越大、前期土壤湿润程度越大, 土地利用变化对径流量的影响越小。降雨-径流的空间格局随土地利用方式、土壤类型、前期土壤湿润程度而发生变化, *CN* 值(Curve Number)的高值区主要集中在城市用地和水体; 低值区主要出现在林地、灌草地、果园等植被覆盖较好、地势起伏较大的地区。

关键词: 土地利用变化; 降雨-径流关系; SCS 模型; 深圳

The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China

SHI Pei-Jun, YUAN Yi, CHEN Jin (*Institute of Resources Science, Beijing Normal University; Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: The land cover change induced by the land use of human beings is the main cause and important part of eco-environment change. The effect of land use on natural disasters is one of the main processes. Flood disaster is one of the disasters, the number of which is most and the loss of which is the most serious. The effect of land use on rainfall-runoff process is studied to understand the relationship between land use and flood disaster. In the flood generation process, the effect of land use pattern and intensity on runoff generation and concentration is the foundation to study the change of urban flood caused by the human activities. Revealing the mechanism of land use on the flood generation is important to reduce urban flood disaster. The first important issue, which should be answered, is how the land use pattern influences the change of runoff coefficient and the mechanism of runoff generation and concentration. Shenzhen City has grown to a modernized city from a fishery village after it was assigned as the first Special Economic Zone in China from 1980. With more than twenty years economic reform and opening, the great changes of land use patterns in Shenzhen City are inevitable. So, Shenzhen City is taken up as case study area to study runoff change due to land use change. Based on the data of land use, hydrology and meteorology, SCS model, developed by Soil Conservation Service (SCS), U.S.A., is applied to study the rainfall-runoff relationship of some rivers in Shenzhen City. The following is the main conclusions of the paper:

(1)Basin-scale hydrologic model is a good means to study the rainfall-runoff relation. Remote-sensing-based hydrologic model is one of main developing directions of basin-scale model in the future, and it has a good developing prospect. Based on the simulation process and result, SCS model is a good hydrologic model to study the rainfall-runoff relation in the regions being short of hydrological and meteorologic data. *CN* value in SCS model describes the relationship between rainfall and runoff, which reflects the runoff

基金项目: 国家自然科学基金(49671001)和国家自然科学重大基金(39899374)资助项目
收稿日期: 2001-01-02; **修订日期**: 2001-04-10
作者简介: 史培军(1959~), 男, 陕西靖边人, 博士, 教授。主要从事区域资源开发、自然灾害、环境演变的研究。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

generation capability of underlying surface unit in basins. Based on the definition of SCS model, *CN* value is the function of land use classes, soil classes and antecedent moisture conditions (AMC). Generally, the *CN* value is large while the runoff is large in certain underlying surface units.

(2) The spatial distribution of *CN* value is successive, reflecting the runoff generation capability of different underlying surfaces in spatial pattern. By analysing the *CN* contours of Shenzhen City, the spatial distribution of rainfall-runoff relationship changes along with the change of land use classes, soil classes and antecedent moisture conditions of soil. The regions of high values of *CN* are urban and water. The regions of low value of *CN* are forest, shrub grassland and orchard, and the elevation of these regions is comparatively high. According to the spatial distribution of *CN* contours, the land use changes caused by the urbanization is the main cause of the increase of runoff coefficient.

(3) According to the simulation results of storm runoff in Buji River Basin (one of the main tributaries of Shenzhen River), there are some important results. Firstly, the land use is one of the main factors which effect the rainfall-runoff relationship. The runoff increases from 1980 to 1994, and the relative increasing magnitude ranges from 1.6% to 62.9%. From 1980 to 1994, the economic development leads to the runoff coefficient transforming into high values. The increase of runoff coefficient following the land use change ranges from 0.021 to 0.075. Secondly, both the rainfall and the soil antecedent moisture condition influence the effect of land use on the rainfall-runoff relationship. On certain antecedent soil moisture conditions, the relationship between the change of land area of different runoff coefficients in Buji River Basin and the rainfall intensities is in the order 90% > 50% > 10%, namely the heavier the rainfall, the little the effect of land use on the rainfall-runoff relationship. Given precipitation, the relationship between the change of runoff coefficients from 1980 to 1994 and the antecedent moisture conditions is AMC I (dry condition) > AMC II (normal condition) > AMC III (wet condition), demonstrating when the antecedent soil moisture conditions become wetter, the land use change has a smaller effect on the change of the runoff. Finally, the changes of runoff coefficients in different times are different along with the change of the rainfall intensities or the change of the antecedent soil moisture conditions of soil. The maximum change appears in 1980. Then is 1988. The least is in 1994. The results imply that the land use changing to urban land weakens the effect of the rainfall intensity and the antecedent soil moisture conditions on the rainfall-runoff relationship.

