

太湖流域土地利用变化的水文效应及其风险评价

李燕^{1,2}, 李恒鹏¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以土地利用集约化程度高, 城市化进程快的太湖流域为研究区, 采用 1985, 2000 年 TM/ETM 土地利用解译数据分析 15 a 来土地利用变化特征。运用长周期水文分析模型 L-THIA, 基于流域各气象站 1971—2000 年共 30 a 的日序列降水数据, 计算 1985, 2000 年这 2 个时段土地利用特征对地表径流的影响, 评估土地利用变化的水文效应。研究表明, 太湖流域土地利用变化主要表现为城镇扩展。全流域城镇扩展导致年平均地表径流增加 $1.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约为总径流量的 2.9%。土地利用空间差异导致苏锡常区和浦东浦西区, 分别增加了 6.01% 和 3.91%。城市化高度发展的沪—苏锡常城市带, 1985—2000 年间城镇面积增加 635.2 km², 相应径流量增长 6.5%。基于单元格网城市化水文效应风险评价结果显示, 低、中、高风险区面积分别占评价区面积的 37.5%, 50% 和 12.5%。

关键词: 太湖流域; 土地利用变化; 水文效应; 风险评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)05-0037-04

中图分类号: P334.91

Hydrologic Effects of Landuse Change and Its Risk Evaluation in Taihu Basin

LI Yan^{1,2}, LI Heng-peng¹

(1. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences,

Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper takes Taihu Basin as a study area since it has highly intensive land use and is subject to rapid urbanization. Historical landuse scenarios in 1985 and 2000 are analyzed to track landuse changes by interpreting TM/ETM images. The L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) model is applied to estimate hydrological effects of landuse changes from 1985 to 2000, based on daily precipitation records spanning 30 years (1971—2000). Results show that the main trend of landuse change is the urban expansion in the basin, which results in an increase of runoff volume of $1.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, about 2.9% of the runoff volume from entire basin. Hydrological response varies with the extent of landuse changes in different parts of the basin. In Su—Xi—Chang and Pudong—Puxi sub-regions, with larger extent of landuse changes, the landuse changes result in runoff volume increases of 6.01% and 3.91%, respectively. In Hu—Su—Xi—Chang city zone, with intensive urbanization, the urban area expands as much as about 635.2 km² and the runoff volume increases by 6.5%. Based on runoff simulation and hydrological risk evaluation, the low, middle, and high risk areas are identified, which account for 37.5%, 50.0% and 12.5%, respectively.

Keywords: Taihu Basin; landuse change; hydrologic effect; risk evaluation

土地利用变化改变下垫面水力特征, 对水循环与水量平衡具有重要影响, 表现为下游洪水灾害加剧、地下水补给减少等, 从而对流域水资源、水环境以及流域生态产生显著影响^[1-3]。认识土地利用变化的水文效应, 对土地利用合理规划、减少人类活动对生

态系统的不利影响具有重要的指导意义。近年来, 土地利用变化对流域径流影响的研究日益受到重视^[4-7]。本研究选择代表性小流域, 应用分布式水文模型模拟方法, 比较不同时期用地特征以及不同用地情景的径流过程差异, 分析土地利用变化对特征暴雨

收稿日期: 2006-04-25

修回日期: 2007-11-06

资助项目: 国家自然科学基金 (40401056); 中国科学院知识创新重要方向性项目 (KZCX3-SW-331)

作者简介: 李燕 (1981—), 女 (汉族), 浙江省舟山市人, 硕士研究生, 主要从事 GIS 与流域管理方面的研究工作。E-mail: yanli@niglas.ac.

事件产流强度的影响。应用模型包括 SWAT, HSPF, TOPMODEL 等^[8-10], 由于此类模型一般结构复杂、涉及较多的水文及下垫面参数, 限制了大区域、长序列的水文模拟分析和应用, 目前土地利用规划还很少将水文效应作为土地利用方案优化的一个因子。本文选择经济发达, 城市化进程迅速, 土地利用集约化程度高的太湖流域, 采用结构相对简单的 L-THIA 长周期水文效应分析模型, 综合分析流域土地利用变化对地表产流的影响强度, 并对主要土地利用变化方式的水文效应进行风险评价, 为流域洪水灾害防治、土地利用规划与管理提供依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

