

高度城市化区域汇水域尺度 LUCC 的 降雨径流调蓄效应 ——以上海城市绿地系统为例

程 江^{1,2}, 杨 凯^{2,*}, 徐启新²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;

2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要:快速城市化进程导致的土地利用/土地覆被变化(LUCC),对城市地表水文过程影响显著。城市绿地作为主要的城市透水型下垫面类型,具有良好的降雨径流调蓄效应。利用2000、2003年上海中心城区小尺度城市汇水域的LUCC、降雨和径流资料,以绿地系统为例,分析了高度城市化区域内,面积分别为2.60 km²和2.77 km²的相邻汇水域LUCC的水文过程。结果表明,高度城市化区域内小尺度城市汇水域的城市绿地系统具有良好的削减城市雨水径流总量和延缓雨水径流洪峰现时的调蓄效应。案例研究显示,在绿地系统面积比例分别为39.13%和27.36%,边界条件相近的对比城市汇水域内,10%绿地系统面积比例差,及其绿地结构、覆被植物和土壤类型的差异共同造成:①对比汇水域年径流系数存在约0.3的差别;②对24 h降雨量为42.8 mm的大雨径流过程,延后径流峰值出现时间约20 min;③对24 h降雨量超过270 mm的特大暴雨径流过程,削减地表径流系数约0.1。

关键词:城市汇水域;土地利用/土地覆被变化;降雨;径流;调蓄效应;绿地

文章编号:1000-0933(2008)07-2972-09 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Rainfall-runoff storage-infiltration effect of LUCC in highly urbanized region on a catchment's scale: Shanghai urban green space system as an example

CHENG Jiang^{1,2}, YANG Kai^{2,*}, XU Qi-Xin²

1 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 School of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 2972 ~ 2980.

Abstract: Land use and cover change (LUCC) caused by rapid urbanization had remarkable influence on urban surface hydrological processes. The urban green space as one main penetrative underlying surface type, presents a strong storage-infiltration effect. According to LUCC, rainfall and runoff data collected from highly urbanized area in central Shanghai in 2000 and 2003, the hydrological processes of LUCC with areas of 2.60 km² and 2.77 km² adjacent catchments, respectively were analyzed. The results exhibited the green system, in a highly urbanized region on a small catchment's scale, had

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70673022; 40730526);上海市博士后基金资助项目(07R214121)

收稿日期:2007-11-28; **修订日期:**2008-04-14

作者简介:程江(1977~),男,江苏溧阳人,博士,主要从事城市水资源和水环境研究. E-mail: jcheng@sklec.ecnu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kyang@re.ecnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70673022; 40730526) and Post doctoral Foundation of Shanghai (No. 07R214121)

Received date: 2007-11-28; **Accepted date:** 2008-04-14

Biography: CHENG Jiang, Ph. D., mainly engaged in municipal water resource and water environment. E-mail: jcheng@sklec.ecnu.edu.cn

obvious storage-infiltration effects to eliminate total amount of rainfall-runoff, and to extend time-lag of runoff flood peak. Case study of two urban catchments with a similar boundary condition, 39.13% and 27.36% area of green spaces respectively, showed that 10% area difference between green systems, and the differences among green structure, cover plants and soil types could cause (i) 0.3 difference for annual runoff coefficient between two catchments; (ii) 20min extension for runoff peak in the process of 42.8mm precipitation within 24h; (iii) 0.1 runoff coefficient elimination beyond 270mm storm runoff process within 24h.

Key Words: urban catchment; LUCC; green space; rainfall; runoff; storage-infiltration effect

20 世纪 70 年代以来全球城市化进程加速,高强度人类活动改变城市土地利用/土地覆被类型,形成了不同于自然地表的“城市第二自然格局”,对地表水文过程产生深远影响^[1~6]。20 世纪的全球洪涝灾害的频率远高于以往任何时期,由于人类活动引起的土地利用/覆被变化(land use and cover change, LUCC)是重要原因之一,因此 LUCC 水文响应是体现人类活动对水循环影响的理想研究对象。国内外不同水文尺度下 LUCC 对区域产水量的影响研究,主要集中在森林植被变化对径流形成机制方面,城市汇水域尺度 LUCC 对水文过程的影响研究尚不多见^[7~11]。1970 年生态系统服务功能概念被提出以来^[12],近十年生态系统服务功能的研究取得了突破性进展^[13],已成为当前生态与生态经济学研究的前沿课题。城市绿地系统是城市生态系统的子系统之一,具多种生态服务功能^[14,15]。已有研究多重视景观效果、休闲价值和固定 CO₂、释放 O₂、蒸腾吸热、减少污染物、滞尘、减噪等改善环境质量功能方面^[16],对绿地在城市水文循环中的调蓄效应研究相对较少。

