

# 昆明市地表径流影响因子分析

曹言<sup>1</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 柴素盈<sup>2</sup>, 戚娜<sup>1</sup>

(1. 云南省水利水电科学研究院, 昆明 650228; 2. 云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

**摘要:**为探索 SCS 模型在昆明坝区地表径流模拟中的适用性和影响因子,利用 1986 年、1995 年、2000 年、2007 年、2014 年昆明市区土地利用类型数据和 5 个气象站点的逐日降雨数据,通过修正后的 SCS 模型分析了昆明市区地表径流的影响因子。结果表明:(1)模拟的地表径流深度随着降雨量的增加呈极显著线性增加,且表现出丰水年>偏丰水年>平水年>偏枯水年的趋势,地表径流量最大值出现在降雨最多月份(6 月或 7 月),月平均雨水产流次数达到 20 次,最小值则出现降雨较少月份(1 月或 12 月)。(2)降雨强度在不同等级之间变化时,地表径流深度变化幅度差异较大,且随着降雨强度增大,地表径流系数呈现快速增长的趋势。单次降雨和单位毫米径流深度均表现前期土壤湿度越高,雨水产流能力则越强的趋势。(3)地表径流量随着渗透比例的减小整体呈现上升趋势,且丰水年土地利用变化对年地表径流的影响明显大于平水年和偏枯水年。

**关键词:**SCS 模型; 降雨; 地表径流; 土壤湿度; 土地利用

**中图分类号:**P333.1; P343.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)02-0139-06

## Analysis on the Influence Factors on Surface Runoff in the Urban Area of Kunming City

CAO Yan<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, CHAI Suying<sup>2</sup>, QI Na<sup>1</sup>

(1. Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China; 2. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China)

**Abstract:** In order to explore the applicability and influence factors of surface runoff base on SCS model in Kunming dam area, based on land use data and daily rainfall data of 5 meteorological stations in Kunming City in 1986, 1995, 2000, 2007 and 2014, the influence factors on surface runoff were analyzed by modified SCS model in the urban area of Kunming City. The simulated results showed that the modeled runoff depth significantly linearly increased with the increase of rainfall, the runoff depth decreased in the order: high flow year>partial high flow year>normal flow year>Low flow year, the maximum rainfall runoff occurred in the month with most rainfall (June or July), the average monthly rainfall reached up to 20 events, the daily average runoff was 3.41 million m<sup>3</sup>, the minimum rainfall runoff occurred in the month with Less rainfall (January or December). There were distinct variations in runoff depth when rainfall intensity varied between different rainfalls, the coefficient of surface runoff rapidly increased with the increase of rainfall intensity. In terms of single rainfall and unit millimeter rainfall, the surface runoff increased with the increase soil moisture. Surface runoff increased with decrease of proportion of permeability area, in term of annual surface runoff, land use change had more significant impact on it in wet years than that on dry years.

**Keywords:** SCS model; rainfall; surface runoff; soil humidity; land use

地表径流是水量平衡重要的组成部分,也是田间水文重要的内容之一,对流域水资源开发利用和农作物生产管理具有重要应用价值<sup>[1]</sup>。研究表明<sup>[2-7]</sup>,地表径流受气象因素和下垫面因素共同影响,其中气象

因素主要包括降雨量、降雨强度和降雨持续时间等,下垫面因素主要包括坡度和土地利用类型等因素。如李建柱等<sup>[2]</sup>研究表明汛期降雨量和降雨强度的减少对大清河流域洪水次数和量级的减少具有一定的

影响。陈晓安等<sup>[3]</sup>采用人工模拟降雨试验分析不同坡度和雨强对红壤耕地地表径流的影响,结果表明地表径流强度随雨强增大而增大,随坡度先增大后减小。陈晓燕等<sup>[4]</sup>利用 SWMM 模型探讨降雨和土地利用对地表径流的影响,结果表明地表径流随降雨增加而显著线性增加,随渗透面积比例增加反而呈显著下降趋势。史培军<sup>[5]</sup>、郑璟<sup>[6]</sup>、马亚鑫<sup>[7]</sup>等研究均表明城市化的快速发展,导致土地利用发生变化,进而增大地表径流。然而,目前对地表径流影响因子的研究还大多集中在单因子方面,针对多因子综合分析还相对较少。