太湖流域位于长江尾间与杭州湾之间, 是长江三角洲地区的核心部分。三面临江滨海, 一面环山, 北抵长江, 东临东海, 南滨钱塘江, 西以天目山、茅山等山区为界。主要属苏、浙、沪两省一市, 包括上海、苏州、无锡、常州、嘉兴、湖州等地区。流域面积约为 3 717 929 hm^2 , 约占全国土地面积的 0.4%。地势西部高东部低, 地貌类型包括山地丘陵及平原, 山地丘陵面积约占 25%, 主要分布于流域西部; 平原约占 75%, 分布于流域东部、南部和北部。流域气候属于亚热带季风气候, 年均降雨量约为 1 010~1 400 mm, 自北向南逐渐增加。受地形影响, 降雨量最大地区位于西南部的天目山, 主要集中于 4—9 月。流域地带性土壤为红壤和黄棕壤, 农业土壤为水稻土。

1.2 研究方法及资料获取

本研究采用 1994 年 Harbor 开发的长周期水文效应分析模型(L-THIA)评估土地利用变化对地表平均径流的影响。该模型面向流域用地规划和管理的需求, 以土壤、土地利用和降水等易于获取的流域数据作为输入, 可以快速分析土地利用变化对地表径流的影响, 尤其适合应用于数据相对缺乏、现实意义突出的区域尺度评估和应用。模型采用美国土壤保持局 SCS 曲线数(Curve Number, CN)法, 通过 30 a 逐日降水序列计算不同土地利用类型的地表产流量, 综合分析土地利用变化对多年不同强度暴雨径流的平均影响。由于模型从土地利用规划的需求出发, 评估土地利用变化对暴雨径流的影响; 而在单一暴雨事件中, 暴雨径流贡献往往远超过长期地下水补给的影响, 因此模型进行了合理的简化, 未考虑长期地下水的影响, 使评估过程易于实施。目前, L-THIA 被许多学者成功地应用于土地利用变化的水文效应分析和评估研究中^[11-13], Grove 于 1999 年将该模型与地

理信息系统软件 ArcView 进行集成, 使模型能够在 ArcView 环境中运行, 可以方便地应用大量的流域基础地理信息和地图数据。

模型运行需要土地利用、土壤、降水等流域下垫面参数及水文气象数据。土地利用采用 1985 年和 2000 年的 TM/ETM 影像目视解译数据, 用 1:5 万地形图数据对图像进行几何精纠正, 误差控制在半个像元(15 m)以内, 并根据模型要求进行类型归并和划分。土壤图采用土壤普查的 1:20 万土壤图数字化获得; 根据土壤志的有关粒度和质地参数, 按照国际标准确定质地分类, 并根据模型手册, 确定不同土壤类型的 SCS 类别; 参照美国土壤保持局 SCS 曲线或 USGS 手册确定不同土地利用和土壤类型组合的 CN 值, 并根据 5 d 临前降雨条件对 CN 值进行校正。降水数据选择太湖流域各气象站的监测数据, 选取的降水数据为 8 个站 1971—2000 年共 30 a 的日序列数据。数字地形采用 1:5 万地形图数字化建立。由于 L-THIA 产流计算采用单元格的计算方法, 运行过程需要对各参数进行空间离散化处理, 整个模型运行过程统一选取 300 m 网格大小。

2 分析过程与结果

2.1 太湖流域土地利用动态变化特征

采用 1985, 2000 年 TM/ETM 影像解译的土地利用信息, 分析 15 a 来土地利用的变化特征。土地利用类型包括耕地、林地、园地、草地、水体、滩涂、城镇用地和裸地(包括工矿用地)8 类。把两个时段的土地利用图进行空间叠加, 建立两个时段的土地利用转移矩阵(如表 1 所示)。其中第一行标识为 1985 年土地利用类型, 最后一行为 1985 年不同土地利用类型的统计结果; 第一列标识为 2000 年土地利用类型, 最后一列为 2000 年不同土地利用类型的统计结果; 矩阵各列对应的数据为 1985 年的某一土地利用类型经过 15 a 向其它土地利用类型的转化量。

由表 1 可以看出, 1985 年到 2000 年, 流域土地利用有较大变化, 变化的主要趋势是城镇用地不断增加, 增加的面积主要来源于耕地。1985 年城镇用地面积为 346 321 hm^2 , 占流域总面积的 9.31%, 到 2000 年增长到 470 424 hm^2 , 占流域总面积的 12.65%, 其中增加的 123 371 hm^2 城镇面积来源于 1985 年耕地。在这 15 a 间, 耕地面积由 2 364 140 hm^2 减少到 2 224 279 hm^2 , 林地面积由 474 260 hm^2 减少到 467 731 hm^2 , 分别减少了 3.76% 和 0.18%; 园地、草地、滩涂和水体面积有所增加, 但增加幅度均不到 0.22%, 其中滩涂面积仅增加 0.013%。