城市汇水域是森林集水区在城市中的特例,借鉴森林集水区适宜面积选择、单个集水区与相关集水区比较相结合的研究方法,本文选取上海中心城区相邻两个独立城市汇水域——国顺排水系统和长白双阳排水系统为研究对象,探讨了高度城市化区域内,城市汇水域尺度的 LUCC 过程,并尝试以城市绿地系统为例,分析了绿地系统在城市水文过程中的削峰、延时效应,以期为促进城市化区域内水文过程的良性循环,为优化城市土地利用/土地覆被类型的研究提供理论和实践借鉴。

1 研究区域概况

国顺排水系统(汇水域)和长白双阳排水系统(汇水域)位于上海市中心城区杨浦区(图 1),均属边界独立的分流制排水系统,汇水域面积分别为 2.60 km²和 2.77 km²,平均海拔高度 4 m,属北亚热带季风气候,年均气温 15.5℃,年均降水总量 1149.8 mm,降水日数 132 d。降水具有明显的季节性变化,全年 70%左右的雨量集中在 4~9 月份的汛期。

2 研究方法

2.1 数据来源

利用 RS 和 GIS 相结合、目视解译与计算机自动提取相配合的技术手段,从 2000 年和 2003 年上海全市范围航空遥感图像数据中提取出研究区域的土地利用/土地覆被类型资料。2000 年和 2003 年图像空间分辨率分别为 2.0 m 和 1.4 m。汇水域降雨和地表径流资料来源于上海市排水局防汛分公司下辖国顺、长白双阳雨水泵站的自动化降雨和排水实时监测数据,降雨和排水数据的采样间隔分别为 5 min 和 1 min。

2.2 汇水域选择

集水区(汇水域)面积是影响集水区水文效应的重要因子,面积选择对研究结果的可靠性有着重要影响,面积过小易造成试验误差,过大则难以管理和准确测量。国外对比集水区的研究中,研究区域面积常介于 0.01~25 km²,平均 0.80 km²,0.50~1.00 km²的集水区被普遍采用^[17]。国内,对武汉城市集水区尺度降雨径流及其污染的研究中,1.3 km²的面积亦处于上述研究区域面积选择变化范围内^[18]。鉴于集水区面积介于 1~10 km²的小流域的 LUCC 对流域平均流量、洪峰流量、基流等有着比中等和大流域更大的影响^[19],本文在

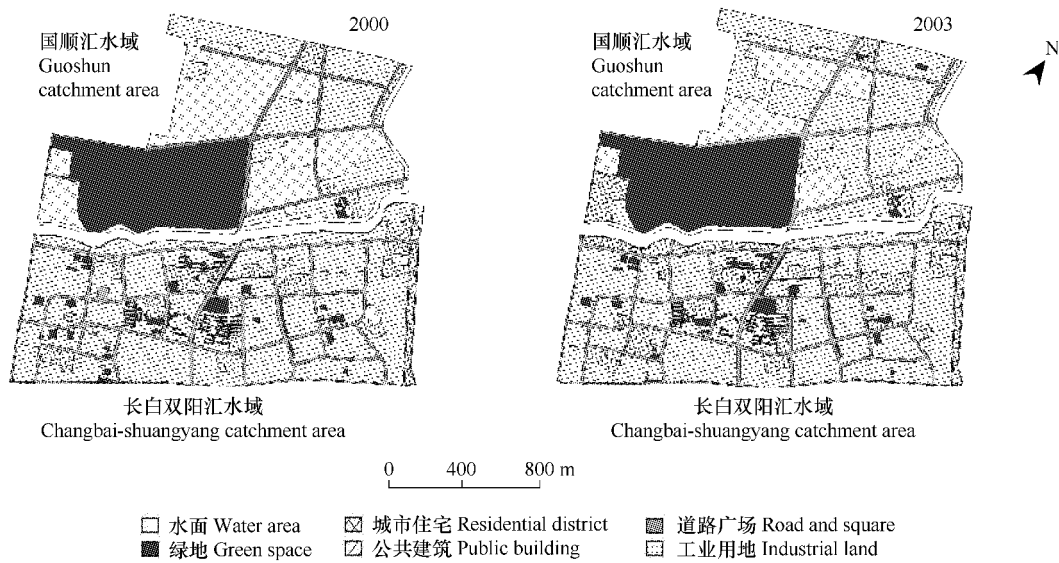


图1 研究区域2000~2003年土地利用变化

Fig. 1 LUCC from 2000 to 2003 at research area

考虑单个集水区与相关集水区研究及其对比研究的方法上,借鉴国内外集水区研究面积的遴选标准,选择位于上海市杨浦区,面积分别为2.60 km²和2.77 km²的相邻汇水域作为研究区域。