Key words: land use change; rainfall-runoff relation; SCS model; Shenzhen City of China
文章编号: 1000-0933(2001)07-1041-09 **中图分类号**: X4 **文献标识码**: A

土地利用所引起的地表景观格局的变化是引起地表各种地理过程变化的主要原因,亦是区域环境演变的重要组成部分,其中土地利用对自然灾害的影响是这一过程的一种突出表现。洪涝灾害是受土地利用影响较大的灾种之一,土地利用的变化作为洪涝灾害的主要孕灾环境之一,严重影响着洪涝灾害的致灾过程。

人类在抵御洪涝灾害的过程中,不断认识到土地利用对洪涝灾害的影响程度。在美国,采取了各种非工程措施进行防洪建设,其中重要的一条就是调整土地利用政策。如在 1968 年美国洪水保险法通过之前,美国住房与城市发展部(HUD)就认为洪泛区管理不仅包括在洪泛区推行洪水保险,而且应该借助保险之力制订和推行长治久安的土地利用政策[1]。20 世纪 70 年代,日本连续遭受几次大水灾,1977 年 6 月开始实行"综合治水对策"[2],其内容是:为了预防因江河流域土地利用情况急剧变化引起的城市水灾一类的灾害,除发展原有河道治水设施外,还必须放眼整个流域,从广泛综合的角度推进土地利用格局的调整工作,以促使受人类活动影响过多的水文循环与自然环境相协调。近些年来,对因土地利用变化而受到影响的水文过程的研究得到普遍注意,森林水文学,以及对湿地水文、农田水文的研究相继出现。特别是随着城市化

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

的不断发展, 城市水问题日益严重, 导致了一门新兴和公认的分支——城市水文学的出现。城市水文学主要是研究城市化过程中发生的三大水文问题[3]: 水源问题、洪水问题和污水问题, 其中一点即为城市洪涝灾害问题。目前有关城市洪涝灾害的研究集中在流态的变化、洪峰频率分布的变化和设计洪水过程线的变化等方面, 这些变化实际上主要是由于城市特殊的土地利用方式使降雨-径流过程向极端情况发展——降雨满足洼地容蓄后, 全部形成地表径流进而转化为河川径流引起的。由此可见, 在洪水形成过程中, 土地利用方式与强度对流域产汇流过程的影响是最为基础的问题, 亦是当前本领域研究中的热点。揭示土地利用对流域水灾形成的影响机制有着十分重要的科学价值与减轻洪水灾害的实践意义。目前需要首先回答的问题是: 不同的土地利用方式是如何影响流域径流系数的变化, 进而影响产汇流的机制。为此, 本文选择土地利用变化迅速且近年来洪涝灾害日益严重的深圳市作为研究案例, 开展此项工作。

1　数据收集与研究方法

研究土地利用变化对流域径流过程的影响, 获取土地利用等流域下垫面数据以及水文、气象数据是研究的基础。本文采用根据季相一致的深圳市 1980 年(MSS)、1988 年(TM)、1994 年(TM)的LANDSAT 数据为基本信息源得到的土地利用分类结果[4, 5]作为土地利用变化的基础数据, 以此代表深圳从建国初期到 1997 年经历的 3 个经济发展阶段——成立阶段(1979 年前)、建设阶段(1980～1989 年)、产业转型阶段(1990～1997 年)——的土地利用状况。深圳市成立经济特区前是一个沿海渔村小镇, 水文、气象测站很少, 水文、气象数据缺乏。目前仅有 1953～1997 年的深圳市年、月降雨数据, 深圳市主要流域的多年平均降雨量和径流量, 深圳市 1954～1993 年年最大 24h 暴雨量等数据以及部分典型暴雨的降雨过程数据。

本项研究内容与目标以及案例地区的数据性质、收集情况决定了研究方法的选择, 研究方法又对数据的收集、整理做出了进一步要求。本文水文、气象数据的严重缺乏, 不宜使用一般的水文方法对流域径流过程进行模拟。更重要的是, 土地利用数据是遥感数据处理得到的结果, 这种面状的遥感信息与传统的水文模型的参数和结构不相适应[6, 7], 同时传统的水文模型很少直接或间接地将土地利用状况作为一个影响因素在模型设计中予以考虑, 因此选择遥感水文模型进行径流过程的模拟是适合本项研究的一种可行方法。为此, 本文选择美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service)研制的小流域设计洪水模型——SCS 模型对流域降雨-径流过程进行模拟, 目前该模型在美国及其他一些国家得到了广泛的应用, 在我国也有一些介绍和应用[6, 8～13]。SCS 模型的降雨-径流关系的最终表达式为[8]:

$$\left.\begin{aligned} Q &= \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, \quad P \geq 0.2S \\ Q &= 0, \quad P < 0.2S \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中, Q 为径流量(mm); P 为一次降雨的降雨总量(mm); S 为流域当时的可能最大滞留量(mm)。模型设计者引入下式以确定 S:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2}$$

其中 CN (Curve number)是一个无量纲参数。CN 值是 SCS 模型的主要参数, 用于描述降雨-径流关系, 已将前期土壤湿润程度(Antecedent moisture condition, 简称AMC)、坡度、土壤类型和土地利用现状等因素综合在一起。CN 值把流域下垫面条件定量化, 用量的指标来反映下垫面条件对产汇流过程的影响。因此 CN 值本身的意义并不限于作为 SCS 模型的一个重要参数, CN 值是反映降雨前流域特征的一个综合参数, 可以间接地综合反映人类活动对径流的影响, 也在水文模型参数确定和遥感信息使用之间建立了直接的联系, 为解决无资料地区的径流估算提供了新的手段。

2　研究结果

2.1　深圳市 CN 值的确定

CN 值在 SCS 模型中描述降雨-径流关系, 反映了流域下垫面单元的产流能力。根据模型含义, CN 值为土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度等下垫面因素的函数。一般地说, 在降雨一定的条件下, 产流量较大的土地利用类型、土壤类型、前期土壤湿润程度, 其 CN 值较大, 反之亦然。因此确定研究地区的