表1 1985年和2000年这2个时段的土地利用转变量

土地类型	耕地	林地	园地	草地	水体	滩涂	城镇	裸地	2000年合计
耕地	2 218 826	246	76.4	22	4 387	14.0	0	708	2 224 279
林地	4 024	462 587	429	450	56.4	0.1	0	184	467 731
园地	1 045	7 628	21 392	16	17	0.9	0	80.3	30 180
草地	20	2 889	0.4	16 494	1.3	0	0	0.1	19 405
水体	11 360	84	13.0	122	456 718	660.0	0	399	469 356
滩涂	219	1.4	0	311	615	165 98.0	0	12.6	17 757
城镇	123 371	333	135.0	13	179	0	346 321	73	470 425
裸地	5 275	492	17.0	343	50	0	0	12 620	18 797
1985年合计	2 364 140	474 260	22 063	17 771	462 024	17 273	346 321	14 077	3 717 929

2.2 流域土地利用变化对地表径流的影响

2.2.1 太湖流域土地利用变化的水文效应 运用模型来分析土地利用变化对流域地表径流的影响,把太湖流域土地利用类型合并为7类,其中由于林地和园地下垫面的水力特征比较接近,则将林地和园地归并为一类。根据太湖流域土壤的质地类型和粒度特征确定土壤 SCS 类别,土壤类别包括 A, B, C, D 共4类。由于太湖流域属于亚热带季风气候区,土壤的黏化程度不一,其中以 D 类面积最大。把土壤分布图、土地利用图、CN 表和连续 30 a 降雨数据整理为符合 L-THIA 的格式,同时根据临前 5 d 的降水特征对 CN 值进行修正。在 Arcview 环境中,采用 1971—2000 年 30 a 的降水序列,分别对 1985, 2000 年两个时段土地利用的地表径流进行模拟(见附图 1)。对这两个时段土地利用条件下地表产流 30 a 平均值进行统计,评估全流域土地利用变化对长周期地表径流的影响。统计结果显示,1985 年太湖流域平均地表径流量为 $3.94 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2000 年增加到 $4.05 \times 10^9 \text{ m}^3$, 增加量占太湖流域总径流量的 2.90%。

2.2.2 流域土地利用变化水文效应的空间差异 土地利用变化具有较大的空间差异,一般在经济发展快速,城市分布相对密集的地区变化较大。本文采用太湖流域水利分区与典型区相结合的方法进行评估。

根据流域水利分区与土地利用变化特征,将太湖流域(除太湖)划分为5个区,分别为浙西区、湖西区、苏锡常区、浦东浦西区和杭嘉湖区,统计各区内土地利用变化及其对地表产流的影响(表2)。5个分区中,土地利用变化最为明显的地区为苏锡常区和浦东浦西区,1985—2000年城镇扩展面积分别达 54 153.27, 25 566.39 hm^2 , 占各分区面积的比例分

别为 5.92% 和 5.84%; 相应地,这两个分区径流增加量占各区径流量的百分比分别达到 6.01% 和 3.91%。浙西区城镇面积扩展相对较少,占 0.39%, 相应径流增加量比例也较小,仅占 0.25%。

表2 1985—2000年太湖流域城镇扩展面积及其径流增量

分区	城镇扩展 面积/ hm^2	占各区百 分比/%	径流增量/ 10^7 m^3	增加比例 /%
浙西	2 347.11	0.39	0.2	0.25
湖西	30 917.70	3.98	2.9	3.38
苏锡常	54 153.27	5.92	4.6	6.01
浦东浦西	25 566.39	5.84	2.4	3.91
杭嘉湖	11 242.80	1.50	1.2	1.34

沪—苏锡常是流域内城镇分布密集,城市化最为快速的地带,也是土地利用变化最为剧烈的地区。因地处低洼地区,排水不畅,属于洪水及内涝灾害的易损地区。评估这一地带土地利用变化的水文效应对灾害防治具有重要的意义。为分析这一地带土地利用变化的水文效应,采用 GIS 的缓冲区分析方法。根据土地利用变化强度的空间差异,设定以沪、苏、锡、常为主轴的 22 km 缓冲区,缓冲区面积约为 930 568.4 hm^2 。该区域是流域内土地利用变化最为剧烈的地带,1985 年到 2000 年城镇面积增加了 63 521.3 hm^2 ; 统计该区内土地利用变化对地表产流的影响,1985, 2000 年地表径流量分别为 9.41×10^8 , $1.002 \times 10^9 \text{ m}^3$, 增加了 6.5%。由此可以看出城镇扩展对地表径流量的影响极其显著。

