

太湖流域 LUCC 对水文过程的影响*

荣洁, 曾春芬, 王腊春**

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 基于 1971 年枯水年、1989 年丰水年、2000 年平水年 3 类典型代表年的逐日降雨量、逐日蒸发量以及不同时期地表覆盖遥感分类数据, 以城市化快速发展地表覆盖变化明显的太湖流域为研究区域, 利用太湖流域河网水量模型进行了土地利用/覆被变化的水文响应研究, 分析了太湖流域 1990—2000 年与 2000—2006 年间的土地利用/覆被变化及其对水位过程的影响。不仅有利于对城市化地区水文特征变化规律深入了解, 也为典型城市化地区防洪减灾提供科学可靠的依据。研究表明, 太湖流域城镇化进程的加快引起了土地利用/覆被变化的主要表现是水田、水域等面积向城镇面积转化, 城镇化进程加快, 2000—2006 年期间的城镇化速度大于 1990—2000 年间; 下垫面的变化对太湖流域水文过程产生了明显的影响, 随着城市化进程地表覆盖的变化, 水位有整体升高的趋势, 并且增幅加大, 与城镇化速率变化趋势相一致, 城镇化程度高的地方水位上升更为明显; 降雨量也是水位过程的影响因素之一。

关键词: 土地利用/覆被变化; 水文响应; 水文过程; 太湖流域

The impact of land use/cover change on hydrological processes of Lake Taihu basin

RONG Jie, ZENG Chunfen & WANG Lachun

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China)

Abstract: Based on the daily rainfall, daily water surface evaporation of three typically representative years: dry year, wet year and average year, and land coverage data over different periods, this article selected the Lake Taihu basin which has obvious land cover changes and rapid urbanization as a typical area, to reveal the hydrological response of the basin to land use/cover change (LUCC) using the Taihu river system water quantity model, to analyze the LUCC of Lake Taihu basin from 1990 to 2000 and from 2000 to 2006, and its influence on water level process. This study can not only help for deep understanding on the variation of the hydrological characteristics of urbanized areas, but also can provides more scientific and reliable basis for flood control and disaster mitigation of typical urbanized area. Results showed that the acceleration of urbanization process caused the land use/cover change, whose features are conversion of paddy fields, water area to the urban one, and the acceleration of urbanization process. The urbanization rate for the period from 2000 to 2006 is greater than that during the period of 1990–2000. Underlying surface changes had a significant impact on the hydrological processes of Lake Taihu basin. With the land cover change under the urbanization process, water level increased in the overall, and so did the rate, consistent with the urbanization rate. High degree of urbanization, more obvious water level rising. Rainfall is also one of the factors controlling water level in the process.

Keywords: LUCC; hydrological response; hydrological process; Lake Taihu basin

土地利用/覆被变化 (LUCC) 体现了人类活动的干扰程度, 是水文变化的主要驱动要素之一^[1], 是直接或间接影响水文过程的第二个主要边界条件^[2]。流域水文过程是气象因素与下垫面共同作用的结果, 随着城市化的快速发展, 流域下垫面土地利用方式产生了较大变化, 流域内的降雨径流形成规律发生改变, 从而对流域水文过程产生较大影响, 并引发了一系列水文、水资源与水环境问题。不仅对区域水安全造成较大的威胁, 威胁到人类的生存环境, 而且还影响区域经济的可持续发展。因此, 在城

* 国家高技术研究发展计划“863”项目 (2009AA122502) 资助。2013-03-19 收稿; 2013-06-07 收修改稿。荣洁 (1989~), 女, 硕士研究生; E-mail: 813714355@qq.com.