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

CN 值是径流模拟的首要任务。

土地利用数据如前文所述。SCS 模型有其特有的土壤分类系统。本文以广州地理所编写的《深圳地貌》(1983)中的土壤分类方法和土壤分类图为基础,对原有土壤分类进行了对应归并,得到了符合 SCS 模型的土壤分类结果。因土壤属性较稳定,将土壤分类结果作为不变值,用于模型计算中。*CN* 值同样受降雨前的流域内土壤湿润程度的影响。SCS 模型将土壤湿润程度根据前 5d 的总雨量划分为 3 类,分别代表干、平均、湿 3 种状态(AMC I、AMC II、AMC III),不同湿润状况的 *CN* 值有相互的转换关系。最终作者根据 SCS 模型提供的 *CN* 值查算表[8, 14],充分考虑深圳市的自然条件,参考有关研究者在 SCS 模型应用中所确定的 *CN* 值距阵[11, 12, 15]确定了深圳市 *CN* 值距阵(表 1)。

表 1 深圳市 SCS 模型 CN 值(AMC II)

Table 1 CN value of SCS model in Shenzhen City (AMC II)

土地利用 Land use	*CN* 的土壤水文分类 Soil groups of hydrology			
	A	B	C	D
高密度城市用地①	90	93	94	95
低密度城市用地②	60	74	83	87
耕地③	67	78	85	89
林地④	25	55	70	77
灌草地⑤	36	60	74	80
果园⑥	40	62	76	82
湿地⑦	32	58	72	79
裸地⑧	72	82	88	90
水体⑨	98	98	98	98

①High density; ②Low density; ③Arable land; ④Forest land; ⑤Shrub land; ⑥Orchard; ⑦Westland; ⑧Bare land; ⑨Water body.

2.2 深圳市 *CN* 等值线的分布

CN 值的空间分布是连续的,表示下垫面的产流效应在流域内的空间格局。*CN* 等值线形象地表示流域内各点的产流量。将获得的 3a 土地利用分类结果图分别与土壤分类图叠加,按照深圳市 *CN* 值查算表对各象元赋值,处理得到 1980、1988、1994 三年 3 种前期土壤湿润程度条件下的 *CN* 等值线图,分析等值线图认为: *CN* 的高值区,即产流量大的区域是水体、城市用地区域。在深圳市主要集中的区域有两部分:一部分集中在深圳市中南部的深圳市中心区(福田区和罗湖区),向东北发展到布吉镇;一部分集中在深圳西部沿珠江口一带,即为广深高速公路一线。*CN* 的低值区,即产流量小的区域是林地、草地等人类活动相对较弱的区域。主要集中在植被覆盖较好,地势相对起伏较大的低山、高丘陵地区,如吊神山(288m)、凤凰山(377m)、羊台山(587m)、塘朗山(430m)、梧桐山(944m)、梅沙尖(753m)等山地、丘陵区。

同一时期,随着前期土壤湿润程度由干向湿发展(AMC I→AMC II→AMC III),各个时期的 *CN* 等值线均变得稀疏。在深圳快速城市化发展时期(1980~1994 年),相同前期土壤湿润程度下 *CN* 等值线也发生了变化,产流高值区面积不断扩大,连通性加强,反之,产流低值区面积不断缩小,在等值线图上表现为变得更加细碎。各个时期产流高值区和低值区的相对中心位置没有明显变化,只是空间格局和各级土地面积有了一定的变化。为此,统计了不同时期深圳市 *CN* 值所占土地面积矩阵(表 2)。从表中可以看出从 1980 到 1994 年,*CN* 值低值部分的土地面积在减少,高值部分在增加。而这个时期正是深圳市经济迅速发展、快速城市化的时期,根据深圳市土地利用的统计结果,从 1980 年到 1994 年 14a 间,高密度城市用地从无到有,低密度城市用地从 1980 年占全市总面积的 0.38% 发展到 1994 年的 32.62%,实际面积增加了近 96 倍;而同一时期,林地、草地和耕地等第一性生产用地都有不同幅度的减少,其中以耕地减少幅度最大。可见,随着深圳市城市化程度的迅速提高,人类活动集中的土地利用类型,主要是城市用地的面积大幅度升高,而有较好保水作用或受人类开发较少的土地利用类型面积相应减少,这种土地利用结构的变化对生态环境的影响表现在水文效应上就是产流量的增强,在相同降雨条件下径流系数大大增加。而对于洪水灾害的形成,土壤下渗率较大、地表较粗糙的林地、草地、耕地面积的减少,而不透水面积较大、地表粗糙度较小的城市用地的增加必然使径流集中速度加快,径流量增大,造成洪峰增大和峰现时间提前的后果[16]。

2.3 模型的验证

根据深圳市气象站提供的 1956~1995 年的年、月降雨数据,以及一些流域的多年平均年降雨量和年径流量数据,对 SCS 模型在研究地区的应用进行了验证。首先根据深圳市气象站 1956~1995 年的年降雨数据,得到了该降雨序列的趋势线,分析认为深圳市的年降雨没有明显的上升或下降趋势,说明降雨不是深圳市的径流变化的主要原因,可以使用该降雨序列进行模拟计算。计算得到的各流域年径流量较实测年

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

径流量相比, 绝对误差在 40～ 90mm 之间, 相对误差在 5%～ 9% 之间, 表明模型的模拟结果基本符合实际情况, 因此, SCS 模型可以在深圳这类水文资料缺乏的地区进行径流模拟。

表 2　深圳市不同时期各级 CN 值所占土地面积矩阵

Table 2　The land area matrix of different CN values in Shenzhen City in 1980, 1988, 1994