2.3 土地利用分类处理

已有LUCC的水文影响研究中,多根据研究区土地利用情况,结合所采用水文模型的需要,对土地利用/土地覆被进行适当的调整和归并。这样虽然考虑了一些土地利用/土地覆被类型之间的水文相似性,但由于缺乏较强的系统性和完整性,因而各流域之间可比性较弱,影响了研究结论的可信度。例如,国外SCS(soil conservation service)水文模型和USLE(universal soil loss equation)虽然考虑了土地利用/土地覆被类型对地表径流的影响,并对土地利用/土地覆被类型进行了分类,但分类并不全面,未包括所有土地利用/土地覆被类型^[20,21]。我国土地利用现状分类系统中影响最大、最具代表性的是土地管理部门曾经和正在使用的1984、1997年和2002年三大土地利用类型分类系统^[22],主要侧重于土地用途或遥感数据的可识别性,未充分考虑各土地利用/土地覆被类型对水文过程的影响。

本文依据2002年试行的国家土地分类系统^[22]和万荣荣等^[23]建立的基于水文响应研究的土地利用/土地覆被分类系统,结合上海市中心城区和研究汇水域内土地资源的实际利用方式、覆被特征及动态监测的需要,将研究区域内的土地利用类型划分为6类,即城市住宅用地、道路广场用地、绿地、水域、公共建筑用地和工业用地。

2.4 土地利用类型动态度和土地利用程度综合指数

为了反映各类型用地面积的变化幅度与变化速度,以及区域土地利用变化中的类型差异,有学者提出了土地利用类型的变化率指数,即土地利用类型动态度^[24,25]。该动态度不仅可直观地反映土地利用类型变化的幅度与速度,而且可通过类型间的对比反映类型间的变化差异,从而探测其背后的驱动或约束因素。土地利用类型动态度计算方法如式(1):

$$K = (L_b - L_a) / L_a \times T^{-1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, K 为研究时段内某一土地利用类型的动态度,指某种土地类型年的变化率; L_a 和 L_b ,分别为研究期初、末研究区域土地利用类型的面积; T 为研究时段长(a)。

区域土地利用程度与程度变化分析利用较多的是土地利用程度综合指数。该指数的意义在于能够反映区域土地利用的集约程度,适合土地利用程度的综合评价^[24,25]。土地利用程度变化等于研究期末的指数减

去研究期初的指数。土地利用程度综合指数计算方法如式(2)。

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad L \in [100,400] \quad (2)$$

式中, L 为某区域土地利用程度综合指数; A_i 为区域内第 i 级土地利用程度分级指数; C_i 为区域内第 i 级土地利用程度分级面积百分比; n 为土地利用程度分级数。依据刘纪远等^[24]从生态学角度对土地利用类型的 4 等分级和指数设定方法,将本文土地利用类型中的水域、绿地、城市住宅用地、道路广场用地、公共建筑用地和工业用地的土地利用分级指数分别设定为 2、3、4、4、4 和 4。

3 高度城市化区域汇水域尺度的 LUCC 分析

3.1 土地利用特征

国顺汇水域和长白双阳汇水域 2000 和 2003 年土地利用类型见表 1。2000 年国顺汇水域土地利用类型比重为绿地>工业用地>城市住宅用地>道路广场用地>水域>公共建筑用地,其中主要用地类型绿地、工业用地和城市居民住宅用地占总面积的 86.17%;2003 年用地类比重排序发生变化,表现为绿地>城镇住宅用地>工业用地>道路广场用地>公共建筑用>水域,3 种主要用地类型占总面积的 83.14%。长白双阳汇水域 2000 年主要用地类型则为城镇住宅用地、绿地和道路广场用地,三者占总面积的 87.70%,其余公共建筑用地、工业用地和水域仅占 12.30%;2003 年主要用地类型变化为城镇住宅用地、绿地和公共建筑用地,占总面积的 87.07%,其余道路广场和水域占 12.93%。

表 1 2000、2003 年对比汇水域土地利用类型变化统计
Table 1 LUCC of two catchments in 2000 and 2003

汇水域 Catchment	年份 Year	土地利用类型 Land use type					
		住宅区 Residential district	道路广场 Road & square	绿地 Green space	水域 Water area	公共建筑 Public building	工业用地 Industrial land
国顺 Guoshun	2000 (hm ²)	43.190	17.859	99.087	11.552	6.640	82.397
	比重 Percent(%)	16.57	6.85	38.00	4.43	2.55	31.60
	2003 (hm ²)	72.730	19.362	102.020	11.126	13.474	42.013
	比重 Percent(%)	27.90	7.43	39.13	4.27	5.17	16.11
	动态度 Change ratio(%)	22.80	2.81	0.99	-1.23	34.31	-16.34
长白双阳 ChangbaiShuangyang	2000 (hm ²)	130.639	35.140	77.111	1.081	31.824	1.181
	比重 Percent(%)	47.17	12.69	27.84	0.39	11.49	0.43
	2003 (hm ²)	119.822	34.735	75.775	1.081	45.563	0
	比重 Percent(%)	43.26	12.54	27.36	0.39	16.45	0
	动态度 Change ratio(%)	-2.76	-0.38	-0.58	0	14.39	-33.33

