

巢湖流域土地利用变化对雨洪调蓄能力的影响

周文强, 马友华, 吴雷, 高原, 詹雪洁
(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036)

摘要:为探究土地利用结构变化对雨洪调蓄能力的影响,以1980—2020年巢湖流域的土地利用数据和土壤数据为基础,采用GIS和SCS模型相结合的方法,分析了不同时期不同降雨尺度下巢湖流域径流产生及分布情况。结果表明:1980—2020年巢湖流域土地利用变化主要表现为建设用地的增加及耕地和林地的减少;流域土地利用综合指数持续增长,其中高强度土地利用区面积从127 km²增长到了1 624 km²。1980—2020年渗透性差的地区从1 706.0 km²增加到了2 398.1 km²,以城市区域扩张为主。2020年相较于1980年,在不同土地利用条件下,相同降雨量时径流量明显增大,且主要在巢湖流域的合肥地区,而在增加降雨量时,径流量的增加幅度逐渐减小,在不同降雨量条件下(日降雨量为50、100、250 mm)径流量分别增大了6.11%、2.61%和0.96%。因此可以得出土地利用变化是导致径流量变化的主要因素,降雨量是次要因素。研究结果可为巢湖流域城市规划及城市雨洪风险管理提供参考。

关键词:土地利用变化;雨洪调蓄能力;SCS模型;巢湖流域

中图分类号:P333.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0101-08

Land use change affects stormwater storage capacity of the Chaohu Basin

ZHOU Wenqiang, MA Youhua, WU Lei, GAO Yuan, ZHAN Xuejie

(College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to explore the impact of land use structure change on the stormwater regulation and storage capacity, based on the land use data and soil data from 1980 to 2020, the runoff generation and distribution in the Chaohu Basin under different rainfall scales in different periods were analyzed by combining GIS and SCS models. The results show that from 1980 to 2020, the land use change in the basin mainly showed the increase of construction land and the decrease of cultivated land and forest land; the comprehensive index of land use in the basin continued to increase, with the high-intensity land use area increasing from 127 to 1,624 km². The area with poor permeability increased from 1,706.0 to 2,398.1 km² from 1980 to 2020, which was mainly attributed to urban expansion. Compared with 1980, under different land use conditions, the runoff increased significantly with the same rainfall, which was mainly located in the Hefei area of the Chaohu Basin; however, with the increase of rainfall, the effect of runoff increase diminished gradually, the runoff in 2020 increased by 6.11%, 2.61% and 0.96% under different rainfall conditions(50, 100 and 250 mm). Therefore, it can be concluded that land use change is the primary factor of runoff change and rainfall comes the second. The research results are expected to provide some reference for the urban planning and urban stormwater risk management in the Chaohu Basin.

Key words: land use change; stormwater regulation and storage capacity; soil conservation service (SCS) model; the Chaohu Basin

收稿日期:2022-07-08; 修回日期:2022-10-07

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240203);安徽省高校研究生科研项目(YJS20210221)

作者简介:周文强(1997—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,研究方向为土地利用变化的水文响应。

通讯作者:吴雷(1989—),男,安徽宿州人,博士,讲师,研究方向为水资源与水环境。

1 研究背景

随着经济社会的发展与变化,城市化进程加快引起土地利用结构的改变致使地区水文循环过程变化显著^[1]。城市化建设过程中,下垫面以沥青、水泥为主的不透水面大规模增加,由此导致流域的产汇流机制发生改变^[2],大大提高了城市区域发生暴雨洪涝灾害的风险^[3],从而制约了经济社会的可持续发展^[4]。因此,城市化建设背景下的土地利用变化洪水响应研究成为地理、水文等学科关注的重点问题之一。

城市化的快速发展,导致流域下垫面的剧烈变化,直接影响到流域产汇流规律和对洪水的调节作用^[5]。城市化对洪水过程的影响识别与定量评估是城市水文学研究的重点,该领域经历了数年的理论和实践,发展了多种有效的研究方法和技术手段,大体可以分为3类,即观测试验对比法、水文时间序列分析法和水文模型法。观测试验对比法主要应用于较小的流域,相较于国外更为完善的水文观测体系,国内观测试验研究在测点密度、检测技术和硬件设备上均呈现劣势,并且具有明显的地域特征,无法推广普及^[6]。水文时间序列分析需要较长的时间序列观测资料,且对资料精度要求高,然而该方法对水文过程机理却反映不足^[7]。而水文模型法相较于前两种方法优势显著,其具有结构简单、易于操作的优点,且能够很好地反映水文物理过程响应机制^[8]。20世纪50年代,美国农业部水土保持局开发出了一种适用于中小尺度空间的SCS(Soil Conservation Service)水文模型^[9],国内外学者以此为支撑,对地表径流受土地利用类型变化的影响开展了大量的研究,研究内容主要有模型参数^[10-11]、土地利用变化情况对地表径流的响应^[12-13]、SCS水文模型在其他模型上的应用^[14-16]等。结果表明,SCS模型参数简单易获取,模拟结果具有较高的准确性,可以广泛应用于多种流域^[17],它也是当前诸如SWAT、EPIC、HEC-HMS和ANSWERS等众多水文模型中的重要产流模块^[18]。但是,目前已有的研究均重点探讨了土地利用变化下流域尺度径流总量的响应规律,而没有精细刻画流域径流响应的空间异质性^[19-20]。