** 通信作者; E-mail: wang6312@263.net.cn.

市化高速发展的背景下,采取有效方法揭示 LUCC 对水文过程的影响,对区域水环境的可持续发展有着重要的意义。

近年来,随着我国城市化进程的加快,下垫面变化引起的城市水资源短缺、洪涝灾害加剧以及水环境恶化等城市水问题日益引起人们关注。如 Wijesekara 等^[3]结合 CA 模型和 MIKE-SHE 模型,评估了加拿大亚伯达南部 Elbow 河流域未来 20 年土地利用变化对水文过程的影响;Warburton 等^[4]利用 ACUR 农业水文模型研究了南非 3 个不同流域的土地利用变化的水文响应;秦莉俐等^[5]利用 L-THIA 城市水文模型对浙江临安市南苕溪以上流域,分析了城镇化对径流的长期影响;此外,还有 HBV^[6]、HSPF^[7-8]、SCS^[9-10]等集总式模型,都模拟了土地利用变化对径流的影响及由此引发的水问题。尽管研究区域和研究方法不同,但研究结论都表明下垫面变化是影响径流量变化的主要因素之一。

目前的不少模型都需要涉及大量的流域水文、气象、下垫面资料,考虑的参数很多,并且很难确定,计算较为复杂,这些都使得大区域、中长尺度的水文模拟存在一定困难;同时,关于土地利用/覆被变化的规律探讨^[11-13]研究居多,但多是以单个城市或者城市内的汇水单元进行;以定性化描述土地利用与水资源间的相互关系等的研究居多,而量化描述土地利用/覆被变化的水文效应较少。太湖流域大部分地区属平原河网地区,地势平坦,河网纵横交错,水流方向往复不定,加之受潮汐和强烈人类活动影响,流域内水工控制建筑物(闸、泵、圩、堤等)星罗棋布,而以范围大、水网密度高、水情复杂的整个太湖流域为研究对象,建立河网水量模型的研究比较少。本文结合流域特点,以土地利用高度集约化、城市化快速发展的太湖流域为研究对象,建立相对简单的太湖流域河网水量模型,量化描述 LUCC 对流域水文过程的影响,基于不同降雨条件相同下垫面情境进行水文过程模拟,研究城市化发展区域水位过程变化规律,为城市防洪减灾决策提供依据。

1 数据来源与模型建立

1.1 数据来源与研究思路

获取土地利用等流域下垫面数据以及水文、气象数据是研究土地利用变化对流域水文过程影响的基础。本文选取了枯水年、丰水年、平水年 3 类典型代表年的逐日降雨量、逐日蒸发量数据;并利用遥感影像进行下垫面特征信息提取,获得地表覆盖遥感分类数据。考虑到遥感资料的可获取状况,本文共选取 1991、2001 以及 2006 年 3 个时段具有代表性遥感影像共 22 景,其中 Landsat TM 影像 14 景,包括 1991 年 7 景和 2006 年 7 景,2001 年则采用 Landsat ETM+ 影像共 8 景,遥感影像的空间分辨率均为 30 m。

对比分析 1990—2000 年与 2000—2006 年两个时间段内的土地利用/覆被变化情况,得出城镇化下的下垫面变化情况。同时讨论高速城市化下相同降雨情境不同土地利用/覆被变化对水文过程的影响,在相同的枯水年情境下讨论 1990、2000、2006 年下垫面下的水文过程模拟,同时也比较了平水年与丰水年情境下的水位。

1.2 模型的建立

本模型是根据河海大学研制的“HOHY23 太湖流域产流及河网汇流模型”的基础上,作了一定的调整修改而成,其产汇流基本原理及参数采用 HOHY23 的方法和参数。模型编制主要做了如下工作:1) 将编程语言改写为 Visual C++, 程序采用集成式界面,使程序更具结构性、可读性和可维护性,为今后模型进一步升级打下基础;2) 程序集成了产流计算、河网汇流计算、河网水质模拟、初始边界条件生成、降雨蒸发资料整理、潮位边界插值、面源污染物入河过程模拟、水文水资源特征值统计等子程序,水质特征断面统计子程序,并实现了河网水量水质耦合模拟计算;3) 本集成模型的重要模块及关键技术为河网水质模型及河网水量水质耦合模型,其他资料整理及结果统计也为新增模型;4) 根据 2000 年下垫面情况,修订了产流下垫面资料;在产流量计算中不再考虑工业和生活用水量,这部分水量在汇流计算中根据取水口位置和取水量加以考虑,并在汇流计算中考虑了污水排放水量;5) 在产流计算模型的山丘区产流汇流模拟中,消除了山区负出流过程。

