

城市森林减少的暴雨径流效益定量与分析 ——以西安市二环内建城区为例

连军营, 刘康, 王俊, 梁轶, 张晶, 李西祥

(西北大学 环境科学系, 陕西 西安 710127)

摘要: 利用美国林业局的 ArcView GIS Citygreen 5.0 模型中的“Stormwater Analysis”分析模块, 以西安市 2003 年遥感影像图为基础, 对二环内 6 个不同功能区(公园、道路、文化区、商业区、工业区、居住区)土地覆盖情况进行数字化, 并结合西安市降雨统计资料和土壤水文特征, 定量研究了西安市城市森林减少的暴雨径流效益。结果表明, 以 32 mm 作为夏季一次 24 h 典型降雨事件的降雨量, 城市森林减少暴雨径流的总量为 150 682.06 m³。不同功能区的净截流量依次是居住区 > 道路 > 公园 > 文化区 > 工业区 > 商业区。不同功能区单位面积截流效益与森林覆盖率和硬铺装率有密切的联系, 表现为公园 > 道路 > 文化区 > 居住区 > 工业区 > 商业区。

关键词: 城市森林; 暴雨径流; SCS 水文模型; Citygreen 5.0 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)06—0028—04

中图分类号: S157.1

Quantification of Benefits from Storm-runoff Reduction by Urban Forest - A Case Study of the Second Ring Road of Xi'an City

LIAN Jun-ying, LIU Kang, WANG Jun, LIANG Yi, ZHANG Jing, LI Xi-xiang

(Department of Environment Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: By using the ArcView GIS Citygreen 5.0 model, six different land cover categories in the second ring road of Xi'an City were digitized, data of precipitation and soil hydrologic characters were analyzed, and benefits from storm-runoff reduction by urban forest were quantified. It was found that the total benefit from storm-runoff reduction was 150 682.06 m³ for the typical 24 h storm events of 3.2 cm in summer. Landuse categories, in terms of the net discharge reduction, were in the descendant order of residential area, road, park, culture area, industrial area, and commercial area. The storm-runoff reduction benefit per hectare was mainly related to impervious surface and forest coverage, and landuse categories were in the descendant order of park, road, culture area, industrial area, residential area, and commercial area.

Keywords: urban forest; storm-runoff; SCS hydrologic model; Citygreen 5.0 Model

当土地利用从农村变为城市时,地表将被不透水表层覆盖。同时,由于植被减少和排水线路改变,导致地表径流水文特征发生显著的变化^[1]。例如,20 世纪 70 年代对原苏联明斯克市 Svisloch 河的研究发现,城市化使河流的年平均流量每年增加约 3 m³/s,相当于天然流量的 50%。城市化过程对城市水文的影响主要表现为:增大了洪峰流量,增加径流量以及缩短了积流时间。道路以及建筑物的屋顶,都会增加城市中不渗透表面的面积。落在这些硬铺装表面的雨水很快就会汇流到下水道中,这增加了城市雨水溢流的严重性和发生几率^[2]。通常雨水会通过排水沟、

下水道等人工集雨设施收集,经过处理或直接排放。这势必增加了基础设施建设和维护的费用,也增加了财政负担。在这种情况下,城市森林的生态服务功能越来越受到人们的重视。

森林具有涵养水源和稳定水文的功能。森林对径流的调节作用首先表现在林冠截流上。森林截流率随林分郁闭度的增大而增大。当降雨量很小(降雨量 5 mm)、林冠密集时,可将降雨全部截流;只有当降雨强度很大或林冠含水量已近饱和状态时,截留率才降到 5%以下或为 0。另外,森林通过乔灌木、草本层和凋落物层对降水的层层截持,以及林地土壤良好

渗透性,使林地的地表径流减少,从而起到消减洪水和延缓洪峰的作用^[3]。城市环境中的城市绿地的量,是一个可操控的因素,这一因素对雨洪径流量的影响是重要的,也是可以度量的。国内对自然森林涵养水源和保持水土的生态服务功能研究报道较多^[4-7],但对城市森林减少城市雨洪径流效应的量化研究报道较少。本研究以西安市2003年遥感影像图为底图,通过确定不同土地利用和覆盖状况,运用美国林业局开发的GIS软件ArcView Citygreen 5.0,定量研究西安市城市森林减少暴雨径流的生态服务功能,以期在城市土地利用决策提供参考,并尝试为城市森林生态效益定量研究介绍一种方法。