近年来,巢湖流域暴雨洪水频发,流域内土地利用情况变化显著。针对不同的地形和下垫面,本研究基于1980—2020年巢湖流域土地利用遥感动态监测数据,分析了土地利用变化特征,借助SCS模

型探讨了流域土地利用变化的径流响应机理及其空间分布差异。研究成果揭示了土地利用变化对雨洪调蓄能力的影响,有助于定量识别巢湖流域城市化地区的洪涝危险区,为区域洪水风险图编制、防洪规划和低影响开发等提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

巢湖流域位于安徽省中部,东南濒临长江,西接大别山脉,北依江淮分水岭,东北临滁河流域,面积约 $1.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全流域地势西高东低,渐向巢湖倾斜,地貌类型主要有低山、丘陵、岗地和冲积平原。流域内河流众多,主要入湖河流有杭埠河、丰乐河、派河、塘西河、十五里河、南淝河、柘皋河、兆河、白石天河等,其来水呈放射状汇入巢湖,后经裕溪河、牛屯河或经兆河流入西河最后注入长江。该流域气候类型属于北亚热带季风气候,降水多集中于夏秋季节,且常发生长历时梅雨和特大台风暴雨等灾害性天气。由于地理位置特殊,气候条件复杂,导致流域洪涝灾害频发。改革开放以来,巢湖流域经历了快速的城市化过程,剧烈的人类活动深刻改变了下垫面状态,流域产汇流特性也随之发生改变。巢湖流域地形、水系及多年平均降水量空间分布如图1所示。

2.2 数据来源

2.2.1 遥感数据 Landsat-5 TM(1980年)、Landsat-7 ETM⁺(2000年)和Landsat-8 OLI(2020年)Level 1T地形矫正影像来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),根据瞬时状态下最大限度使图像上尽可能多地反映地物信息,优先选择3月上旬或10月下旬含云量小于10%的影像。参考国内外土地利用分类方法^[21],通过人机交互目视解译将巢湖流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地。

2.2.2 土壤数据 巢湖流域的土壤数据来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所建立的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD)以及第二次全国土地调查数据,主要采用FAO-90土壤分类系统,土壤数据的空间分辨率为1:1 000 000。

2.3 研究方法

2.3.1 SCS模型 SCS模型是美国农业部水土保持局针对产流过程开发的经验水文模型,其具有结构简单、参数需求少、资料易获取、结果较准确的优点,在次降雨地表径流及其过程预测研究中应用广

泛。SCS 模型基于水量平衡方程和两个基本假设:

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

式中: P 为降水量, mm; I_a 为初损值, mm; F 为实际入渗量, mm; Q 为实际地表径流深, mm; S 为潜在最大滞留量, mm; λ 为初损系数, 值域为 $[0.1, 0.3]$ 。

根据文献[22]中给出的 I_a 与 S 的关系式, $I_a = 0.2S$, 得出降雨-径流的关系方程为:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geq 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases} \quad (4)$$

该方程只需要两个输入参数, 即降水量 P 和土壤潜在滞蓄量 S , 其中 P 是已知参数, 为估算 S , SCS 模型引入一个反映降雨前流域特征的综合参数 CN , 其与土壤潜在滞蓄量 S 的关系式为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

式中: 综合参数 CN 的理论值域为 $[0, 100]$, 由前期土壤湿润度 (antecedent moisture condition, AMC, 分为干旱 AMC I、平均 AMC II 或湿润 AMC III)、水文土壤类型和土地利用类型等综合确定^[23]。本研

究假设前期土壤湿度为 AMC II, 研究区不同土地利用类型的 CN II 值^[24] 如表 1 所示。

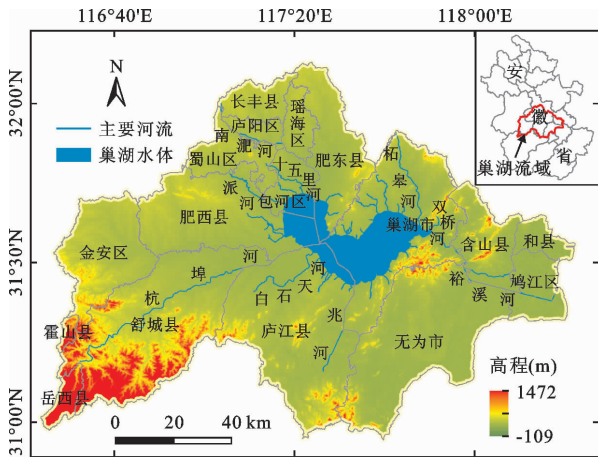
表 1 巢湖流域 SCS 模型不同土地利用类型的 CN II 值

| 土地利用类型 | 土壤水文组 | | | |
|--------|--------|---------|----------|-----------|
| | A (透水) | B (较透水) | C (较不透水) | D (接近不透水) |
| 耕地 | 67 | 78 | 85 | 89 |
| 林地 | 32 | 58 | 73 | 79 |
| 草地 | 39 | 65 | 78 | 84 |
| 水域 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| 建设用地 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 未利用地 | 72 | 82 | 88 | 90 |