SCS-CN 是模拟单场降雨地表径流中最常用的水文模型。该模型综合考虑了土壤类型、土地利用、土壤湿度等特点,具有较强的适用性,且参数改进空间大,通过参数改进的模型被诸多学者广泛的应用的全球不同地区<sup>[8-12]</sup>。例如 Mishra 等<sup>[8]</sup>在美国 Waco 流域对初损率  $\lambda$  进行改进后相对误差由 -21.57% 缩小至 10.11%。Shi<sup>[9]</sup>、Xiao<sup>[10]</sup> 等分别在中国南方三峡区王家沟流域和黄土高原六道沟小流域对初损率  $\lambda$  进行率定,模型在各自流域模拟精度均较高。陈正维等<sup>[11]</sup>通过坡度修正 SCS 模型中 CN 值和率定初损率  $\lambda$ ,有效地预测了四川盆地紫色土坡地降雨径流。王瑾杰等<sup>[12]</sup>利用卫星观测数据和遥感反演地表参数对 SCS 模型中最大可能持水量(S)进行计算,该方法具有较高的模拟精度,不受 CN 值的影响,具有较强的适用性。

昆明市区(102°35′39″—103°0′48″E,24°42′1″—25°12′42″N),包括五华区、盘龙区、西山区、官渡区、

呈贡区和空港经济区,面积 1 028 km<sup>2</sup>,气候属于亚热带高原季风气候,多年平均降雨量为 923.9 mm。近年来由于昆明市城市化的快速发展,气候变化和农业种植结构的不断调整,导致昆明主城区降雨—径流特征发生变化。本研究通过率定初损率  $\lambda$ ,利用坡度修正后 SCS 模型模拟不同时间尺度下昆明市区降雨地表径流,探讨降雨量、降雨强度、土壤湿度及土地利用变化与地表径流的响应关系,不仅能够准确认识降雨—径流关系,也可为地区雨水收集利用和城市内涝防控提供一定的参考。

1 数据及研究方法

1.1 数据资料

1.1.1 降雨和径流数据 降雨数据采用云南省气象和中国气象科学数据共享服务网提供的昆明市区及周边的昆明(102.65°E,25.0°N)、呈贡(102.8°E,24.88°N)、太华山(102.62°E,24.95°N)、宜良(103.17°E,24.92°N)和嵩明站(103.03°E,25.33°N)5 个气象站点,1986 年、1995 年、2000 年、2007 年、2014 年逐日降雨数据,利用泰森多边形对气象站点代表的地域范围进行划分,计算每个气象站地域范围内的逐年逐次降雨产流。草地的径流数据选用呈贡大渔乡 2001—2002 年 8 场降雨事件,城市建设用地的径流数据选用主城明通河流域 2006—2007 年 6 场降雨事件,水田的径流数据选择昆明市嵩明县 2016 年 11 场降雨事件,其试验选择在大型侧坑中进行,观测记录水稻生育期内降雨前后侧坑水层深度,降雨事件均是发生在水稻生长期内。具体见表 1。

表 1 降雨事件的基本情况

类型	位置	项目	降雨时间(年-月-日)	数据来源
园地草地	昆明市呈贡区大渔乡	率定	2001-08-14,2001-08-20,2001-08-22,2001-09-20	文献[13]
		验证	2002-06-25,2002-06-30,2002-07-07,2002-07-19	
城市建设用地	昆明主城区明通河流域	率定	2006-05-26,2006-07-09,2007-04-17	文献[14-15]
		验证	2007-04-11,2007-05-16,2007-07-12	
水田	昆明市嵩明县小街镇试验大田	率定	2016-05-21,2016-05-30,2016-06-22,2016-07-01,2016-07-30	实测数据
		验证	2016-07-02,2016-07-04,2016-07-15,2016-08-01,2016-08-04,2016-08-05	

1.1.2 土地利用类型数据 土地利用类型数据选用中国科学院环境数据中心提供 1:10 万的 1986 年、1995 年、2000 年土地利用类型数据,该数据均由 3 期同年陆地卫星 TM 影像经过人工解译获得。2007 年、2014 年数据通过 ENVI 5.0 对 SPOT5(2007 年 3 月 26 日)和 SPOT6(2014 年 11 月 24 日)同期遥感影像进行正射校正、几何校正、影像分割、合并分块处理等,完成对遥感影像的解译。共涉及 10 种土地利用类型(附图 1—2)。

1.1.3 其他数据 土壤类型数据由中国科学院资源

科学数据中心提供,采用 ArcGIS 对研究区内的土壤类型数据进行提取(附图 3),根据土壤最小下渗率<sup>[16-17]</sup>和土壤质地<sup>[18]</sup>,将昆明市区土壤类型划分为 B、C、D 这 3 种类型(表 2),由图 1 可知,昆明市区土壤类别以山原红壤和水稻土为主,SCS 模型土壤类型以 D 类和 C 类为主,其中城市建设用地属于不透水地表,将其划分 D 类<sup>[7]</sup>。DEM 数据采用项目组内部 30 m 分辨率的数字高程数据,主要用于计算研究区坡度进而修正 CN 值。