2.3 城市扩展水文效应的风险评价

根据以上分析,以城市化为主的土地利用变化方

式对地表产流具有较大的影响,影响程度与流域土地利用及土壤水力特性密切相关。在城市用地规划中,了解流域不同空间单元因城市化可能导致的不利水文影响,一方面可以避免选择敏感地区作为城镇规划用地,另一方面可以对敏感地区进行生态设计,最大程度减少城镇扩展对暴雨径流的影响。对流域内各空间单元城市化的水文效应进行了风险评价,并把径流增量作为风险等级的评价标准。评价区根据目前城镇用地的地形、地貌特征来确定,主要选择城镇用地分布的坡度范围作为划分参数。由于河湖水体周边地区已经被围垦,且已经认识到河湖的重要生态价值并有严格限制政策,故未来城镇扩展占用河湖水体的可能性较小,评价区域排除河湖水体分布区域。

根据以上标准确定评价区域,设定这一区域转换为城镇用地的分析情景,利用 1971—2000 年的降水数据,模拟分析评价区内各单元城市化对地表径流的影响。各网格增加的径流量在 3 000~23 386 m³ 范围内。以评价区内单元网格作为统计分析样本,并通过自然对数进行样本正态分布转换和归一化处理。按照等间隔分为低风险区、中风险区和高风险区。各分级对应城市化地表径流增加量分别为 3 000~7 690,7 690~13 164 和 13 164~23 386 m³。基于评价图进行统计,低、中、高风险区面积分别占评价区总面积的 37.5%,50%和 12.5%(见附图 2)。

高风险区主要位于浙西区 2000 年土地利用类型中耕地和坡度较小的林地地带;中低风险区一般分布于耕地地带,其中中风险区范围较广,遍及浙西区、湖西区、苏锡常、浦东浦西、杭嘉湖区,内绝大部分耕地;低风险区分布于 5 个分区的外围耕地区,这主要与耕地的土壤类型密切相关。

3 结论

(1) 太湖流域 1985—2000 年土地利用变化主要表现为城镇用地等建设用地向耕地扩展。从 1985 年到 2000 年,城镇用地增加了 124 103 km²,占流域总面积的 3.34%;其它土地利用类型变化较小。2000 年占流域面积 12.65%的城镇用地产生了占全流域 24.66%的径流量。

(2) 1985—2000 年全流域土地利用变化导致地表径流量平均增加量约为流域总径流量的 2.9%。流域土地利用变化的水文效应具有较大的空间差异,在城市化过程较快的苏锡常区和浦东浦西区,地表径流量分别增长了 6.01%,3.91%。而以沪—苏锡常为主轴高度城市化地带,径流量增加了 6.5%。

(3) 为了在未来城镇用地规划中最大程度减少对暴雨径流的影响,本文提出基于单元格网的城市化水文效应风险评估方法,并对太湖流域进行评价,评价结果显示低、中、高风险区面积分别占评价区总面积的 37.5%,50%和 12.5%。

[参 考 文 献]

- [1] 王根绪,张钰,刘桂民,等. 马营河流域 1967—2000 年土地利用变化对河流径流的影响[J]. 中国科学(D辑,地球科学),2005,35(7):671—681.
- [2] 王建群,卢志华. 土地利用变化对水文系统的影响研究[J]. 地球科学进展,2003,18(2):292—298.
- [3] Budhendra B, Jon H, Bernie E, et al. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS—NPS model[J]. Environmental Management,2003,26(6):643—658.
- [4] 王根绪,杨玲媛,陈玲,等. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J]. 地理学报,2005,60(3):456—466.
- [5] 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[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):6—13.
- [6] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报,2001,21(7):1041—1050.
- [7] 黄榆茗,卢光辉. 新店河流域土地利用型态与径流特征之研究[J]. 资源科学,2004,26(增刊):137—143.
- [8] 张雷娜,李秀彬,王兆锋,等. 一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨——SWAT模型在云州水库流域的应用研究[J]. 水文,2004,24(3):4—8.
- [9] 郭太英,程春田. 基于 TOPMODEL 的分布式水文模型应用研究[J]. 南水北调与水利科技,2005,3(4):47—49.
- [10] Chou Tien-yin, Xie Zheng-dao, Chen Mei-hsin. The Application of quantitative assessment of land use changes impact on water conservation for reservoir watershed [C]. Hydrology Days,2003. 45—55.
- [11] Pandey S, Lim K, Harbor J, et al. Assessing the long-term hydrologic impact of urban sprawl—A practical geographic information system based approach [M]. Enfield, New Hampshire: Science Publishers Inc., 2000. 247—259.
- [12] Kim Y, Engel B, Lim K, et al. Runoff Impacts of land use change in the Indian River lagoon watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(3):245—251.
- [13] 李恒鹏,杨桂山,刘晓玫,等. 流域土地利用变化的长周期水文效应及管理策略——以太湖上游地区蠡河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(4):450—455.