虽然国顺和长白双阳汇水域空间相邻,但区域功能定位的不同导致土地利用方式存在较大差异,表现为主导土地用地类型的差别。2000 年国顺汇水域较长白双阳汇水域,在工业用地和绿地类型百分比上分别多 30.42% 和 10.16%,但在住宅用地上要少 30.60%。2003 年两汇水域在工业用地和住宅用地比重上差距有较大幅度缩小,差别为 16.11% 和 -15.36%,绿地用地比例差异则拉大到 11.77%。按照 SCS 模型中对软性透水型和硬化不透水型下垫面的分类,可将本文 6 类土地类型中绿地和水域归为透水型下垫面,其余为不透水型下垫面。据此分类,2000 年国顺汇水域软性透水型下垫面比例比双阳长白汇水域高出 14.20%,2003 年进一步增加到 15.65%。由于软性透水型下垫面具有良好的削减降雨径流、调节城市雨洪作用,两汇水域间透水型下垫面比例的较大差异将对各区域内的降雨径流过程产生深刻影响。

3.2 土地利用变化过程

3.2.1 土地利用类型动态度

根据式 1 计算出两汇水域 2000~2003 年的土地利用动态度(图 2)。2000~2003 年,国顺汇水域公共建

筑用地年际变化最大,动态度达到 34.31%,其次为城镇住宅区用地,动态度为 22.80%,工业用地动态度为 -16.37%,接下来依次是道路广场用地、水域和绿地,动态度绝对值均不超过 3%。长白双阳汇水域较国顺不同,除工业用地和公共建筑用地动态度较大外,分别为 -33.33% 和 14.39%,其余各土地利用类型动态度年际变化均不超过 3%。

图 2 显示两汇水域内,2000~2003 年动态度较大的用地类型为公共建筑用地、工业用地和住宅用地。上海市城市空间形态各要素的配置与转移多是政府行为,随着国家经济发展大环境的变化,城市形态和结构也随之变化。20 世纪 80 年代末以来,上海市政府大力实施旧城改造措施,中心城区污染严重的工厂、企业大量外迁,工业用地比例逐年下降。国顺和长白双阳汇水域所处杨浦区是上海的老工业中心,其功能定位和经济发展不同于其他以商业、金融为主,经济实力较强的其他各区,这是造成国顺系统的 2000 年仍有超过 30% 的工业用地比例的主要原因。随着两汇水域所在区域功能定位的调整和经济的快速发展,其工业用地逐渐被住宅用地和公共建筑用地置换,形成国顺汇水域上述用地特征

和土地利用变化特征。长白双阳汇水域由于 2000 年工业用地比重仅为 1.18%,因此 2000~2003 年工业用地动态度虽然较大,但对用地结构整体特征影响贡献有限。由于旧式住宅较多,在旧城改造、房屋拆迁置换过程中,部分拆迁旧式住宅用地用作公共建筑用地,这是长白双阳汇水域 2000~2003 年公共建筑用地动态度较大的原因。

3.2.2 土地利用程度变化

根据式 2 计算出 2000、2003 年国顺汇水域土地利用综合指数分别为 353.14 和 352.37,长白双阳汇水域分别为 371.42 和 371.86。显示两汇水域土地总体利用水平很高,远高于全国 231.92 和国内其它区域,如南昌市 249.07^[25]。2003 年长白双阳汇水域土地利用综合指数增长了 0.44,与其增长趋势相反的是国顺汇水域 2003 年较 2000 年下降了 0.77,导致两汇水域土地利用综合指数差异进一步拉大。从 1990 年代开始,上海城市建设迈入新的阶段,“一年一变样,三年大变样”,期间上海中心城区各区依据各自的功能定位,土地利用变化存在较大差异。2000~2003 年国顺汇水域中工业用地大量被置换,主要转变为城市新建住宅用地和公共建筑用地,期间园林绿化建设用地也有增加,导致区域土地利用程度综合指数下降。由于长白双阳汇水域中无工业用地向其它用地类型转化,因而 2000~2003 年土地利用变化甚小,且部分绿地转化为公共建设用地,导致其土地利用程度综合指数略有上升。

4 LUCC 的水文调蓄效应

4.1 削峰效应

4.1.1 年降雨径流量削减

2000、2003 年国顺和长白双阳汇水域记录全年降雨量分别为 934.5 mm 和 931.2 mm,根据图 3,利用一元回归直线的斜率得到年径流系数。2000、2003 年,国顺汇水域年径流系数分别为 0.470 和 0.370,长白双阳汇水域分别为 0.796 和 0.751,分别比国顺系统大 0.326 和 0.381。在汇水域面积、形状、降雨强度、汇流时间等边界条件类似的前提下,两汇水域年径流系数的较大差异与其土地利用类型有关,土地利用方式的变化导致径流系数的相对变化,其中绿地等软性透水性下垫面的比例和结构类型的变化是主要影响因子。城市绿地系统由城市中不同类型、性质和规模的绿地共同构成。类似于森林系统,城市绿地系统通过覆被植物及枯落物层的截持含蓄、大量蒸腾、土壤渗透等过程,使得地表径流减少,甚至为零,从而起到削减降雨径流的作用。