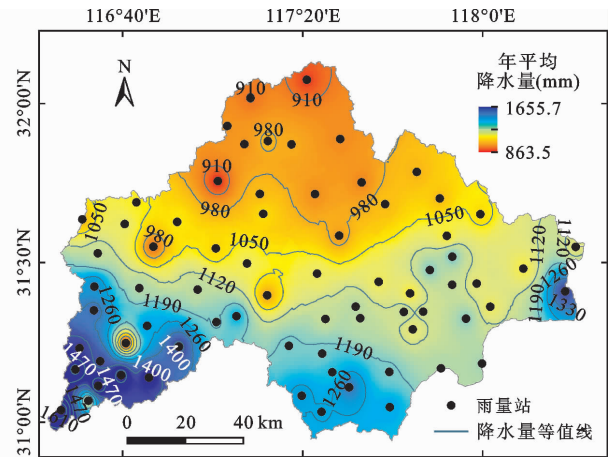
2.3.2 土地利用程度综合指数 本研究采用庄大方等^[25] 提出的土地利用程度综合指数 (L_a) 来评价土地资源利用强度, 其计算公式为:

$$L_a = 100 \sum_{k=1}^n (A_k \cdot C_k) \quad (L_a \in [100, 400]) \quad (6)$$

式中: L_a 为土地利用程度综合指数; C_k 为第 k 级别的土地利用类型分级面积占比; A_k 为第 k 级别的土地利用类型分级指数。定义建设用地分级指数为 4, 耕地分级指数为 3, 水域、草地和林地分级指数为 2, 未利用土地分级指数为 1。



(a) 地形与水系分布



(b) 年平均降水量分布(1965—2019年)

图 1 巢湖流域地形、水系及多年平均降水量空间分布

2.3.3 土地利用分类精度评价 本研究通过“随机选点、重复分类”对土地利用遥感解译结果进行验证。根据不同地类面积按比例创建随机样点, 建立地表“真实”图像与分类结果之间的混淆矩阵, 计算总体分类精度和 Kappa 系数 K_a ^[26]。

$$P_c = \frac{\sum_{k=1}^m P_{kk}}{N} \quad (7)$$

$$K_a = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^m P_{ii} - \sum_{i=1}^m (P_{pi} \cdot P_{li})}{N^2 - \sum_{i=1}^m (P_{pi} \cdot P_{li})} \quad (8)$$

式中: P_c 为总体分类精度; m 为分类类别数; N 为样本总数; P_{kk} 为第 k 类的判对样本数; P_{ii} 为第 i 类被正确分类的样本数; P_{pi} 为某一类所在列总数; P_{li} 为某一类所在行总数。 K_a 值范围为 $[-1, 1]$, 但通常 K_a

值落在 $[0,1]$,将 K_a 值分为5组来表示不同级别的一致性:0~0.20为极低一致性;0.21~0.40为一般一致性;0.41~0.60为中等一致性;0.61~0.80为高度一致性;0.81~1.00为几乎完全一致性。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化特征

为分析1980—2020年巢湖流域土地利用时空变化过程,通过人机交互目视解译获得1980、2000和2020年3期土地利用分类图,并通过计算土地利用程度综合指数得出流域的土地利用强度空间分布,如图2所示。图2表明,巢湖流域3期土地利用

的总体分类精度分别为87.56%、92.41%和92.22%,Kappa系数 K_a 值分别为0.84、0.91和0.90,具有较高的分类精度。

基于1980和2020年巢湖流域土地利用分类数据构建土地利用转移矩阵,如表2所示。综合分析图2和表2可知,1980—2020年巢湖流域经历了快速的城市化过程,2000—2020年建设用地扩张速度明显加快,尤其以合肥市市区表现最为显著。1980年建设用地位于巢湖流域第4大用地类型,2020年建设用地面积超过水域,占比仅次于耕地和林地,增加的建设用地绝大多数(约97%)由耕地转化而来;林地面积略有减少,而水域、草地和未利用地面积有少量增加。