CN 值 Curve number	指标 Index	前期土壤湿润程度 Antecedent moisture condition (AMC)											
		AMC I				AMC II				AMC III			
		1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994
30 以下	*A* (km^2)	32.4	31.4	22.5	- 9.9	16.8	17.9	14.1	- 2.7	0	0	0	0
	P (%)	2.1	2.1	1.5	- 0.6	1.1	1.2	0.9	- 0.2	0	0	0	0
31～ 40	*A* (km^2)	216.1	131.9	135.7	- 80.4	15.6	13.5	14.1	- 1.5	0	0	0	0
	P (%)	14.3	8.7	9.0	- 5.3	1.0	0.9	0.9	0.1	0	0	0	0
41～ 50	A (km^2)	21.5	100.3	92.4	+ 70.9	0	0	0	0	16.8	17.9	14.1	- 2.7
	P (%)	1.4	6.6	6.1	+ 4.7	0	0	0	0	1.1	1.2	0.9	- 0.2
51～ 60	*A* (km^2)	575.3	574.2	587.4	+ 12.1	216.1	131.9	135.7	- 80.4	15.6	2.5	0.4	- 15.2
	P (%)	38.1	38.0	38.9	+ 0.8	14.3	8.7	9.0	- 5.3	1.0	0.2	0.0	- 1.0
61- 70	*A* (km^2)	178.8	252.1	361.4	+ 182.6	293.9	371.8	349.2	+ 55.3	0	11.1	8.0	+ 8.0
	P (%)	11.8	16.7	23.9	+ 12.1	19.4	24.6	23.1	+ 3.7	0	0.7	0.5	+ 0.5
71～ 80	*A* (km^2)	423.7	353.9	219.9	- 203.8	472.7	451.6	380.4	- 92.3	216.1	131.9	135.7	- 80.4
	P (%)	28.0	23.4	14.5	- 13.5	31.3	29.9	25.2	- 6.1	14.3	8.7	9.0	- 5.3
81～ 90	*A* (km^2)	0	2.2	4.1	+ 4.1	432.7	457.2	531.4	+ 98.7	576.8	413.5	447.3	- 129.5
	P (%)	0	0.1	0.3	+ 0.3	28.6	30.2	35.2	+ 6.6	38.2	27.4	29.6	- 8.6
91～ 100	*A* (km^2)	63.9	65.7	88.3	+ 24.4	63.9	67.8	92.5	+ 28.6	686.4	934.9	906.3	+ 219.9
	P (%)	4.2	4.3	5.8	+ 1.6	4.2	4.5	6.1	+ 1.9	45.4	61.8	60.0	+ 14.6

* *A*: 指定 *CN* 值下的土地面积, *P*: 指定 *CN* 值下的土地面积占研究区总面积的比例; 1980～ 1994: 1980 年到 1994 年相应 *CN* 值的土地面积的变化量和变化比例 . *A*: the land area of different *CN* values; *P*: the proportion of land area of different *CN* values to the total area of the case study; 1980～ 1994: the change and the change proportion of the land area of different *CN* values from 1980 to 1994

2.4　设计暴雨径流的模拟

深圳河是深圳市的主要河流之一, 深圳经济特区的大部分地区位于深圳河流域。由于深圳河是深圳市与香港特别行政区的界河, 该流域的部分区域处于香港特别行政区内, 数据难以收集, 因此选择深圳河的主要支流——布吉河进行暴雨径流的模拟。布吉河上游流经布吉镇, 下游自北向南纵贯深圳市中心区, 在渔民村西北角汇入深圳河, 全长 17.72km, 流域总面积为 56.88km^2。近年来, 随着经济发展, 深圳河流域城市化加快。据统计, 深圳河全流域的城市化面积占全流域面积的 40%～ 50% 左右, 而在布吉河流域, 城市化面积所占比例达到 70% 左右。结果, 深圳河降雨汇流时间平均缩短了 15%, 而布吉河流域的降雨汇流时间平均缩短了 25%, 相应地布吉河洪峰流量平均增加了 22%[17]。

根据深圳雨量站年最大 24h 暴雨量的统计结果, 使用适线法计算得到布吉河流域年最大 24h 暴雨量理论频率曲线, 在此基础上, 选择频率为 1%、2%、5%、10%、50%、90%、95%、99% 的 8 种暴雨, 对 1980、1988、1994 年布吉河流域 3 种不同下垫面情况的 3 种不同前期土壤湿润程度的径流进行了模拟计算, 得到图 1, 分析得出:

① 相同时期、相同前期土壤湿润程度下, 随着雨量的增大, 径流量均呈明显增大趋势; ② 相同土壤湿润程度和各种指定降雨频率下, 径流量从 1980 年到 1994 年处于上升趋势, 径流量相对增加 1.6%～ 62.9%, 其增加量与前期土壤湿润程度的关系为 AMC I> AMC II> AMC III; ③ 相同土壤湿润程度下, 1980 年到 1988 年、1988 年到 1994 年、1980 年到 1994 年 3 个时段都表现出随着降雨量的增大, 径流增幅的绝对量增大, 而径流量的相对变化量和径流系数的变化量均呈减小的趋势[18]。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

径流系数综合反映了流域内下垫面对降雨-径流关系的影响。据此,在布吉河流域 3 个时期 *CN* 等值线图的基础上,依据 SCS 的产流公式,计算得到各点的径流量,进而根据径流系数的定义(任意时段内的径流深度与同时段内的降水深度的比值),得到了设计年最大 24h 暴雨频率为 90% (十年一遇的少水年)、50% (两年一遇的平水年)、10% (十年一遇的多水年) 的 3 组径流系数等值线图(见彩版Ⅰ)。横向比较,3 个不同时期(3 种土地利用状况)均表现出随暴雨量的增大,径流系数的高值区范围在不断扩大,随前期土壤湿润程度向湿润方向发展(AM C I→AM C II→AM C III),径流系数有同样的发展趋势;纵向比较,随着时间的推移,径流系数的高值区范围也在不断扩大。