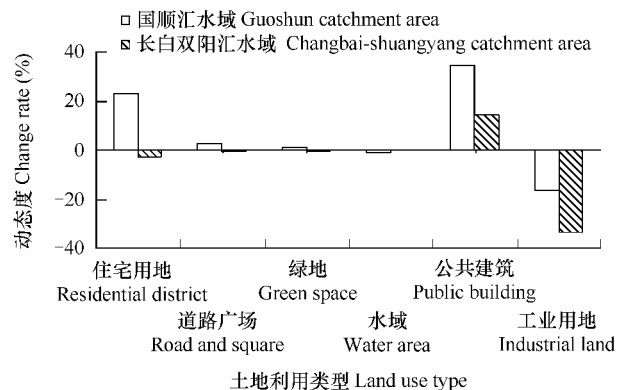


图 2 对比汇水域 2000~2003 年土地利用动态度

Fig. 2 Land use change rate of two catchments from 2000 to 2003

2000、2003 年长白双阳汇水域与国顺汇水域绿地面积比例的差异分别为 10.16% 和 11.29%, 这是对比汇水域年径流系数存在约 0.3 差异的原因之一。

相对与绿地面积, 绿地结构、覆被植物和土壤类型对径流系数的影响更为重要。国顺汇水域中绿地主要以公园绿地为主, 达到 92.0%, 覆被植物以林草、林灌和乔灌木为主。由于林草、林灌和乔灌木等覆被植物类型通过植物根系改良了土壤结构, 增加了土壤的雨水入渗能力, 且随着枯落物量的增加, 表层土壤的各种孔隙度均呈显著增加。因此, 其土壤稳定入渗速率介于 21.2 ~ 93.4 mm/h 之间。长白双阳汇水域绿地以住宅区绿地和街道绿地为主, 覆被植物类型主要为人工草坪。过于致密的草坪根系和人工草坪土壤受人为扰动影响, 使得其表层土壤稳定入渗速率与国顺汇水域主要绿地的数据存在 1 个数量级的差异, 仅为 5.8 ~ 8.1 mm/h。此外, 国顺汇水域亦存在一定面积比例的高程低于公园路面的下凹式绿地。有研究显示, 在适当的面积比例、绿地下凹深度和绿地土壤稳定入渗速率条件下, 下凹式绿地可以蓄渗超过自身面积 3 倍以上的降雨径流量^[26]。由上述分析可判断, 约 10% 的绿地面积比例差, 以及绿地结构、覆被植物和土壤类型的不同是对比汇水域年径流系数存在较大差异的原因所在。