该模型主要功能模块有资料处理模块、模拟模型模块和模拟结果统计模块。本文用到的资料处理模块包含以下模型:降雨资料整理、蒸发资料整理、潮位整点插值和潮位插值系数;用到的模拟模型模块包括:产

流计算模型、汇流初始边界条件生成和河网水量汇流模型;用到的计算结果统计模块包括:河网汇流结果统计,可统计代表站逐日水位过程。

其中,模拟模型用到的产流计算模型需要输入分区平均日雨量、日蒸发量及下垫面资料,模拟结果输出各分区圩外日净雨深、圩区排出的日净雨深及山丘区出口断面日平均流量。初始资料生成河网模拟计算需要初始数据及初始边界条件。在运行产流模型和初始资料生成后,用河网汇流模型模拟流域平原区河道各断面流量水位及各节点水位过程。

1.3 模拟原理

1.3.1 降雨产流模拟 由于不同下垫面具有不同的产流规律,将本流域下垫面分成4类:水面、水田、旱地和城镇道路。

- 1) 水面产流模拟:逐日水面产流(净雨深)为日降雨量与蒸发量之差。
- 2) 水田产流模拟:根据作物生长期的需水过程及水稻田适宜水深上、下限,耐淹水深等因素,逐日进行水量调节计算,推求水田产流过程。
- 3) 旱地产流模拟:旱地产流模型采用单层蓄满产流模型来计算产流量。蓄满产流以满足包气带缺水量为产流的控制条件。在流域全面产流的情况下,产流量可用简单的水量平衡方程式表示。雨期蒸发量采用单层蒸发模型。在流域不全面蓄满的情况下,产流量仅在蓄满的部分面积上产生。因此,要用概化了的流域蓄水容量分配曲线来计算产流量。通常概化为B次抛物线,由实测水文资料选配。

4) 城镇、道路产流模拟:城镇、道路的特点是透水性较差的下垫面覆盖,降雨产流采用径流系数法。

1.3.2 山丘及平原汇流模拟 1) 山丘区汇流模型:江苏部分为宜溧山区和茅山山区的汇流,江苏采用地区综合的瞬时单位线,其参数为 $k = m_1 \cdot m_2, n = 1/m_2$,而 $m_1 = 5.60(F/J)^{0.4}, m_2 = 0.35$ 。浙西山区西采用苕溪范家村站和东苕溪的瓶窑站以及进入太湖的区间面积上的代表站漾溪的实测资料,用时段单位线汇流。山丘区汇流计算所得结果为出口断面的流量过程。

2) 平原水网区汇流:圩区汇流:水圩内产水量除部分蓄于圩内沟塘外,其余部分要靠动力抽排入外河;非圩区汇流:平原非圩区的汇流计算采用汇流曲线进行。

2 结果与分析

2.1 代表站水位模拟验证结果

因下垫面资料和工程运行控制及河道资料均以2000年为基准,对比其他典型年份的模拟过程不能说明模型的可靠性,因此仅以2000年的模拟过程和实测过程加以对比。首先确定模型参数,根据历年水文资料进行模型参数的率定,根据2000年实测资料进行模型参数验证。共选择具有代表性的8个站点进行比较,实测水位过程与模拟水位过程拟合较好,误差较小。由于各站点对比图相似,限于篇幅,本文以太湖上游、湖体和下游具有代表性的站点王母观站、太湖站、陈墓站示之(图1)。选用相对误差检验作为模型的验证方法,3站的每日相对误差平均值分别为0.050、0.029和0.044,均小于0.05,精度等级属于二级,相对误差精度均能达到要求(表1)。