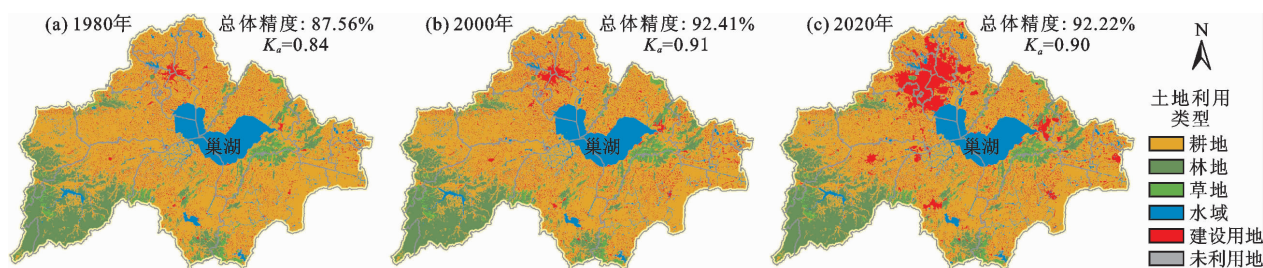


图2 1980—2020年巢湖流域土地利用类型空间分布

表2 1980—2020年巢湖流域土地利用转移矩阵

| 土地利用类型 | 林地 | 草地 | 耕地 | 未利用地 | 建设用地 | 水域 | 总计 |
|--------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
| 林地 | 14.94 | 0.16 | 0.37 | 0 | 0.07 | 0.01 | 15.55 |
| 草地 | 0.10 | 3.66 | 0.11 | 0 | 0.08 | 0 | 3.95 |
| 耕地 | 0.41 | 0.15 | 57.13 | 0.01 | 7.28 | 0.73 | 65.71 |
| 未利用地 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0.01 |
| 建设用地 | 0.01 | 0.01 | 0.67 | 0.01 | 5.83 | 0.02 | 6.55 |
| 水域 | 0.01 | 0.01 | 0.29 | 0 | 0.05 | 7.87 | 8.23 |
| 总计 | 15.47 | 3.99 | 58.57 | 0.03 | 13.31 | 8.63 | 100.00 |

以乡镇(街道)为基本分析单元,基于1980、2000和2020年巢湖流域土地利用遥感解译成果计算对应年份的土地利用程度综合指数 L_a ,并将研究区划分为低强度土地利用区($L_a \leq 280$)、中强度土地利用区($280 < L_a \leq 320$)和高强度土地利用区($320 < L_a \leq 4000$),如图3所示。由图3可见,低强度土地利用区主要分布在巢湖流域西南部、南部及巢湖东南部的丘陵山区,单元数量由1980年的55个减少到2020年的46个,减少的区域转化为中强度土地利用区;同时,高强度土地利用区不断扩张,由1980年的33个(127 km^2)增加到2020年的74个(1624 km^2),均由中强度土地利用区转化而来,也主要发生在合肥市市区。

3.2 渗透能力变化特征

借鉴苏伟忠等^[3]的研究成果,按照CN值小于

70、70~80、80~90、大于90将研究区相应分为渗透能力优、良、中、差4个等级。1980—2020年巢湖流域土地利用渗透能力空间分布及等级结构如图4和表3所示。

分析图4和表3可知,土地利用类型对地块的渗透性起主导作用,土地渗透能力按林地、草地、耕地、未利用地、建设用地和水域顺序依次降低;土壤类型对地块的渗透性起次要作用,按土壤水文组A、B、C、D顺序依次降低。1980—2020年巢湖流域渗透性为优、良和中的地块面积占比分别从18.13%、23.37%和45.96%减少为17.92%、21.68%和42.77%,而渗透性为差的地块面积占比从4.25% (1706.0 km^2)增加为8.93% (2398.1 km^2)。总体而言,巢湖流域土地渗透能力趋于下降,并在合肥市市区表现得最为明显。