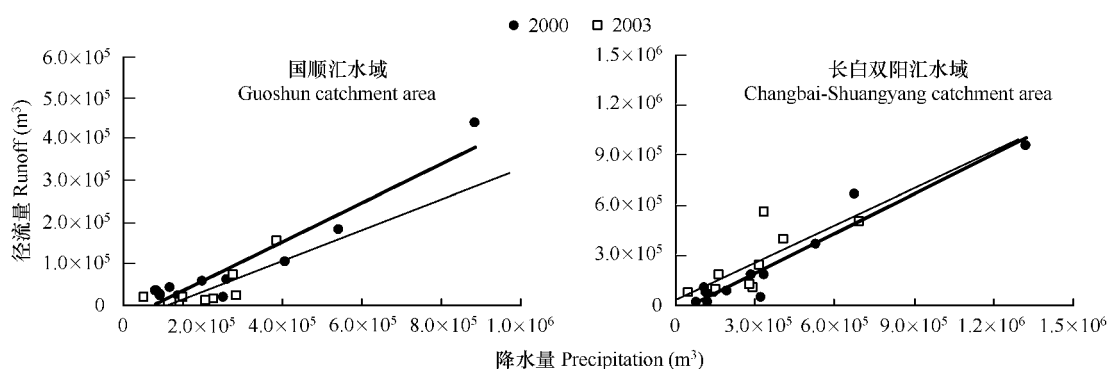


图 3 对比汇水域 2000 和 2003 年降雨径流关系曲线

Fig. 3 Rainfall-runoff relationship of two catchments in 2000 and 2003

葛怡等的研究显示, 由于上海市区土地利用结构变化, 1950 ~ 2001 年的径流系数从 0.53 迅速增长到 0.71, 增长幅度达 33.96%^[4]。国顺汇水域 2000 ~ 2003 年径流系数绝对值减少 0.100, 相对减少 21.27%, 未超出以往研究, 与深圳布吉河流域估算出由于流域土地利用的变化导致最大洪峰流量增加幅度达到 20.2% ~ 28.9% 的结论较为相近^[27]。2000 ~ 2003 年国顺汇水域公园绿地比例增加 1.13%, 低于径流系数的下降比例。除新增公园绿地外, 新建住宅用地中大量增加的配套绿地面积是造成径流系数下降比例较大的主要原因。从 1999 年起实施的《上海市开发建设示范居住区实施纲要》规定: 新建居住区绿地率应达 35% 以上, 其中集中公共绿地不少于居住总用地的 15%。2000 ~ 2003 年国顺汇水域新增住宅用地比例为 11.33%, 按照新建居住区集中公共绿地不少于 15% 的比例计算, 新增居住区绿地面积也达到整个汇水域面积的 1.70%, 这是国顺汇水域 2003 年径流系数较 2000 年减小 0.10 的原因之一。2000 ~ 2003 年, 国顺汇水域中超过其绿地总面积 90% 的黄兴公园绿地结构功能的优化改造则是主要原因。长白双阳汇水域 2000 ~ 2003 年各土地利用类型相对变化较小, 导致其年径流系数无明显变化。

4.1.2 单事件降雨径流量削减

对于前期无降雨天数达 11 d, 2004 年 6 月 15 日 ~ 16 日 24 h 降雨量达 42.8 mm 的大雨等级的单降雨事件, 国顺汇水域和长白双阳汇水域降雨、径流实时记录数据显示其 24 h 累积排水量分别为 31504 m³ 和 38901 m³ (图 4)。国顺汇水域面积稍小于长白双阳汇水域 5.7%, 但在累积地表径流量上前者却小于后者约 19.0%。与小尺度汇水域的研究相比, 在较大尺度的汇水域研究中亦有类似结论, 例如孙铁珩等^[28] 在辽宁东部山区对比小流域观测得出森林小流域比皆伐迹地小流域洪水总量削减 35.2%, 在四川嘉陵江、涪江、沱江等流域的研究中得到森林可削减 10% ~ 20% 洪峰流量的结论^[11], 其他国内学者, 如马雪华、张天曾和刘昌明

等也得出过相似结论^[17]。

类似于森林系统,对小暴雨或短历时暴雨事件,绿地系统具有较大的调节作用,但对特长历时或连续多峰大暴雨事件,由于绿地系统的调蓄能力已为前一次暴雨占去大部分,再次发生暴雨时的调蓄能力会有一定程度的降低。例如,2005年8月5日至8日的“麦莎”台风是近十年来影响上海最大的一次台风,在整个台风降雨期间,国顺汇水域和长白双阳汇水域降雨量分别达到271.4 mm和273.3 mm,属特大暴雨类型,超过上海地区20 a一遇的设计暴雨标准,径流系数分别为0.777和0.889。对于如此强度长历时的集中降雨,绿地系统对雨水径流的削峰滞洪作用虽然不如小强度降雨表现突出,但就总量削减效应而言,两系统之间存在0.112的径流系数差异,若换算成等汇水域面积,国顺汇水域总排水量的绝对削减值可达 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4.2 延时效应

城市化进程导致的土地利用结构与格局变化不仅影响流域径流系数,还使得雨水汇流速度大大提高。同时,城市排水系统的完善,如设置道路边沟、密布雨水管网和排洪沟等,也增加了汇流水力效率,使雨水径流洪峰出现时间提前。城市绿地系统不仅可削减降雨径流量,也能起到延缓降雨径流峰值出现时间。对降雨历时2004年6月15日8:05~16日8:00,24 h雨量42.8 mm的大雨数据分析显示,两汇水域的产汇流过程存在较大差异。从图5可知,国顺汇水域从开始降雨起到20:06,泵站集水井水位未超过泵机开机水位,此时降雨历时记录12 h 1 min;20:40出现降雨峰值,地表径流峰值出现在23:00。长白双阳汇水域泵站开机时间同样为20:40,径流峰值出现在22:40。

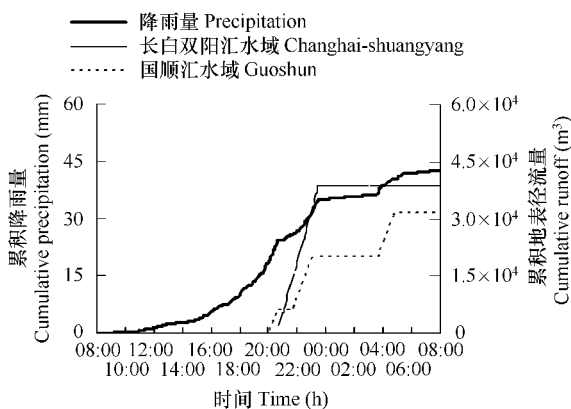


图4 对比汇水域单降雨事件累积地表径流过程线(2004年6月15日8:05~16日8:00)