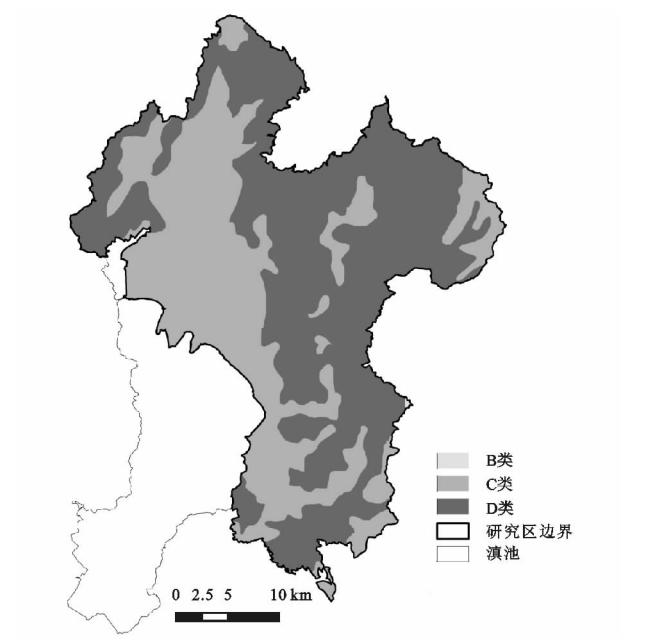


图 1 昆明市区 SCS 模型土壤类型分布

1.2 研究方法

1.2.1 SCS-CN 模型 SCS-CN 模型假设降雨实际

表 2 昆明市区土壤类型分类情况

SCS 模型 土壤类型	最小下渗率/ (mm · h <sup>-1</sup> )	土壤质地	土壤类别
B 类	3.81~7.26	壤土、粉砂质壤土	紫色土
C 类	1.27~3.81	砂黏壤土	红壤、黄壤、黄棕壤、沼泽土、冲积土、水稻土
D 类	<1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、黏土及人工硬质地面	山原红壤、潜育水稻土、城市建设用地

1.2.2 基于坡度修正 CN 值 SCS 模型中不同土壤类型与土地利用类型对应的 CN 值不同,根据国内相关研究成果<sup>[21]</sup>确定研究区传统正常条件下的 CN<sub>2</sub> 值(表 3)。传统 SCS 模型的 CN 值未考虑到坡度对降雨产流的影响,CN 值变化较降雨量对地表径流的影响更为敏感。因此,本文采用 Hang 坡度修正公式<sup>[22]</sup>对 CN<sub>2</sub> 值(表 3)进行修正,具体见公式(5)。

$$CN_e=CN_2(322.79+15.63CN_2)/(\alpha+323.52)$$

(5)

式中:CN<sub>e</sub>为坡度修正后的 CN<sub>2</sub> 值,无量纲;α 为多边形坡度值,用百分比(%)表示。

2 结果与分析

2.1 初损率 λ 的率定

由于研究区受人为活动影响较大,土地利用类型较为复杂,且缺少相关的水文站点监测数据。因此本文根据研究区相关研究成果和大田试验实测数据,对草地(以草地为主,果树均是幼苗)、城市建设用地和水田的初损率 λ 进行率定,检验模型模拟的效果(图 2)。在率定期,当草地、城市建设用地和水田 λ 取 0.2,0.05,0.05 时,模拟值和实测值平均相对误差为 14.96%,

入渗量与其潜在最大入渗量之比等于地表径流量与潜在最大径流量之比,其模拟方程为<sup>[19]</sup>:

$$Q=\frac{(P-\lambda S)^2}{P+(1-\lambda)S} \quad (P\geqslant\lambda S, \text{ 否则 } Q=0)$$

(1)

式中:Q 为地表径流量(mm);P 为降雨量(mm);S 为最大可能储水量(mm);λ 为初损率,无量纲,一般定义 λ=0.2。其中 S 通过 CN(curve number)值计算而得,具体见公式(2)。

$$S=\frac{25400}{CN}-254$$

(2)

式中:CN 值为径流曲线数,其主要取决于流域前期土壤湿润程度(AMC)、土壤类型和土地利用类型的特征,通常参考美国《国家工程手册》的标准。而 AMC 表示前 5 d 的降雨总量 API,一般根据 API 将 AMC 划分为 3 种等级,即干旱条件(AMC I)CN<sub>1</sub>,正常条件(AMC II)CN<sub>2</sub> 和湿润条件(AMC III)CN<sub>3</sub><sup>[20]</sup>,其中 CN<sub>1</sub> 和 CN<sub>3</sub> 可通过 CN<sub>2</sub> 进行相互换算,即公式(3)和公式(4):

$$CN_1=4.2CN_2/(10-0.058CN_2)$$

(3)

$$CN_3=23CN_2/(10+0.13CN_2)$$

(4)