2.2 土地利用/覆被变化对比分析

根据1991、2001和2006年3个时段具有代表性的遥感影像共22景,选取太湖流域片段,利用遥感影像进行下垫面特征信息提取,获得地表覆盖遥感分类数据。分类参考中国土地资源分类系统,并根据研究区土地覆被类型的特点,依据研究的目的是将其归并为水田、水域、旱林地和城镇用地4大类别。分类精度达80%以上,总体平均Kappa系数达到0.80以上,其精度可以满足宏观

表1 2000年代表站水位过程模拟误差分析
Tab.1 Error analysis of water level process simulation of representative stations in 2000

代表站	每日相对误差平均值	精度等级划分
太湖	0.029	二级,良好
王母观	0.050	二级,良好
坊前	0.048	二级,良好
无锡	0.023	二级,良好
青阳	0.053	三级,合格
枫桥	0.018	二级,良好
湘城	0.035	二级,良好
陈墓	0.044	二级,良好

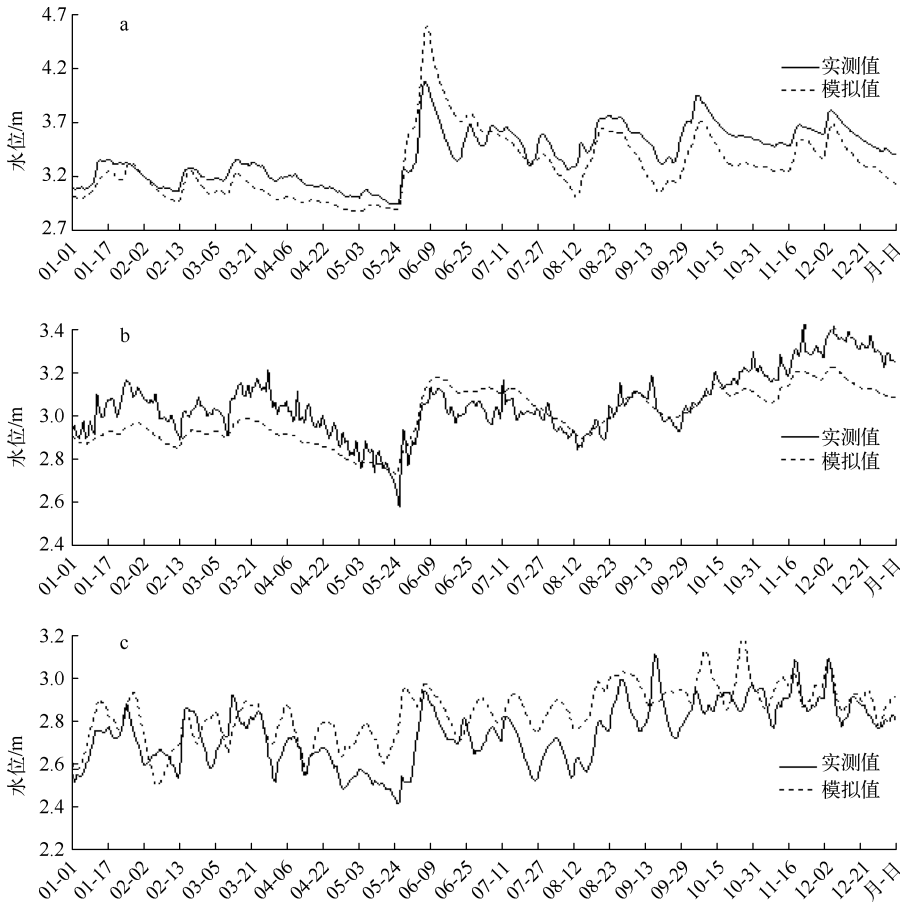


图 1 2000 年太湖流域王母观站点 (a)、太湖站点 (b) 和陈墓站点 (c) 的水位过程

Fig. 1 Water level process of Wangmuguan station (a), Taihu station (b) and Chenmu station in Lake Taihu basin in 2000

上大尺度下城市化遥感监测的要求. 由于水文资料收集的困难, 以 1991 年的地表覆盖资料近似代替 1990 年的情况; 以 2001 年地表覆盖资料近似代替 2000 年的情况. 1990—2000 年以及 2000—2006 年期间下垫面变化情况如表 2 所示.