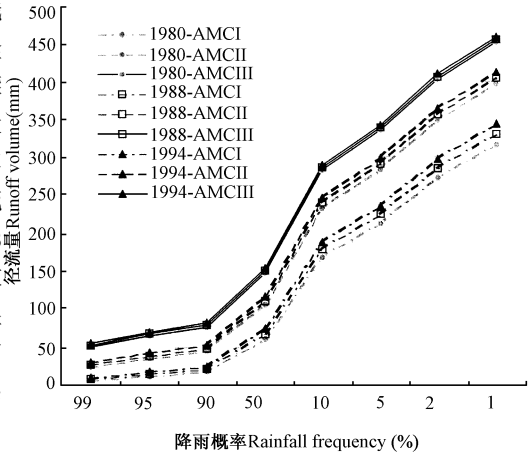


图 1 布吉河流域 1980～1994 年不同暴雨频率的暴雨径流量

Fig. 1 The runoff volume of different rainfall frequencies in Buji River Basin from 1980 to 1994

为了更好地说明径流系数的变化,计算得到了 3 种暴雨频率的径流系数土地面积矩阵(表 3～表 5)。根据表中数据得到:① 随着时间的推移(1980→1988→1994)、经济的发展,径流系数向高值方向发展,1980～1994 年各级径流系数所占土地面积变化量的正值部分集中在径流系数高值区。根据面积权重的计算方法,计算得到的综合径流系数(表 6)在一定暴雨频率、前期土壤湿润程度下均表现出随土地利用的变化而增大的规律,增大幅度在 0.021～0.075 之间。② 相同土壤湿润程度下,1980～1994 年的各级径流系数所占土地面积总的变化幅度与降雨频率的关系是 90% > 50% > 10%,综合径流系数的变化量同样表现为 90% > 50% > 10%,即为降雨强度越大,土地利用所引起的暴雨径流量的变化呈减少的趋势。这主要是因为:降雨在降雨初期首先要满足下渗和其他损失,然后才形成产流,而土壤的饱和率和其他损失一般都为一衡值,这样对于低频率、高强度的降雨来说,下渗和其他损失在降雨中所占的比例相对要小一些,相应的径流系数要大一些。可见强度越大的降雨,弱化了土地利用变化对流域降雨-径流关系的影响作用。③ 相同降雨条件下,1980 年到 1994 年的各级径流系数所占土地面积总的变化幅度以及综合径流系数的变化量与前期土壤湿润程度的关系均是 AM C I> AM C II> AM C III,亦即土壤湿润程度向湿润方向发展时,土地利用所引起的暴雨径流量的变化同样呈减少的趋势。前期土壤湿润程度是影响降雨-径流关系的又一个重要因素。通常,对一特定流域,植物截流、填洼可以近似视为一个常数。而下渗量在土壤类型、土地利用方式已确定的情况下,主要取决于前期土壤湿润程度。前期土壤湿润程度状况越干,不同土地利用类型之间的产流能力的差别也就越大。如果前期土壤湿润程度处于湿润状态,亦即土壤湿度近于饱和状态,对于新的降雨,土壤下渗潜力就小,结果也弱化了不同土地利用类型之间产流能力的差别。④ 根据表 4,各年径流系数随湿润程度的变化(AM C I→AM C III)而变化的关系在 3 种降雨频率条件下均表现为 1980> 1988> 1994,各年径流系数随降雨频率(90%～10%)而变化的关系在 3 种土壤湿润程度条件下也表现出同样的规律:1980> 1988> 1994,可见,当土地利用变化向城市化方向发展时,这种土地利用方式的改变也弱化了降雨强度和前期土壤湿润程度对降雨-径流关系的影响作用。

由此可见,流域下垫面条件对降雨-径流关系起着重要的影响作用,土地利用、土壤状况和前期土壤湿润程度是其中的重要因素,随着人类活动的日益加剧,特别是城市化的发展,所带来的土地利用变化成为流域内径流过程发生变化的重要原因之一,进而对洪水灾害的形成同样有着重要的影响作用。同时降雨性质是影响降雨-径流关系的另一个重要原因。综合降雨强度和前期土壤湿润程度在土地利用对径流过程影响中的作用,随着降雨强度的增大,且在降雨前期土壤湿润程度越湿润的情况下,土地利用的方式对产流能力的影响趋于减小,此时的降雨强度在降雨-径流关系中起决定作用,土地利用方式的作用较小,相反,降雨强度越小,降雨前的土壤越干,土地利用方式对降雨-径流关系的影响作用就越大。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

表 3　布吉河流域不同时期设计暴雨径流的径流系数所占土地面积矩阵(AMCI)

Table 3　The land area matrix of different runoff coefficients in Shenzhen City (AMCI) in 1980, 1988, 1994