1 研究区概况

西安市位于北纬33°42′—34°44.5′,东经107°40′—109°49′之间的关中平原中部,地处关中盆地,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。地区年平均气温13.1~13.5℃,年降水量为504.7~982.8mm。城市建成区绿地率达到20.76%,绿化覆盖率达35.06%,人均公共绿地面积5.3m²^[8]。西安市城市绿化型植被,主要由城区行道树、公园绿地构成,以中槐(*Sophora japonica*)、法桐(*Platanus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、钻天杨(*Populus nigra var. italica*)、雪松(*Cedrus deodara*)、五角枫(*Acer truntacum*)、大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等为主要树种。“四旁”(村旁、路旁、宅旁、水旁)绿化植物种类主要是钻天杨、新疆杨(*Populus alba cv. pyramidalis*)、云杉(*Picea asperata*)、垂柳(*Salix babylonica*)、旱柳(*Salix matsudana*)、榆树(*Ulmus pumila*)、皂角(*Gleditsia sinensis*)等。其中中槐、榆树、泡桐、钻天杨占了大部分。研究范围选在二环城建区内,主要考虑到二环内城市化程度较高,城市森林的生态效益更加明显,而且在对模型没有进行修正的情况下,误差相对较小,结果更准确。

2 研究方法

2.1 ArcView GIS Citygreen 模型介绍

Citygreen模型是依托ERSI公司的GIS软件ArcView 3.x开发的功能扩展模块。1996年美国林业局发行了Citygreen模型的第一个版本,2002年美国林业局又发表了Citygreen 5.0版,除了保持先前版本的功能之外,作了许多改进,提供了更为友好的界面,操作更为简单方便,增强了基础数据库,分析功能得到极大的提高。Citygreen模型在美国的城市森

林研究中得到了广泛的应用,美国的芝加哥、休斯敦、亚特兰大、丹佛、加兰等数10个大型城市利用Citygreen模型进行了详细的效益分析,为决策者提供了依据^[9-10]。模型对森林生态效益的分析主要分5个方面:节能效益、减少城市暴雨径流效益、净化城市空气效益、碳储存和吸收效益以及提供野生动物生境。其中减少城市暴雨径流效益的估算,主要是基于SCS模型。

2.2 SCS 模型

SCS模型是美国农业部水土保持局于1954年开发的流域水文模型,被广泛应用于美国及其它国家^[11]。SCS模型最初是基于小流域设计开发的,Ponc和Hawkins认为该模型只能运用于小流域计算^[13],而不适合在大流域进行径流计算。与其它模型相比,SCS模型的显著特点和优点是模型结构简单,参数少,而且适于无资料地区^[13]。

模型的基本原理是在综合考虑了流域降雨、土壤水文类型、土地利用方式及管理水平和径流间关系的基础上,确定土地利用状况或称土壤覆盖综合标号CN(curve number)。SCS模型径流方程为

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

式中:Q——径流量(mm);P——总降雨量(mm);S——可能最大滞留量(mm);I_a——初始总损失量(mm),主要指植被截流、表层填挖蓄水、下渗等,它是一个非常不稳定的变量,但是通常与土壤和植被覆盖类型相关。通过对大量小农业流域的研究,可以得到S和I_a之间的一个经验公式

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

由公式(1)和公式(2)可得:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & \text{当 } P > 0.2S \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } P \leq 0.2S \text{ 时} \end{cases}$$

S和CN之间存在一定的关联,如下

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

CN的范围是从0~100。P、Q、CN之间的关系见图1。在计算城市森林的暴雨径流效益时,由于S的值较大,也比较难估算,因此,确定CN的值便成为工作的关键。

2.3 研究方法

本研究基于美国林业局的ArcView GIS Citygreen 5.0模型中的“Stormwater Analysis”,根据西安市土地利用状况,对西安市2003年快鸟遥感影像图矢量化,结合土壤水文类型,可以确定不同土地覆盖和土壤水文类型条件下的CN值。统计西安

市 2002 和 2003 年夏季 24 h 降水数据,估算城市森林减少暴雨径流的效益。其中,土地利用分为 6 个类型:公园,共 269.25 hm²;道路,共 829.30 hm²;文化区,共 708.42 hm²;工业区,共 567.92 hm²;商业区,共 1 340.63 hm²;居住区,共 3 564.52 hm²。土壤水文类型分为 A,B,C,D 共 4 类(如表 1)。