两个时期下垫面变化面积趋势大体上一致, 随时间推移水田、水域面积向城镇面积转化. 有所不同的是, 1990—2000 年期间水域面积是明显减少的, 而 2000—2006 年期间水域面积大体上也是减少的, 但由于湖区片区水域面积大幅度增加, 导致水域面积总和增加. 此外, 2000—2006 年期间水田减少的面积比 1990—2000 年期间水田减少的面积更多, 相差高达 2202.08 km², 近 5 年间变化的面积是过去十多年减少面积的近 3.6 倍; 2000—2006 年期间城镇增加的面积比 1990—2000 年期间增加的面积更多, 两者城镇面积相差达 1326.27 km², 增幅为 2.7 倍. 以上数据均体现出随时间推移城镇化进程的加快, 并且 2000—2006 年这 6 年期间的城镇化速度远大于 1990—2000 年这 10 年期间的城镇化速度. 从近些年的下垫面变化面积可以看出洮滷片区和阳澄片区城镇化非常明显, 大片水田、水域面积转换为城镇面积; 以武澄锡和淀泖为代表的片区城镇化也较为明显; 运河片区和澄锡虞片区则部分水田转化为城镇用地, 湖区湖面等代表的总面积小, 城镇化不是很明显. 城镇化进程的加快引起土地利用/覆被变化的主要表现是水田、水域等面积向城镇面积转化. 对大量水域、水田的改造, 以及不透水面的增加, 对流域水文过程产生较大的影响, 从而引发了一系列水文、水资源与水环境问题.

表 2 1990—2000 年与 2000—2006 年间的下垫面变化面积
Tab.2 Underlying change areas of 1990—2000 and 2000—2006

分区	下垫面变化面积/km ²								总面积
	1990—2000 年				2000—2006 年				
	水域	水田	旱林地	城镇	水域	水田	旱林地	城镇	
运河片区	12.05	-45.28	16.49	16.74	55.03	-431.89	174.51	135.60	1112.5
洮滬片区	65.92	-220.49	69.08	85.49	-244.62	-618.76	436.51	426.87	3411.1
武澄锡区	-124.08	10.87	60.01	53.19	-10.58	-342.21	33.26	319.52	1887.5
澄锡虞区	-18.98	-159.59	15.86	162.71	157.66	-341.57	12.51	171.40	1513.2
阳澄片区	-73.53	-154.58	-2.63	230.73	-93.30	-619.79	60.07	653.02	2453.4
淀泖片区	-46.84	-98.46	-1.67	146.97	-59.43	-394.80	38.26	415.97	1562.8
湖区区间	65.55	-189.17	31.64	91.97	421.38	-317.13	-82.97	-21.27	765.0
湖面、岛屿	0.71	-2.36	1.12	0.53	-24.11	5.01	5.58	13.52	89.0
合计	-119.18	-859.06	189.89	788.35	202.03	-3061.14	677.73	2114.62	

2.3 水文响应对比分析

讨论高速城市化下土地利用/覆被变化对水文过程的影响,本文分别基于 1990(1991)年、2000(2001)年、2006 年 3 个阶段的下垫面进行了 1971 年枯水年、2000 年平水年、1989 年丰水年的水位过程模拟,以此探讨相同降雨情境下不同土地利用/覆被变化对水位过程的影响,为如何利用与管理太湖流域土地及水资源提供借鉴. 每个片区选取一个水位站点作为代表,分别选取丹阳站、洮湖站、无锡站、北国站、湘城站、陈墓站、太湖站作为各片区的代表站(湖区、湖面及岛屿以太湖站为代表). 由于流域内各站点模拟结果趋势类似,并鉴于文章篇幅,因此本文仅以无锡站水位过程图示之(图 2). 1 年的日模拟数据较多,为突出对比效果,只展示了降雨量比较集中的 7—11 月.