Fig.4 Cumulative runoff graph of single precipitation event

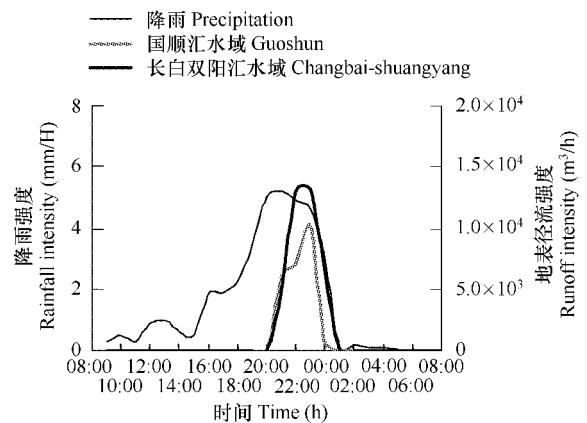


图5 对比汇水域典型降雨条件下不同研究区域的降雨径流的延时效应

Fig.5 Delay effect on runoff between two catchments at typical precipitation event

城市绿地系统在增加雨水下渗量、延长雨水下渗时间和缓解洪峰达到时间等方面有着显著的调蓄效应,这与森林系统减少洪水量、削弱洪峰流量、推迟和延长洪水汇集时间的功能相似^[11,17,29]。但这种削减、延时作用不是无限的,受到诸多因素的影响,如土壤前期含水量、枯枝落叶层被前期降水所饱和的程度、暴雨强度与历时,绿地面积比例、分布位置、结构、土壤厚度及其透水性,汇水域大小等,都会在不同程度上发挥作用。在汇水区域面积、形状、降雨强度、管网密度、管网水力坡度等边界条件类似下,对于24 h累积雨量为大雨等级的降雨事件,两汇水域土地利用方式的差异,尤其是约10%绿地系统面积比例差异,以及绿地结构、覆被植物和土壤类型等因素共同作用,是导致国顺汇水域径流峰值滞后于长白双阳汇水域约20 min的主要原因。

5 结论

(1) 高度城市化区域内,小尺度城市汇水域内的城市绿地系统,能够对削减城市雨水径流总量和延缓雨水径流洪峰到达时间产生明显效应。其中绿地面积比例、结构、覆被植物和土壤类型是影响汇水域产汇流过程的主要因子。

(2) 案例研究中,绿地系统面积比例分别为 39.13% 和 27.36%,边界条件相近的对比小尺度城市汇水域内,10% 的绿地系统面积比例差、绿地相对高程、覆被植物类型和土壤稳定入渗速率的差异共同造成:对比汇水域年径流系数相差约 0.3;24 h 降雨量为 42.8 mm 的大雨径流过程,延后径流峰值出现时间约 20 min;24 h 降雨量超过 270 mm 的特大暴雨径流过程,削减地表径流系数约 0.1。

(3) 建议在城市绿地的规划建设中,在提高绿化覆盖率的同时,更应注重绿地结构、覆被植物、土壤类型的选择,例如可将部分绿地设计为下凹式绿地,以延长雨水入渗时间、增大雨水入渗量,增加城市有限面积绿地系统的雨水调蓄效应,促进城市水文过程的良性循环。

References:

- [1] Sanders R A. Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio. *Urban Ecology*, 1986, 9(3-4):361—376.
- [2] Pandit A, Ganesh G. Estimation of annual storm runoff coefficients by continuous simulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1996, 122:211—220.
- [3] Pauleit S, Ennos R, Golding Y. Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 2005, (71):295—310.
- [4] Ge Y, Shi P J, Zhou J H, *et al.* Simulation of flood disaster scenario under driving action of land use change in urban area of Shanghai. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3):25—30.
- [5] Shi P J, Yuan Y, Chen J. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7):1041—1049.
- [6] Li X W, Fang J Y, Piao S L. Land use Changes and Its Implication to the Ecological Consequences in Lower Yangtze Region. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5):659—667.
- [7] Richey J E, Nobre C, Deser C. Amazon River discharge and climate variability: 1903—1985. *Science*, 1989, 246:101—103.
- [8] Novotry V, Olem H. Water quality: prevention, identification and planning. *Water Resource Planning Management*, 1993, 119:306.
- [9] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X, *et al.* Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: a review. *Journal of Natural Researches*, 2001, 16(5):79—84.
- [10] Li W H, He Y T, Yang L Y. A summary and perspective of forest vegetation impacts on water yield. *Journal of Natural Researches*, 2001, 16(5):398—406.
- [11] Zhou X F, Zhao H X, Sun H Z. Proper assessment for forest hydrological effect. *Journal of Natural Researches*, 2001, 16(5):421—426.
- [12] SCEP (Study of Critical Environmental Problems). *Man's impact on the global environment: Assessment for action*. Cambridge, MA: MIT Press, 1970.
- [13] Costanza R, d. Arge R, Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387:253—260.
- [14] OuYang Z Y, Wang R S. Ecosystem Services and Their Economic Valuation. *World Sci-Tech R & D*, 2000, 22(5):45—50.
- [15] Li F, Wang R S. Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban of green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9):1929—1936.
- [16] Chen F, Zhou Z X, Xiao R B, *et al.* Estimation of ecosystem services of urban green-hand industrial areas: A case study on green-land in the workshop area of the Wuhan Iron and Steel Company. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7):2229—2236.
- [17] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determines the effect of vegetation change on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55:3—22.
- [18] Li L Q, Ying C Q, He Q C, *et al.* Catchment-scale pollution process and first flush of urban storm runoff in Hanyang, Wuhan City. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7):1057—1061.
- [19] Chen J F, Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology — Discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of Natural Researches*, 2001, 16(5):474—480.
- [20] SCS. *National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4, Soil Conservation Service*. US Department of Agriculture, Washington D C, 1956.
- [21] Wischmeie W H, Smith D D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of Rocky Mountains. *USDA Agricultural Handbook No. 282*, Washington, D C, 1965.
- [22] Yue J, Zhang X M. A Discussion on the Classification of Land Use in China. *Arid Land Geography*, 2003, 26(1):78—88.
- [23] Wan R R, Yang G S. Discussion on Some Issues of Hydrological Effects of Watershed Land Use and Land Cover Change. *Progress in Geography*, 2005, 24(3):25—33.
- [24] Liu J Y. *Remote Sensing Macroscopical Investigation and Dynamic Research of Chinese Resources and Environment*. Beijing: China Science and