数字化过程中,“有冠树木”主题确定树木的分布情况,同时提供 3 种供选择的树下覆盖情况:凋落物、草皮和硬铺装表面。“非有冠树木”主题确定树木覆盖范围以外的情况,包括建筑物、道路、水体、灌木等。根据不同覆盖情况和土壤水文类型得到 CN 值。

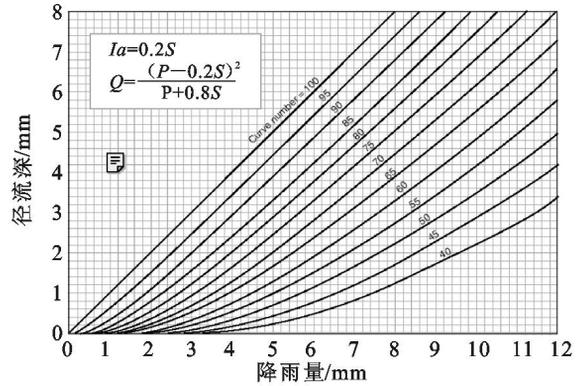


图 1 降雨、径流和 CN 的关系图
(注:来自于美国水土保持局 TR55 规则)

表 1 不同土壤水文类型划分

土壤水文类型	稳渗率/(mm·h ⁻¹)	产流描述	土壤描述	土壤类型(质地)
A	7.6~11.4	入渗率大,产流能力低	深厚的排水良好的砂或砾石	砂土、壤质砂土以及砂质壤土
B	3.8~7.6	彻底湿透时,具有中等入渗率	中等深厚到深厚,中等良好到良好排水的土壤,质地为中细到中粗	粉砂土和壤土
C	1.3~3.8	彻底湿透时,入渗率低	有阻碍层的土壤,质地中细到细	沙质黏壤土
D	0~1.3	高产流能力,彻底湿透时,入渗率非常低	黏土组成,具有高膨胀力,有永久的高地下水位,有黏土底盘	黏壤土、粉质黏壤土、沙质黏土、粉质黏土和黏土

3 结果与分析

3.1 不同土地利用格局暴雨径流量分析

根据西安市气象局提供的 2002 年和 2003 年的 24 h 降雨数据,选取 32 mm 作为夏季一次 24 h 典型降雨事件的降雨量。由 Citygreen 5.0 模型计算出西安市二环内总径流量为 1 463 862.26 m³(表 2)。各功能区内径流量为,居住区 809 420.41 m³;商业区 278 584.04 m³;道路 157 716.27 m³;文化区 103 311.49 m³;工业区 90 416.02 m³;公园 24 614.03 m³。各功能区径流量差距显著与功能区的土地利用类型密切相关。各土地利用类型中,居住区占 48.96%,商业区占 18.42%,道路占 11.39%,文化区占 9.73%,工业区占 7.80%,公园占 3.70%。居住区和商业区占地最多,累计达到 67.38%,是因为研究区域选在西安市二环以内,人口比较密集,同时又是主要的城市中心商务区。

3.2 不同土地利用格局减少暴雨径流效益分析

城市森林减少暴雨径流生态效益(表 2),减少的总径流量为 150 682.06 m³。居住区最多,为 60 210.86 m³;道路为 48 129.20 m³;公园为 17 471.74 m³;文化区为 16 446.66 m³;工业区为 8 423.59 m³;商业区最少,

与商业区内总径流量相比,可忽略不计。公园虽然仅占地 3.70%,但是和占地 7.80% 工业区相比较,城市森林减少暴雨径流的生态效益高出了一倍多,主要因为公园的硬铺装率较低,为 16.88%,而工业区硬铺装率达到 68.62%;同时,公园的森林覆盖率较高,达到 43.96%,而工业区仅为 8.61%,所以公园的生态效益很显著。道路、文化区和工业区的土地利用格局相当,硬铺装率很高。森林减少暴雨径流的效益与各功能区的森林覆盖率关系密切。商业区的效益最小,可忽略不计,是因为商业区的森林覆盖率很低,仅 5.02%,而硬铺装率和土地占有率都很高。模型在计算过程中,CN 值很高,达 95,并保持不变,所以城市森林的截流效益被忽略。