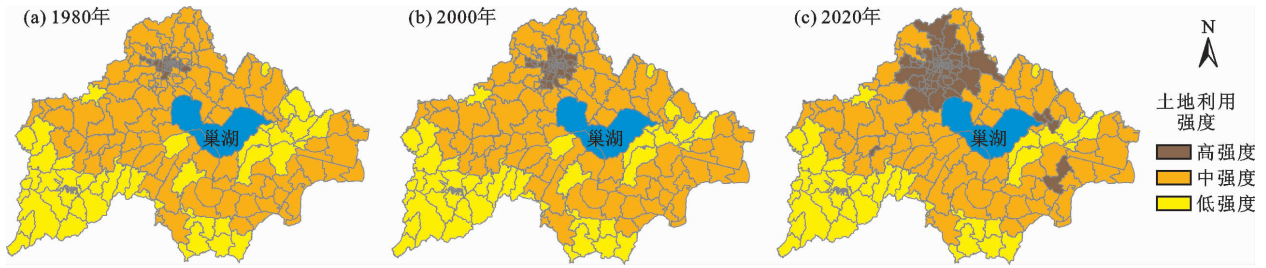


图 3 1980—2020 年巢湖流域土地利用强度空间分布

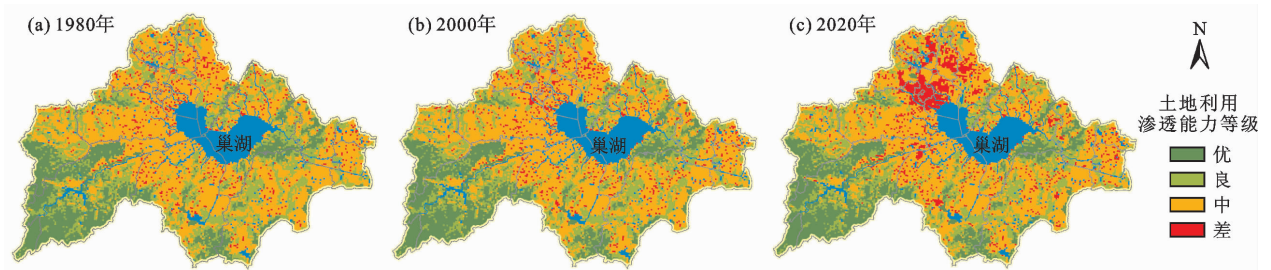


图 4 1980—2020 年巢湖流域土地利用渗透能力空间分布

表 3 1980—2020 年巢湖流域土地利用渗透性能力等级结构

| 土地利用类型 | 土壤 A | | | 土壤 B | | | 土壤 C | | | 土壤 D | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1980 年 | 2000 年 | 2020 年 | 1980 年 | 2000 年 | 2020 年 | 1980 年 | 2000 年 | 2020 年 | 1980 年 | 2000 年 | 2020 年 |
| 林地 | 85.7 | 82.9 | 81.6 | 1578.7 | 1574.6 | 1578.7 | 432.4 | 432.4 | 432.4 | 20.4 | 20.4 | 19.0 |
| 草地 | 5.4 | 6.8 | 6.8 | 382.1 | 383.5 | 380.7 | 133.3 | 133.3 | 130.5 | 5.4 | 5.4 | 5.4 |
| 耕地 | 413.4 | 405.2 | 388.9 | 2559.1 | 2468.0 | 2304.8 | 5610.4 | 5456.8 | 4953.6 | 359.0 | 341.3 | 335.9 |
| 未利用地 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.4 | 0.0 | 0.0 | 2.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 建设用地 | 32.6 | 42.2 | 59.8 | 273.3 | 357.6 | 516.7 | 545.3 | 684.0 | 1161.2 | 32.6 | 49.0 | 53.0 |
| 水域 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 68.0 | 77.5 | 77.5 | 217.6 | 231.2 | 258.4 | 837.6 | 840.3 | 843.1 |

注:深绿色、浅绿色、黄色、红色分别表示渗透性优、良、中、差等级。

3.3 土地利用变化的雨水地表径流响应特征

以 24 h 累积降雨量 P 为 10、25、50、100、250 mm 作为输入量,通过 SCS 模型计算地表径流量随 CN 值的变化关系,如图 5 所示。由图 5 可见,当 $P < 0.2S$ 时,由于初损和入渗的影响,不产生地表径流;当 $P > 0.2S$ 时,在相同的降雨量条件下,随着 CN 值增大地表径流量呈指数型增长,当降雨量足够大时甚至接近线性增长。表 4 为 1980—2020 年巢湖流域不同 CN 值地块面积占比,可以发现 CN 值高的区域面积占比持续增加,这将导致相同降雨条件下区域的产流量增大,从而加大了发生洪涝灾害的风险。

巢湖流域灾害性的洪水主要是由长历时、大面积、高强度暴雨所导致的^[27]。通过 SCS 模型计算出 1980—2020 年巢湖流域不同土地利用强度、不同暴雨条件下(日降雨量 P 分别为 50、100 和 250 mm)径流深的响应差异,如图 6 所示。

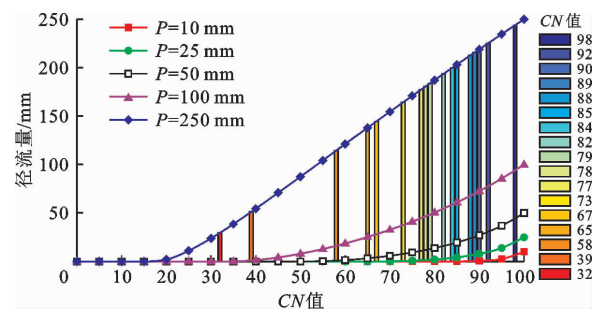


图 5 1980—2020 年巢湖流域不同降雨量下地表径流量随 CN 值的变化

图 6 表明,在相同的暴雨条件下,高强度土地利用区地表径流深最大,其次为中强度土地利用区,而低强度土地利用区地表径流深明显偏小;随着以城市化为典型的土地利用变化,高强度土地利用区地表径流深增加明显;但随着暴雨量级增大,增加的幅度逐渐减小,而中强度和低强度土地利用区这种差异不明显。

表4 1980—2020年巢湖流域不同CN值地块面积占比

%

| 年份 | CN 值 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | 32 | 39 | 58 | 65 | 67 | 73 | 77 | 78 | 79 | 82 | 84 | 85 | 88 | 89 | 90 | 92 | 98 |
| 1980 | 0.63 | 0.04 | 11.61 | 2.81 | 3.05 | 3.18 | 0.24 | 19.80 | 0.15 | 0 | 0.04 | 43.27 | 0 | 2.64 | 4.01 | 0.24 | 8.29 |
| 2000 | 0.61 | 0.05 | 11.58 | 2.82 | 2.97 | 3.18 | 0.31 | 19.13 | 0.15 | 0 | 0.04 | 42.76 | 0 | 2.51 | 5.03 | 0.36 | 8.49 |
| 2020 | 0.60 | 0.05 | 11.61 | 2.80 | 2.86 | 3.18 | 0.44 | 17.91 | 0.14 | 0.01 | 0.04 | 40.23 | 0.02 | 2.47 | 8.54 | 0.39 | 8.71 |