径流系数 Runoff coefficient	指标 Index	90%				50%				10%			
		1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994
0.0～0.1	A (km^2)	22.5	18.5	14.7	-7.8	2.1	1.9	1.2	-0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	39.5	32.5	25.8	-13.7	3.7	3.4	2.1	-1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1～0.2	A (km^2)	15.0	12.5	8.2	-6.8	2.6	2.1	0.9	-1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	26.3	22.0	14.4	-11.9	4.5	3.6	1.6	-2.9	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2～0.3	A (km^2)	4.0	2.1	1.6	-2.4	17.8	14.7	12.5	-5.3	4.7	1.9	1.2	-3.5
	P (%)	7.0	3.7	2.8	-4.2	31.3	26.0	22.0	-9.3	8.2	3.4	2.1	-6.1
0.3～0.4	A (km^2)	12.1	18.2	25.7	+13.6	18.4	13.4	9.0	-9.4	0.0	2.1	0.9	+0.9
	P (%)	21.3	32.1	45.1	+23.8	32.4	23.6	15.8	-16.6	0.0	3.6	1.6	+1.6
0.4～0.5	A (km^2)	3.1	4.2	3.8	+0.7	0.9	13.6	22.5	+21.6	17.8	14.8	12.5	-5.3
	P (%)	5.5	7.5	6.7	+1.2	1.5	24.0	39.6	+38.1	31.3	26.0	22.0	-9.3
0.5～0.6	A (km^2)	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	7.6	6.3	-6.2	18.4	13.4	9.0	-9.4
	P (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	22.1	13.4	11.1	-11.0	32.4	23.6	15.8	-16.6
0.6～0.7	A (km^2)	0.0	1.2	2.4	+2.4	2.3	2.0	1.5	-0.8	12.6	19.0	26.5	+13.9
	P (%)	0.0	2.0	4.1	+4.1	4.1	3.5	2.6	-1.5	22.2	33.5	46.6	+24.4
0.7～0.8	A (km^2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.4	+2.4	3.1	4.2	3.8	+0.7
	P (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.1	+4.1	5.5	7.5	6.7	+1.2
0.8～0.9	A (km^2)	0.2	0.2	0.5	+0.3	0.2	0.2	0.5	+0.3	0.0	1.2	2.4	+2.4
	P (%)	0.4	0.4	0.9	+0.5	0.4	0.4	0.9	+0.5	0.0	2.0	4.1	+4.1
0.9～1.0	A (km^2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.5	+0.2
	P (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.9	+0.5

* 90%、50%、10%: 降雨频率; A: 指定径流系数下的土地面积, P: 指定径流系数下的土地面积占流域总面积的比例; 1980～1994: 1980 年到 1994 年各级土地面积的变化量。90%, 50%, 10%: the frequency of precipitation; A: the land area of different runoff coefficients; P: the proportion of land area of different runoff coefficients to the total area of the river basin; 1980～1994: the change of the land area of different runoff coefficients from 1980 to 1994. The same below.

表 4　布吉河流域不同时期设计暴雨径流的径流系数所占土地面积矩阵(AMCII)

Table 4　The land area matrix of different runoff coefficients in Shenzhen City (AMCII) in 1980, 1988, 1994

径流系数 Runoff coefficient	指标 Index	90%				50%				10%			
		1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994
0.0～0.1	A (km^2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1～0.2	A (km^2)	4.7	1.9	1.3	-3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	8.2	3.4	2.1	-6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2～0.3	A (km^2)	0.0	2.1	0.9	+0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	0.0	3.6	1.6	+1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3～0.4	A (km^2)	17.8	14.8	12.5	-5.3	4.7	4.0	2.2	-2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	31.3	26.0	22.0	-9.3	8.2	7.1	3.8	-4.4	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4～0.5	A (km^2)	18.4	13.4	9.0	-9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.9	1.2	-0.9
	P (%)	32.4	23.6	15.8	-16.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	3.3	2.1	-1.6
0.5～0.6	A (km^2)	0.9	13.6	22.5	+21.6	32.5	17.2	16.7	-15.8	2.6	2.2	0.9	-1.7
	P (%)	1.5	24.0	39.6	+38.1	57.2	30.3	29.4	-27.8	4.5	3.8	1.6	-2.9
0.6～0.7	A (km^2)	13.1	9.6	7.8	-5.3	3.9	11.0	4.8	+0.9	17.8	14.5	12.5	-5.3
	P (%)	23.0	16.9	13.7	-9.3	6.9	19.3	8.4	+1.5	31.2	25.4	22.0	-9.2
0.7～0.8	A (km^2)	1.8	0.0	0.0	-1.8	13.7	23.2	30.4	+16.7	18.7	13.8	9.0	-9.7
	P (%)	3.1	0.1	0.0	-3.1	24.1	40.9	53.4	+29.3	32.9	24.2	15.8	-17.1
0.8～0.9	A (km^2)	0.0	1.2	2.4	+2.4	1.8	0.7	1.6	-0.2	15.2	23.3	30.4	+15.2
	P (%)	0.0	2.0	4.1	+4.1	3.1	1.2	2.9	-0.2	26.7	40.9	53.4	+26.7
0.9～1.0	A (km^2)	0.2	0.2	0.5	+0.3	0.2	0.7	1.3	+1.1	0.5	1.4	2.9	+2.4
	P (%)	0.4	0.4	0.9	+0.5	0.4	1.2	2.2	+1.8	0.9	2.4	5.1	+4.2

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

表 5 布吉河流域不同时期设计暴雨径流的径流系数所占土地面积矩阵(AMC III)

Table 5 The land area matrix of different runoff coefficients in Shenzhen City (AMC III) in 1980, 1988, 1994