就单位面积产流量而言(表 3),居住区产流量最高,达 229.96 m³/hm²,其次是商业区,210.44 m³/hm²;道路,192.60 m³/hm²;工业区,161.23 m³/hm²;文化区,147.40 m³/hm²;公园,92.58 m³/hm²。平均值是 172.37 m³/hm²。可以看出单位面积的产流量和功能区的硬铺装率关系更为密切。单位面积的截流效益居住区仅为 17.11 m³/hm²,不及公园的 65.71 m³/hm²,道路的 58.77 m³/hm² 和文化区的 23.51 m³/hm²,和工业区的 15.02 m³/hm² 相当。平

均值是 $30.02 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。可以看出单位面积的截流效益与功能区的森林覆盖率关系更为密切。居住区的总体生态效益差,主要是因为市区内存在多个大面积的城中村,通常城中村内没有大面积的森林和绿地,只是零散的植有少量单株树木,这使得居住区的总体硬铺装率很高,达到 91.33% ;森林覆盖率较低,为

10.19% 。所以总体生态效益很差。商业区的生态效益忽略。道路的产流量很高,但是截流效益也很高,达 $58.77 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。主要是西安市区内道路绿化较好,大部分主干道上的行道树生长良好,森林覆盖程度较高。公园产流量最低,截流效益最好,因为公园的硬铺装率最低,森林覆盖率最高。

表2 不同土地利用类型条件下的硬铺装率、森林覆盖率、产流量和减少的径流量

土地利用格局	土壤水文类型	土地利用格局/%	硬铺装率/%	森林覆盖率/%	当前条件下径流量/ m^3	森林减少径流量/ m^3
公园	D	3.70	16.88	43.96	24 614.03	17 471.74
道路	D	11.39	91.57	29.73	157 716.27	48 129.20
文化区	D	9.73	65.54	16.68	103 111.49	16 446.66
工业区	D	7.80	68.62	8.61	90 416.02	8 423.59
商业区	D	18.42	78.93	5.02	278 584.04	0.00
居住区	D	48.96	91.33	10.19	809 420.41	60 210.86
总计		100	82.04	13.22	1 463 862.26	150 682.06

表3 单位面积效益 m^3/hm^2

土地利用格局	单位面积径流量	单位面积减少的径流量
公园	92.58	65.71
道路	192.60	58.77
文化区	147.40	23.51
工业区	161.23	15.02
商业区	210.44	0.00
居住区	229.96	17.11
平均	172.37	30.02

4 结论

一旦量化了城市森林的结构和功能之间的关系,管理者就可以创建和保持一个功能性良好,有益的城市森林^[4]。通过分析得出,不同土地利用条件下产流量大小依次是:居住区>商业区>道路>文化区>工业区>公园。不同功能区的径流量相差很大,这主要是由于研究区域选在二环内,各功能区土地利用格局相差较大。城市森林的截流效益依次是居住区>道路>公园>文化区>工业区>商业区。道路的硬铺装率高达 91.57% ,公园仅占 3.70% 。但是由于道路和公园的森林覆盖率很高,所以截流效益较高。商业区的森林覆盖率仅 5.02% ,其截流效益很小,忽略不计。单位面积产流量居住区>商业区>道路>工业区>文化区>公园。这与功能区硬铺装率有密切联系。在一次夏季暴雨降雨过程中,当森林树冠截流达到饱和时,树下覆盖状况就对暴雨径流量起决定影响。因此,硬铺装率最高的居住区、道路、和商业区的

产流量也最高,平均产流量在 $210 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 左右,高于平均值 $172.37 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;硬铺装率最低的公园,产流量仅为 $92.58 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。单位面积的截流效益公园>道路>文化区>居住区>工业区>商业区。这与功能区内森林覆盖率密切相关。

模型设计上主要针对北美地区,效益计算公式中的参数和标准的设定是考虑到北美的地理位置、气候等多种因素。因此,可以通过对参数做具体的修正,更新数据库来实现大部分的功能。西安市城市森林截流量为 $150 682.06 \text{ m}^3$,在森林覆盖率为 0.13 的条件下,截流率为 6.47% 。比较国内学者对于中国各地区不同森林类型的截流率^[4],结果基本合理。

[参 考 文 献]

- [1] Ashantha Goonetillekea, Evan Thomasb, Simon Ginn, et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74: 31—42.
- [2] McPherson E G. Economic modeling for large-scale urban tree plantings [C]// Proceedings of the ACEEE 1990 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington: American Council for an Energy Efficient Economy, 1990.
- [3] 周晓峰,张洪军. 森林生态系统服务功能[C]// 生态系统服务功能研究. 北京:气象出版社, 2002: 34—66.
- [4] 欧阳志云,李文华. 生态系统服务功能内涵与研究进展 [C]// 生态系统服务功能研究. 北京:气象出版社, 2002: 1—27.