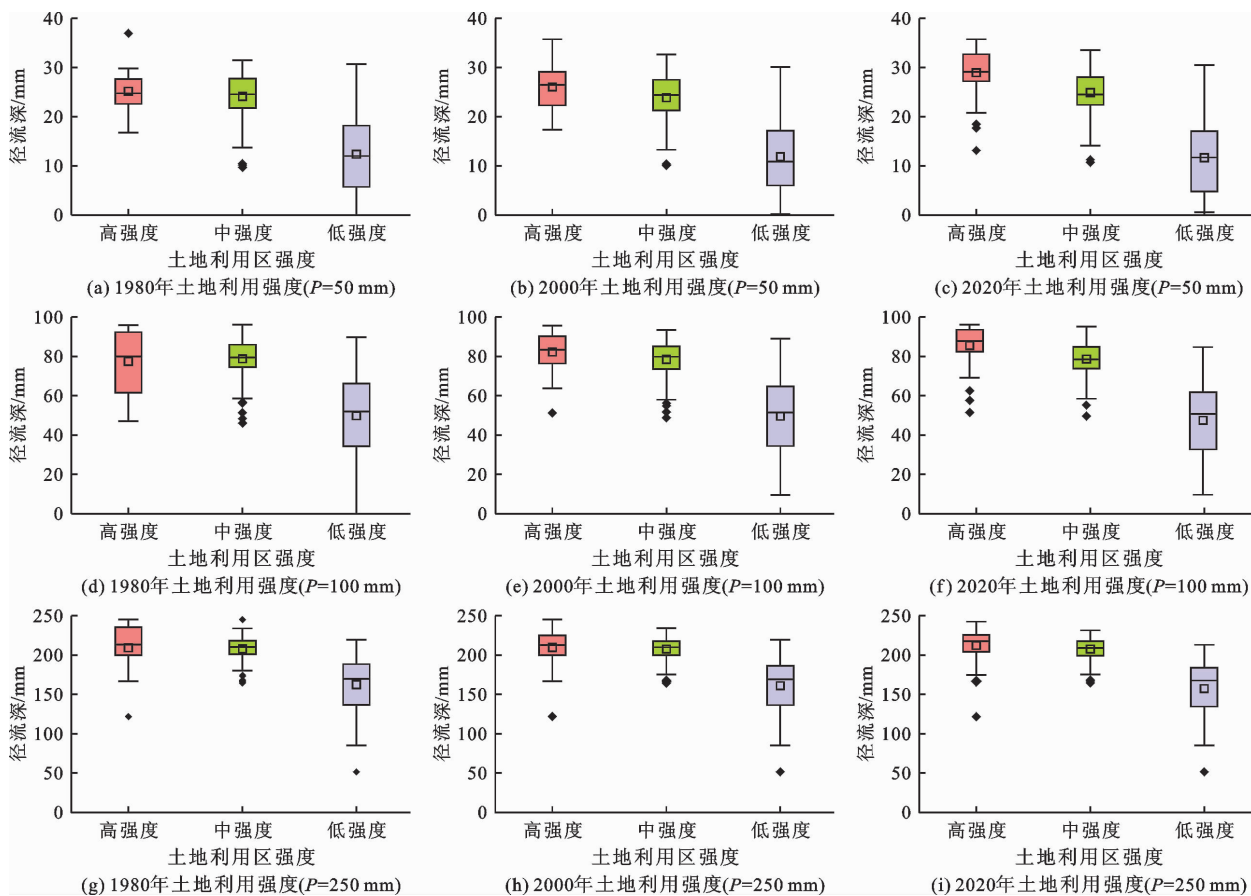


图6 1980—2020年巢湖流域不同土地利用强度和不同暴雨条件下径流深响应差异

使用 SCS 模型对巢湖流域 1980、2000 和 2020 年不同土地利用-土壤组、不同暴雨条件下(日降雨量 P 分别为 50、100 和 250 mm)的径流量进行模拟,得到的流域径流深空间分布如图 7 所示。由图 7 中不同年份纵向对比可知,在相同日降雨量情况下,由于城市建设程度的加强,降雨产生的径流在城区有明显增大,主要集中在巢湖流域内合肥地区。而在 250 mm 日降雨量下有径流量明显偏低的地区,主要分布于林地,并且林地土壤水文组渗透率最高,因而产生的径流量较小。

4 讨论

土地利用变化对流域降雨径流特征的影响一直是学者们重点研究方向之一。本研究结果显示,

1980—2020 年巢湖流域建设用地面积增多,同时耕地、林地等面积减少。已有研究发现,建设用地占用耕地是雨洪调蓄功能降低的主要原因^[3];绿地和建设用地的破碎程度对城市内涝风险有重大的影响^[18];城市建成区的增长伴随着植被覆盖的减少,双重因素导致城市集水区地表径流的深度增加^[15],与其他地区相比,城市径流明显增加,这些结论与本研究结果一致。原因是城镇用地的透水性差,影响了水文下渗过程,导致地表径流增加^[28],而高植被和草地覆盖区域会提高对降水的截留能力,有效减少径流^[29]。

与其他水文模型的研究方法不同,本研究使用 SCS 模型进行降雨径流模拟时不考虑径流累积、径流持续时间和坡度等其他因素^[30]。大部分水文模

型都是通过降雨量模拟地区径流量并与实测流量达到高度拟合,而本研究为了分析一个地区不同土壤及不同土地利用类型所产生降雨径流的差异性,将全流域降雨量进行统一取值,与常规的通过各个雨