根据结果可知,城市化进程的加快导致下垫面发生明显变化,从而对太湖流域水文过程产生了明显的影响. 在相同降雨情境不同土地利用/覆被变化下,随着年份的推移水位升高. 通过同样水文条件下不同下垫面情况的水位过程对比发现,1990 年下垫面下模拟的水位基本上全年都要低于 2000 年与 2006 年下垫面情况下模拟的水位,2000 年下垫面下模拟的水位大部分时间低于 2006 年下垫面下模拟的水位. 这验证了城镇化的发展导致洪水水位增加,加大了区域内的防洪减灾压力.

城镇化下的下垫面的变化使水位过程升高,上升幅度逐渐加大,与城镇化速度的变化趋势一致. 由于丰水年降雨情境下,水位过程比较明显,所以以丰水年为例进行说明. 2006 年与 2000 年下垫面下模拟的水位过程最大差值均要高于 2000 年与 1990 年下垫面下模拟的水位过程最大差值(表 3),这与近 5 年城镇化速度远大于过去 10 年城镇化速度相一致. 并且城镇化程度高的地方水位上升更为明显,以洮湖为代表的洮滬片区、以湘城为代表的阳澄片区均是城镇化非常迅速的地区,该地区大片水田、水域等面积向城镇面积转化,导致水位升高明显,这两站两个时间段下垫面变化引起的最大水位差值分别增加了 4.67 倍与 3.33 倍(表 3). 究其原因,城镇化进程中,LUCC 使城市水分平衡发生改变,致使该地区水循环过程发生

表 3 丰水年不同土地利用/覆被变化引起的水位差值
Tab.3 Water level difference caused by different land use/cover changes in wet year

各区代表站	水位差/m		增值(倍)
	2000 年与 1990 年	2006 年与 2000 年	
丹阳	0.13	0.20	1.54
洮湖	0.03	0.14	4.67
无锡	0.08	0.15	1.88
北国	0.07	0.16	2.29
湘城	0.03	0.10	3.33
陈墓	0.04	0.09	2.25
太湖	0.02	0.05	2.50