Technology Press, 1996. 158—188.

- [25] Tang J H, Li H. Land Use/cover Change in Nanchang City in the Period Between 1991 and 2001. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2):173—176.
- [26] Cheng J, Xu Q X, Yang K, *et al.* Rainfall Penetration and Storage Effect and Influencing Factors of Sunken Green Space. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(5):45—49.
- [27] Yuan Y, Shi P J, Liu H Y, *et al.* Impact of land use change on urban flood disaster. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3):6—13.
- [28] Sun T Y, Pei T P, Zhang J N. Disaster Reduction in China, 1996, 6(3):35—38.
- [29] Guo M C, Wang Y H, Yu P T. A Review of Forest Hydrology Studies. *World Forestry Research*, 2005, 18(3):6—11.

参考文献:

- [4] 葛怡,史培军,周俊华,等.土地利用变化驱动下的上海市区水灾灾情模拟. *自然灾害学报*, 2003, 12(3):25~30.
- [5] 史培军,袁艺,陈晋.深圳市土地利用变化对流域径流的影响. *生态学报*, 2001, 21(7):1041~1049.
- [6] 李晓文,方精云,朴世龙.近10年来长江下游土地利用变化及其生态环境效应. *地理学报*, 2003, 58(5):659~667.
- [9] 张志强,王礼先,余新晓.森林植被影响径流形成机制研究进展. *自然资源学报*, 2001, 16(5):79~84.
- [10] 李文华,何永涛,杨丽颀.森林对径流影响研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2001, 16(5):398~406.
- [11] 周晓峰,赵惠勋,孙慧珍.正确评价森林水文效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5):421~426.
- [14] 欧阳志云,王如松.生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. *世界科技研究与发展*, 2000, 22(5):45~50.
- [15] 李锋,王如松.城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. *生态学报*, 2003, 23(9):1929~1936.
- [16] 陈芳,周志翔,肖荣波,等.城市工业区绿地生态服务功能的计量评价——以武汉钢铁公司厂区绿地为例. *生态学报*, 2006, 26(7):2229~2236.
- [18] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征. *环境科学学报*, 2006, 26(7):1057~1061.
- [19] 陈军锋,李秀彬.森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5):474~480.
- [22] 岳健,张雪梅.关于我国土地利用分类问题的讨论. *干旱区地理*, 2003, 26(1):78~88.
- [23] 万荣荣,杨贵山.流域LUCC水文效应研究中的若干问题探讨. *地理科学进展*, 2005, 24(3):25~33.
- [24] 刘纪远.中国资源环境遥感宏观调查与动态研究.北京:中国科学技术出版社,1996. 158~188.
- [25] 汤进华,李晖.1991~2001年南昌市土地利用覆被变化特征研究. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2):173~176.
- [26] 程江,徐启新,杨凯,等.下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素. *给水排水*, 2007, 33(5):45~49.
- [27] 袁艺,史培军,刘颖慧,等.土地利用变化对城市洪涝灾害的影响. *自然灾害学报*, 2003, 12(3):6~13.
- [28] 孙铁珩,裴铁璠,张吉娜.森林流域洪涝灾害成因分析与防治对策. *中国减灾*, 1996, 6(3):35~38.
- [29] 郭明春,王彦辉,于澎涛.森林水文学研究述评. *世界林业研究*, 2005, 18(3):6~11.