(下转第 48 页)

4 结论

(1) 退耕还林 4 a 后,两种模式林地内,土壤的水稳性团聚体含量在总量上差别不大,说明土壤水稳性团聚体的总体提高是一个相对缓慢的过程。

(2) 有林地土壤的上层和中层,大粒级水稳性团聚体含量比未退耕地明显增加。表明退耕还林后,林地改良土壤、提高土壤抗蚀性方面有着不容忽视的作用,地上部分枯落物的分解和转化以及地下林木根系的周转,有助于土壤中大粒级水稳性团聚体的形成。退耕还林早期两种模式林地内,人为因素对土壤大粒级水稳性团聚体的影响并不明显。

(3) 土壤有机质含量由于未退耕地人为施加有机肥的结果,在上、中、下层均高于林地。

[参 考 文 献]

- [1] 张立恭. 四川盆地主要土壤类型抗侵蚀能力研究[J]. 四川林勘设计,1996(2):15—23.
- [2] 杨玉盛,何宗明,林光耀. 不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):32—37.
- [3] 高维森,王佑民. 黄土丘陵区柠条林地土壤抗蚀性[J]. 西北林学院学报,1991,6(3):70—78.
- [4] 何富广,赵荣慧,胡承海. 辽西地区油松混交林抗蚀改土效益的研究[J]. 土壤学报,1994,3(2):170—179.
- [5] 杨玉盛,叶旺,林建华. 水保林对紫色土抗蚀性的影响[J]. 中国水土保持,1992(5):31—32.
- [6] 沈慧,姜凤歧,杜晓军. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报,2000,11(3):345—348.
- [7] 高维森,王佑民. 土壤抗蚀抗冲性研究综述[J]. 水土保持通报,1992,12(5):59—63.
- [8] 沈慧. 水土保持林土壤抗蚀性能及其评价指标[C]//中国博士后科学基金会编. 2000年中国博士后学术大会论文集:西部与农林发展分册. 北京:科学出版社,2001:120—125.
- [9] 王忠林,李会科. 花椒地埂林土壤抗蚀性研究[J]. 西北林学院学报,1998,13(2):30—33.
- [5] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探:以海南岛尖峰岭热带森林为例[C]//生态系统服务功能研究. 北京:气象出版社,2002:222—238.
- [6] 刘长乐,李树江,聂维良,等. 森林生态系统三大效益评估技术的研究[J]. 林业科技,2004,9(3):20—22.
- [7] 井学辉,吴波,曹磊,等. 森林生态效益评价方法[J]. 河北林果研究,2005,20(1):80—85.
- [8] 秦耀民,刘康,王永军. 西安城市绿地生态功能研究[J]. 生态学杂志,2006,25(2):135—139.
- [9] 胡志斌,何兴元,李月辉,等. 基于 Citygreen 模型的城市森林管理信息[J]. 生态学杂志,2003,22(6):181—185.
- [10] 胡志斌,何兴元,陈玮,等. 沈阳市城市森林结构与效益分析[J]. 生态学杂志,2003,14(12):2108—2112.
- [11] 彭定志,游进军. 改进的 SCS 模型在流域径流模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(1):20—24.
- [12] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number:has it reached maturity? [J]. Hydrologic Engineering, 1996, 1(1):11—19.
- [13] 张美华,王晓燕,秦福来. SCS 模型在密云石匣试验小区降雨径流量估算中的应用[J]. 首都师范大学学报:自然科学版,2004,18(1):155—158.
- [14] Nowak D J. Urban forest structure and the functions of hydrocarbon emissions and carbon storage [C]// Washington:Proceedings of the Fifth National Urban Forest Conference,1991:48—51.

(上接第 31 页)