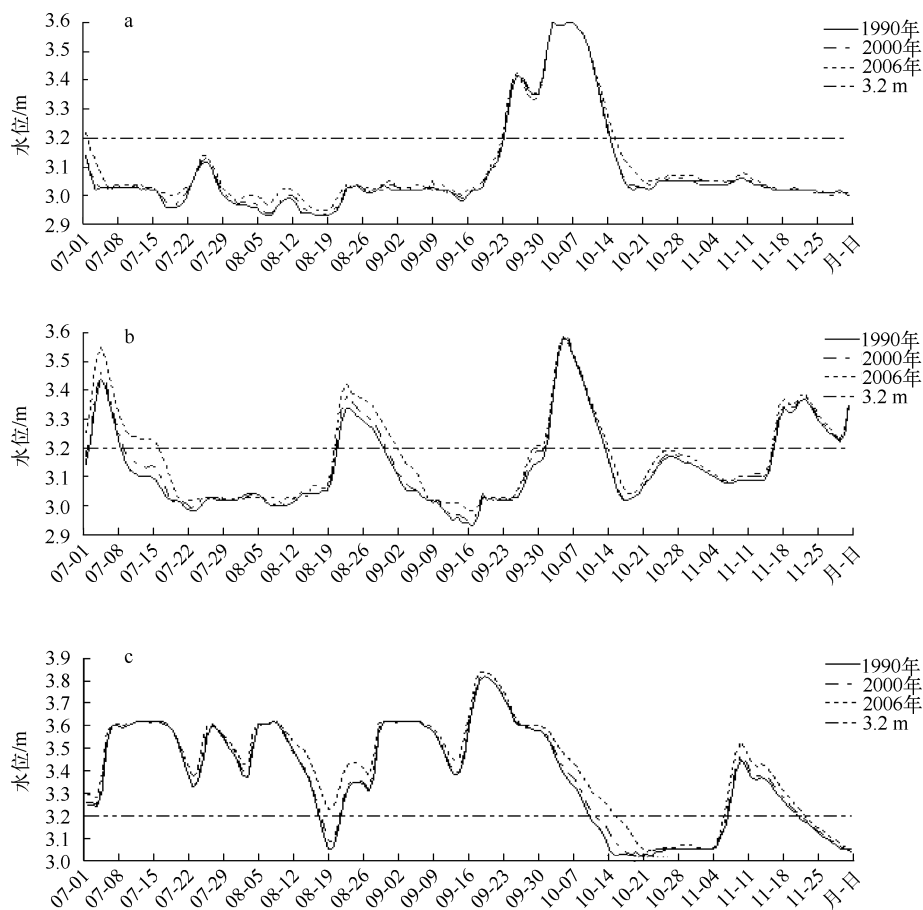


图2 1971年枯水年(a)、2000年平水年(b)和1989年丰水年(c)不同土地利用/覆被相同降雨情境下无锡站水位过程

Fig. 2 Water level process of Wuxi station under the different LUCCs and the same rainfall scenario in dry year of 1971 (a), average year of 2000 (b) and wet year of 1989 (c)

改变. 城市化不仅影响城市地区降雨, 同时快速城市化后建设用地增加, 水面减少, 相当比例的透水性下垫面被不透水的硬化表面所覆盖, 影响雨水的截留、下渗、蒸发, 从而增加产水量, 水位过程明显升高. 年有部分时段3个下垫面下水位过程线的高低与总体趋势不一致, 这表明除了下垫面外还有其他因素影响水位过程.

同时, 降雨量的多少是水位过程的主要影响因素. 丰水年型降雨条件下, 地表覆盖数据的水文响应比枯水年型下的水文响应更显著, 差值更大, 并且水位过程线基本上是丰水年高于平水年高于枯水年. 以无锡站为例, 无锡站枯水年、平水年和丰水年水位超过 3.2 m 的天数分别占全年天数的 15.03%、32.15% 和 48.09%.

3 结论与展望

3.1 结论

太湖流域是我国土地利用集约化程度高、经济发展最为快速的地区之一, 也是洪水灾害最为严重的地区, 研究城镇化下太湖流域 LUC 对水文过程的影响具有重要的意义. 太湖流域近些年城镇化快速发展, 大量水田水域被不透水面取代, 致使水循环过程发生改变, 影响了降雨及雨水的截留、下渗、蒸发, 从而增加产

水量,水位过程明显升高.主要结论如下:

1990—2000年与2000—2006年两个时期内,下垫面变化趋势大体一致,城镇化进程的加快引起了土地利用/覆被变化的主要表现是水田、水域等面积向城镇面积转化.城镇化进程加快,2000—2006年间的城镇化速度大于1990—2000年.对大量水域水田的改造,透水型下垫面被不透水的硬化表面所覆盖,对流域水文过程产生较大的影响.

城镇化进程的加快使土地利用/覆被发生变化,从而对太湖流域水文过程产生了明显影响.总体趋势是随着城市化进程地表覆盖的变化,水位有整体升高的趋势.在相同降雨情境下,1990年下垫面下模拟的水位基本上全年都要低于2000年与2006年下垫面情况下模拟的水位,2000年下垫面下模拟的水位大部分时间低于2006年下垫面下模拟的水位.这验证了城镇化加快导致的下垫面变化会加大洪涝灾害的发生率,必须要提出相应的防洪减灾对策.