径流系数 Runoff coefficient	指标 Index	90%				50%				10%			
		1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994	1980	1988	1994	1980～1994
0.0～0.4	A (km^2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4～0.5	A (km^2)	2.1	1.9	1.2 - 0.9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	3.7	3.4	2.1 - 5.6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5～0.6	A (km^2)	2.6	2.1	0.9 - 1.7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	4.5	3.6	1.6 - 2.9		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6～0.7	A (km^2)	17.8	14.8	12.5 - 5.3		4.7	4.0	2.2 - 2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	P (%)	31.3	26.0	22.0 - 9.3		8.2	7.1	3.8 - 4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.7～0.8	A (km^2)	18.4	13.4	9.0 - 9.4		17.8	14.8	12.5 - 5.3	4.7	1.9	1.2 - 3.5		
	P (%)	32.4	23.6	15.8- 16.6		31.3	26.0	22.0 - 9.3	8.2	3.4	2.1 - 6.1		
0.8～0.9	A (km^2)	14.0	23.2	30.4+ 16.4		19.3	27.1	31.5+ 12.2	17.8	16.8	13.4 - 4.4		
	P (%)	24.5	40.9	53.4+ 28.9		33.9	47.6	55.4+ 21.5	31.3	29.6	23.6 - 7.9		
0.9～1.0	A (km^2)	2.0	1.4	2.9 + 0.9		15.1	11.0	10.7 - 4.4	34.4	38.1	42.2 + 7.8		
	P (%)	3.5	2.5	5.1 + 1.6		26.5	19.4	18.8 - 7.7	60.5	67.0	74.2+ 13.7		

表 6 布吉河流域不同时期设计暴雨径流的综合径流系数

Table 6 The runoff coefficients in Shenzhen City in 1980, 1988, 1994

降雨频率 Rainfall frequency	年份 Year	前期土壤湿润程度 Antecedent moisture condition (AMC)			
		AMC I	AMC II	AMC III	AMC I～AMC III
90%	1980	0.191	0.437	0.734	+ 0.543
	1988	0.224	0.475	0.759	+ 0.535
	1994	0.260	0.512	0.783	+ 0.523
	1980～1994	+ 0.069	+ 0.075	+ 0.049	—
50%	1980	0.347	0.594	0.827	+ 0.480
	1988	0.384	0.626	0.844	+ 0.460
	1994	0.421	0.657	0.861	+ 0.440
	1980～1994	+ 0.074	+ 0.063	+ 0.034	—
10%	1980	0.525	0.734	0.896	+ 0.371
	1988	0.558	0.758	0.907	+ 0.349
	1994	0.592	0.780	0.918	+ 0.326
	1980～1994	+ 0.067	+ 0.046	+ 0.022	—
90%～10%	1980	+ 0.334	+ 0.297	+ 0.162	—
	1988	+ 0.334	+ 0.283	+ 0.148	—
	1994	+ 0.332	+ 0.268	+ 0.125	—

* 1980～1994: 1980 年到 1994 年径流系数的变化量; AMC I～AMC III 代表前期土壤湿润程度从干状态(AMC I)发展到湿状态(AMC III)时径流系数的变化量; 90%～10%: 降雨频率从 90% 变化到 10% 时的径流系数变化量. 1980～1994: the change of the runoff coefficient from 1980 to 1994; AMC I～AMC III: the change of the runoff coefficient from the dry condition of soil to the wet condition of soil; 90%～10%: the change of the runoff coefficient from the precipitation frequency 90% to 10%.

4 结论与讨论

本研究根据土地利用等下垫面数据以及水文、气象数据, 应用 SCS 模型对深圳市部分流域的径流过程进行了模拟计算, 得到以下结论:

(1) 根据 SCS 模型对深圳市部分流域径流过程的模拟结果, 认为 SCS 模型可以应用在深圳这类水文资料缺乏的地区, SCS 模型是研究土地利用变化对流域径流过程影响作用的可行方法。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

(2) 通过对 SCS 模型主要参数 *CN* 值在深圳市的等值线分布的分析, 土地利用、土壤类型和前期土壤湿润程度等流域下垫面因素是影响流域降雨-径流关系的重要因素, 其中城市化过程所带来的城市用地的面积大幅度提高是土地利用变化使流域径流系数增加的主要原因。

(3) 根据对深圳市布吉河流域暴雨径流的模拟结果, 降雨性质也是影响降雨-径流关系的重要因素。降雨强度以及前期土壤湿润程度间接影响了土地利用对降雨-径流关系的影响作用: 降雨强度越大、前期土壤湿润程度越大, 土地利用变化对径流量的影响就越小。城市化发展所带来的土地利用方式的改变同时也弱化了降雨强度和前期土壤湿润程度对降雨-径流关系的影响作用。

参考文献

[1] Petak W J and Atkission A A. Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy. New York: Springer-Verlag Inc., 1982.

[2] 石原安雄, 大沢胖, 伯野元彦编. 李学良, 等译. 现代城市与自然灾害. 北京: 海洋出版社, 1988.

[3] Hall M J. 著. 詹道江, 等译. 城市水文学. 南京: 河海大学出版社, 1989.

[4] 史培军, 陈　晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析. 地理学报, 2000, **55**(2): 151～160.

[5] Chen J and Imura H. Study on the Regional Development, Land Use Change In China: Case Study in Shenzhen City, 1999 Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community. June, 21～26. Yokohama, Japan. 1999.

[6] 陆家驹. 遥感资料在水文模型中的有效应用. 水文, 1990, (6): 9～14.

[7] 王燕生. 遥感水文模型及其应用. 水文, 1989, (5): 20～24.

[8] 袁作新. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1990.

[9] 张建云. 地理信息系统及其在水文水资源中的应用. 水科学进展, 1995, **6**(4): 290～295.