量站插值来获取地区降雨量的方法有所不同^[31]。本研究以乡镇为尺度,划分不同强度的土地利用区,分析了时间和降雨量变化下的径流响应原理和分布情况。

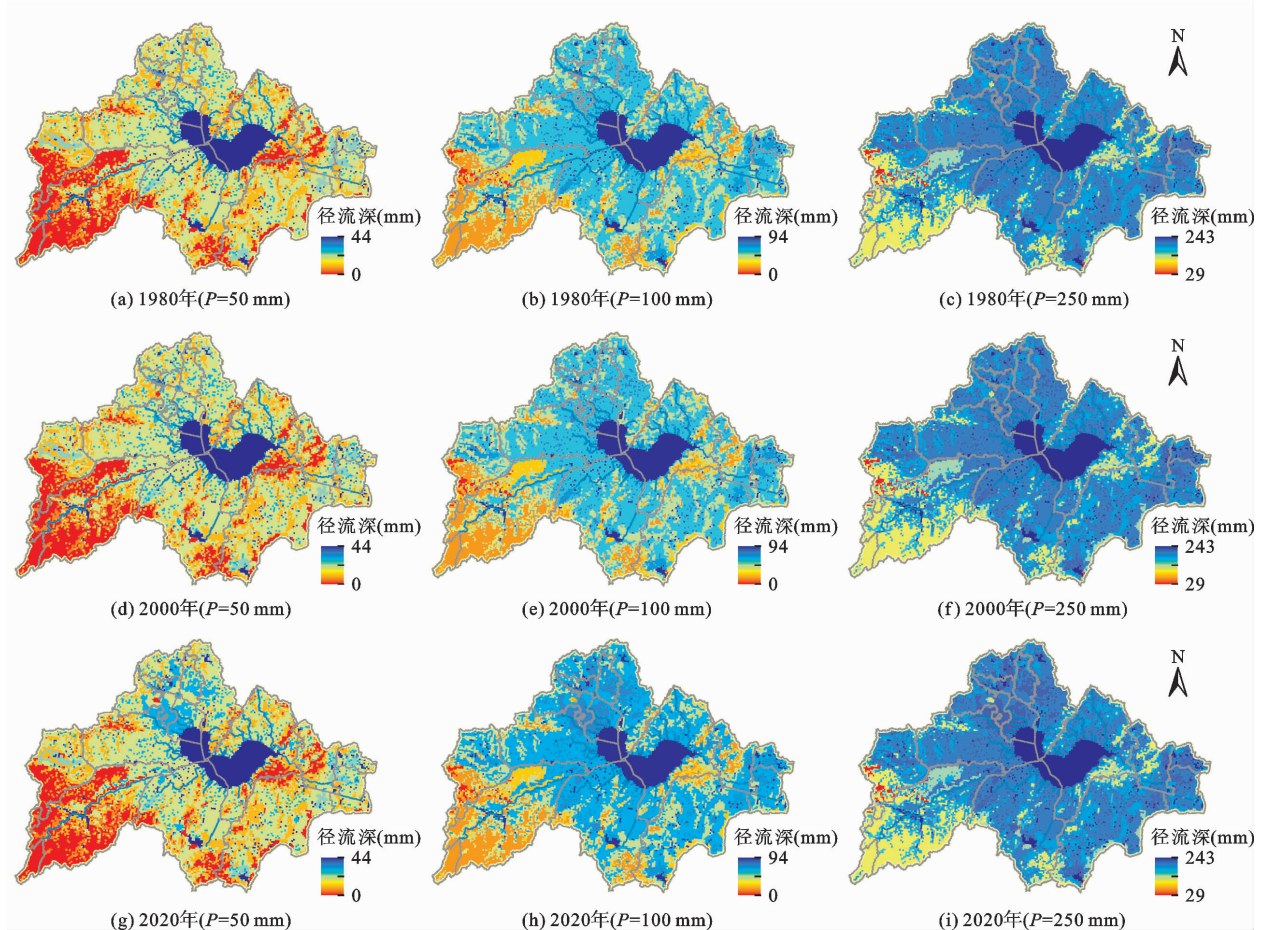


图7 1980—2020年巢湖流域不同暴雨条件下径流深空间分布

SCS-CN模型能够很好地应用于复杂地质和缺乏水文资料地区的径流模拟^[32],该方法具有涉及参数少且参数易获取的优势。本研究中CN值是根据国内学者研究的相关文献所确定,但模型的一些具体参数需要根据流域的实际情况进一步确定。从研究结果可知,巢湖流域城市化发展迅速,下垫面的变化导致城市地区降雨径流相比其他地区明显增大,并且由于城市地区下垫面的不透水性,使城市径流退流缓慢,因此,在发生长时间强降雨时,可能会造成严重的城市内涝。本研究结果可为城市化发展较快区域的降雨径流分析提供参考,今后的研究可以将实测径流和模拟径流相互结合进行地区径流的优化模拟。

5 结论

(1)1980—2020年巢湖流域土地利用变化过程

中,耕地和林地等不断减少,而建设用地面积由905 km²增加到了1 829 km²。其中,1980—2000年建设用地增长率为26.87%,而2000—2020年建设用地扩张速度明显加快,增长率达到59.30%。快速城市化的同时会导致径流产排不均衡,在发生强降雨情况下,部分城镇地区可能会发生洪水内涝现象。