城镇化进程引起的土地利用/覆被变化带来的水位差值增幅加大,2006年与2000年下垫面下模拟的水位过程最大差值均要高于2000年与1990年下垫面下模拟的水位过程最大差值,这与城镇化速率变化趋势相一致;并且城镇化程度高的地方水位上升更为明显.城镇化非常明显的洮滹片区、阳澄片区的代表站洮湖站、湘城站两个时间段下垫面变化引起的最大水位差值分别增加了4.67倍与3.33倍.

降雨量的多少是水位过程的主要影响因素,丰水年型降雨条件下,地表覆盖数据的水文响应比枯水年型下的水文响应更显著.

3.2 展望

由于资料收集的困难度和缺失性,以1991年的地表覆盖资料近似代替1990年情况,以2001年地表覆盖资料近似代替2000年情况,虽能宏观上反映土地利用的变化并研究其对水文过程的影响,但对于更细化的模拟城市化导致的下垫面变化的水文响应,后期需要进一步收集资料并做相关改进.

现有的很多土地利用分类体系不适合作为已建水文模型的输入条件,因此造成的地表分类精度与水文模型的耦合运用问题,有待进一步深入研究.后期可以尝试改善水文模型的相关方面,更好地应用地表覆盖数据进行相关研究.

4 参考文献

- [1] De Fries R, Eshleman KN. Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(11): 2183-2186.
- [2] Lahmer W, Pftzner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the Mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, **26**: 565-575.
- [3] Wijesekara GN, Gupta A, Valeo JC *et al.* Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 2012, **412/413**: 220-232.
- [4] Warburton ML, Schulze RE, Jewitt GPW. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*, 2012, **414/415**: 118-135.
- [5] 秦莉俐, 陈云霞, 许有鹏. 城镇化对径流的长期影响研究. *南京大学学报: 自然科学*, 2005, **41**(3): 279-285.
- [6] Hundecha Y, Bárdossy A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 2004, **292**(1/2/3/4): 281-295.
- [7] Brun SE, Band L. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computes Environment and Urban Systems*, 2000, **24**: 5-22.
- [8] Choi W, Deal BM. Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA). *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(4): 1119-1130.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wang HR, Gao YY, Liu Q *et al.* Land use allocation based on interval multi-objective linear programming model: A case study of Pi County in Sichuan Province. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(2): 176-183.
- [12] Liu M, Hu YM, Zhang W *et al.* Application of land-use change model in guiding regional planning: A case study in Hun-Taizi River watershed, northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(5): 609-618.

- [13] Su CH, Fu BJ, Lu YH *et al.* Land use change and anthropogenic driving forces: A case study in Yanhe River Basin. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(5):587-599.
- [14] Du JK, Qian L, Rui HY *et al.* Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2012, **464/465**:127-139.
- [15] 李恒鹏, 杨桂山, 金 洋. 太湖流域土地利用变化的水文响应模拟. 湖泊科学, 2007, **19**(5):537-543.
- [16] 李 燕, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化的水文效应及其风险评价. 水土保持通报, 2007, **27**(5):37-40.
- [17] 王艳君, 吕宏军, 施雅风等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响——以秦淮河流域为例. 自然资源学报, 2009, **24**(1):30-36.
- [18] 王腊春, 周寅康, 许有鹏等. 太湖流域洪涝灾害损失模拟及预测. 自然灾害学报, 2000, **9**(1):33-39.
- [19] 王腊春, 谢顺平, 周寅康等. 太湖流域洪涝灾害淹没范围模拟. 地理学报, 2000, **55**(1):46-54.
- [20] 吴文倩, 曹明明. 快速城市化条件下的西安市土地利用变化研究. 水土保持通报, 2008, **28**(4):129-132.
- [21] 陈 莹, 许有鹏, 尹义星. 基于土地利用/覆被情景分析的长期水文效应研究——以西苕溪流域为例. 自然资源学报, 2009, **24**(2):351-359.
- [22] 许有鹏. 长江三角洲地区城市化对流域水系与水文过程的影响. 北京: 科学出版社, 2012.