[10] 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. 水科学进展, 1995, **9**(4): 345～350.

[11] 张仁杰. 从遥感信息到水文模型参数. 遥感信息, 1987, (1): 13～18, 28.

[12] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用. 环境遥感, 1992, **7**(4): 243～250.

[13] 潘剑君. 遥感技术对流域水文特征及其径流的定量研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, **2**(3): 88～92.

[14] Maidment D R. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill Book Company. 1992.

[15] Rango A. Assessment of Remote Sensing Input to Hydrologic Models *Water Resources Bulletin*, 1985, **21**(3): 423～432.

[16] 程晓陶, 仇劲卫, 陈喜军. 城市化与现代社会中的水害演变——从日本经历看今日深圳. 自然灾害学报, 1995, **3**(2): 41～48.

[17] Li C. Preliminary Study of the Effects of Urbanization on Flood and Tide and Environmental Characteristics of Shenzhen River Catchment, *Proceedings of Southeast Asia Regional Workshop on Urban Hydrology*, Shanghai: Hehai University Press. 1997. 40～45.

[18] 袁　艺, 史培军. 土地利用对流域降雨-径流关系的影响——SCS 模型在深圳地区的应用. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001, **37**(1): 131～136.

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

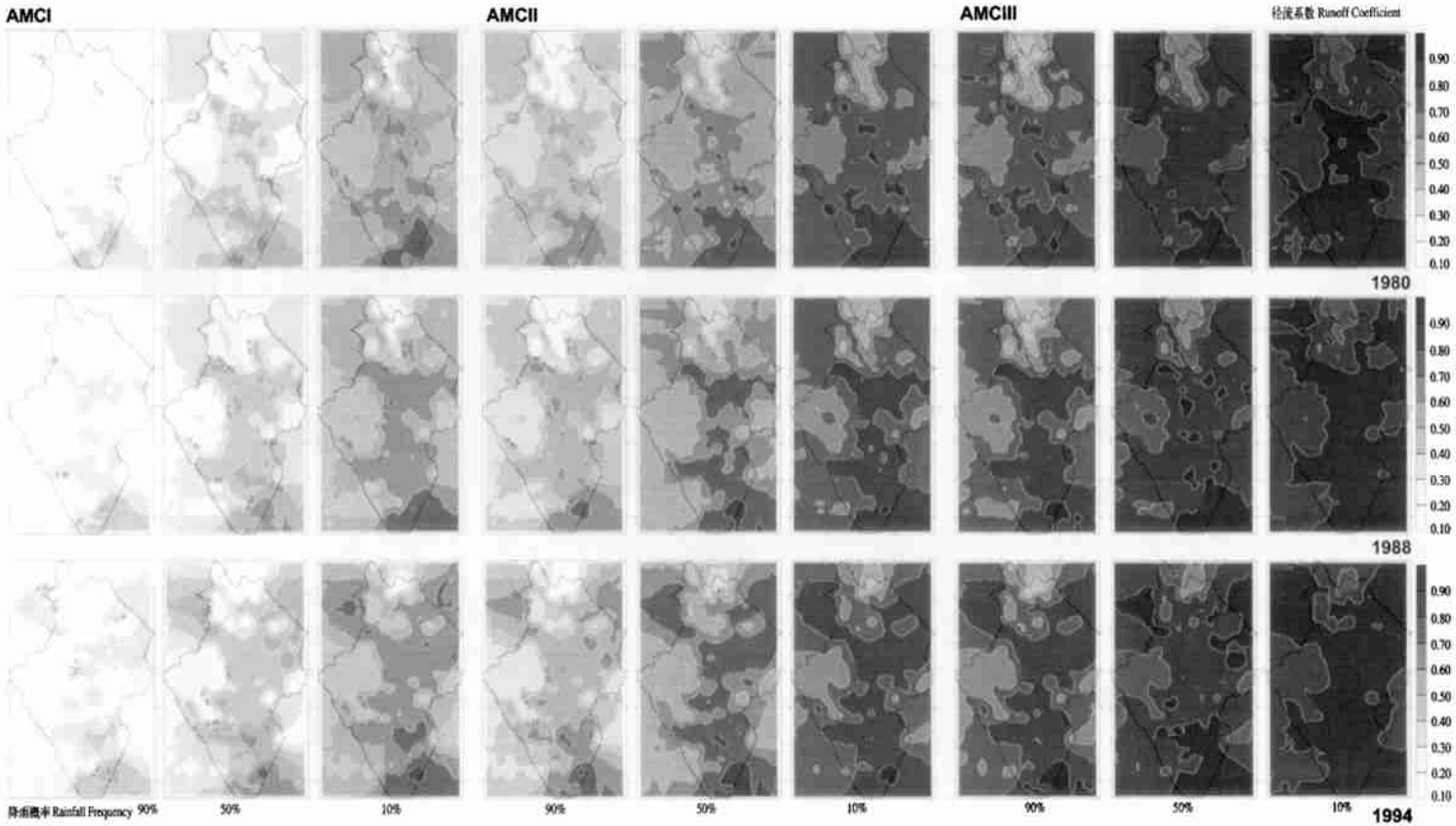
© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

深圳市土地利用变化对流域径流的影响

图版 I
Plate I

The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China

史培军，袁 艺，陈 晋
SHI Pei-Jun, YUAN Yi, CHEN Jin



布吉河流域 1980、1988、1994 年设计暴雨径流的径流系数等值线图

The runoff coefficient contour maps of storm runoff in Buji River Basin in 1980, 1988, 1994