(2)随着城市化建设的快速发展,1980—2020年巢湖流域渗透性等级为差的地块面积占比由4.25% (1 706.0 km²)增加至8.93% (2 398.1 km²)。其中以合肥市蜀山区、包河区、瑶海区扩增明显,其他地区变化较少。全流域不透水面积的增加,将会导致流域径流总量增大。

(3)从整个巢湖流域来看,径流总体变化不明显,但人类活动引起的城市化迅速扩张对部分区域的降雨径流影响较大。因此,未来规划应当重视局部城市地区的产流高风险区域,在快速城镇化的过

程中做好防洪减灾措施,建设与完善排水系统,同时发掘生态优势,考虑不同景观格局带来的产流风险差异,以缓解城区排水压力。

参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [2] 孙延伟,许有鹏,高斌. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响——以南京秦淮河为例[J]. 湖泊科学,2021,33(5):1574-1583.
- [3] 苏伟忠,汝静静,杨桂山,等. 流域尺度土地利用调蓄视角的雨洪管理探析[J]. 地理学报,2019,74(5):948-961.
- [4] 姚磊,卫伟,于洋,等. 基于GIS和RS技术的北京市功能区产流风险分析[J]. 地理学报,2015,70(2):308-318.
- [5] 邓睿,张治意,陈亚,等. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究,2019,26(3):141-147.
- [6] 王强,许有鹏,于志慧,等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析[J]. 水科学进展,2022,33(5):743-753.
- [7] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展,2020,31(3):313-323.
- [8] 田晶,郭生练,刘德地,等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报,2020,75(11):2307-2318.
- [9] 李晶,周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析[J]. 地理学报,2014,69(7):933-944.
- [10] 邓景成,高鹏,穆兴民,等. 黄土区SCS-CN模型径流曲线数计算方法研究[J]. 人民黄河,2018,40(4):9-14+18.
- [11] 权瑞松. 基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应[J]. 自然资源学报,2018,33(9):1552-1562.
- [12] 李子君,刘金玉,鲁成秀,等. 基于土地利用变化的沂河流域景观格局与径流关系的分析[J]. 中国农业大学学报,2020,25(10):11-19.
- [13] 何孟铮,李宏伟,刘杨,等. 顾及土地利用类型的大坡岭流域水文响应模拟研究[J]. 水电能源科学,2021,39(5):17-20+53.
- [14] 王思思,侯爽,王榕. 城市绿地产流影响因素与径流系数取值的多方法比较[J]. 环境工程,2021,39(12):84-90+242.
- [15] KHZR B O, IBRAHIM G R F, HAMID A A, et al. Runoff estimation using SCS-CN and GIS techniques in the Sulaymaniyah sub-basin of the Kurdistan region of Iraq[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 24: 2640-2655.
- [16] 唐钰嫣,潘耀忠,范津津,等. 土地利用景观格局对城市内涝灾害风险的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):1-11.
- [17] MINSEOK K, CHULSANG Y. Application of the SCS-CN method to the Hancheon Basin on the volcanic Jeju Island, Korea[J]. Water, 2020, 12(12):3350.
- [18] ALHUMIMIDI M S. Estimation of potential runoff in Wadi Damad Watershed, Jazan Province, southwestern Saudi Arabia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 296.
- [19] SONG S, XU Y P, WU Z F, et al. The relative impact of urbanization and precipitation on long-term water level variation in Yangtze River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 460-471.
- [20] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature, 2018, 563(7731):384-388.
- [21] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报,2018,73(5):789-802.
- [22] Soil Conservation Service, U. S. Department of Agriculture. National engineering handbook, section 4: hydrology[M]. Washington D C: US Government Printing Office, 1972.
- [23] 吴雷. 基于RS & GIS的暴雨洪涝灾害风险评估——以汉江流域中下游为例[D]. 武汉:华中师范大学,2015.
- [24] 汪梦涵,赫晓慧,郭恒亮. 土地利用数据分辨率对SCS模型在径流模拟中的影响[J]. 人民珠江,2020,41(10):30-35.
- [25] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [26] 陈立伟,张雅涵,王立国. 基于SOP-SRL波段选择和3D-Gabor滤波的高光谱图像分类[J]. 哈尔滨工程大学学报,2021,42(8):1230-1236.
- [27] 万能胜,齐鹏云. 巢湖流域2020年特大洪涝灾害应对实践与思考[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(4):37-41.
- [28] 薛宝林,张瀚文,闫宇会,等. 黄河流域气候与土地利用变化对径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):445-453.
- [29] 傅春,毛安琪. 抚河流域径流对土地利用变化时空响应[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(2):342-350.
- [30] KARUNANIDHI D, ANAND B, SUBRAMANI T, et al. Rainfall-surface runoff estimation for the lower Bhavani Basin in south India using SCS-CN model and geospatial techniques[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79: 335.
- [31] 董文涛,程先富,张群,等. SCS-CN模型在巢湖流域地表产流估算中的应用[J]. 水土保持通报,2012,32(3):174-177+187.
- [32] DARJI K, PRAKASH I, PHAM B T. Runoff estimation of Machhu and Watrak rivers basins of Gujarat India using SCS-CN method and GIS[J]. Indian Journal of Ecology, 2020, 47(3):726-732.