R<sup>2</sup> 为 0.70;在验证期,草地、城市建设用地和水田模拟值和实测值的平均相对误差为 12.46%,R<sup>2</sup> 为 0.95。模型模拟的平均相对误差均小于 15%,且 R<sup>2</sup> 均在 0.70 以上,加之研究区范围较大,下垫面较为复杂,因此模型模拟精度基本上是在可接受范围内,模拟结果相对可信。此外,根据相关研究和各土地利用类型的产流特点<sup>[23-25]</sup>,将有林地、灌木林、疏林地、旱地 λ 取值为 0.2,将裸地、水体、大棚 λ 取值为 0.05。

表 3 昆明市区传统 AMC II 正常条件下 CN<sub>2</sub> 值

土地利用类型	SCS 模型土壤类型		
	B 类	C 类	D 类
有林地	58	70	77
灌木林地	67	68	77
疏林地	66	83	83
草地	67	79	84
水域	98	98	98
城市建设用地	92	94	95
裸地	86	94	94
水田	86	92	98
大棚	96	96	96
旱地	72	78	84

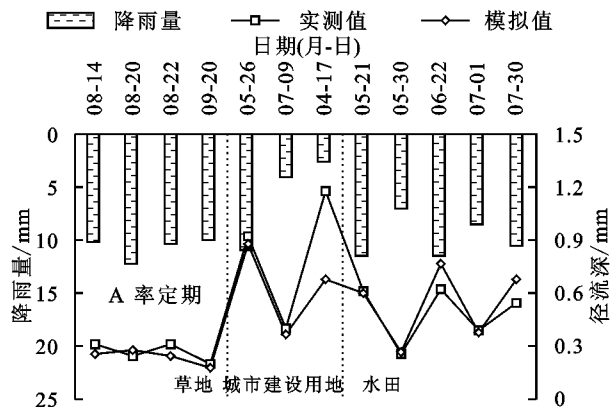
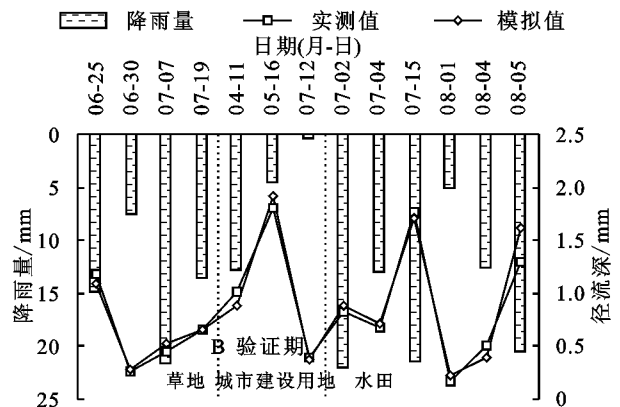


图 2 率定期和验证期的模拟值与实测值比较

## 2.2 降雨与地表径流的响应关系

**2.2.1 降雨量对地表径流量的影响** 通过修正后的 SCS 模型模拟 1986 年、1995 年、2000 年、2007 年、2014 年逐次降雨产生的地表径流量,统计分析不同时间尺度降雨与地表径流的响应关系。由图 3A 可以看出,地表径流深度与降雨量呈极显著线性关系 ( $R^2=0.7926, p=0.00$ ),当降雨量分别大于 1, 2, 4 mm 时,地表径流深度分别大于 0.01, 0.1, 1 mm, 地表径流深度增加幅度明显高于降雨量增加幅度。在年际变化方面(图 3B),根据近 50 a 昆明市年降雨数据,参考《水文情报预报规范》将 1986 年、1995 年、2000 年、2007 年、2014 年划分为丰水年、偏丰水年、偏枯水年、偏枯水年和平水年,其地表径流量分别为 3.55 亿  $m^3$ , 2.67 亿  $m^3$ , 1.48 亿  $m^3$ , 1.80 亿  $m^3$ , 2.52 亿  $m^3$ , 呈现出丰水年 > 偏丰水年 > 平水年 > 偏枯水年的趋势。在月际变化方面(图 3C),地表径流量最大值主要出现在降雨最多月份(6 月或 7 月),平均降雨量达到 250.1 mm, 占全年平均降雨总量的 25.68%, 平均地表径流量达到 0.829 7 亿  $m^3$ , 占全年平均地表径流量的 33.54%; 地表径流量最小值主要出现降雨较少月份(1 月或 12 月), 平均降雨量仅为 7.3 mm, 平均地表径流量也仅为 0.001 亿  $m^3$ 。地表径流量不仅受到降雨量的影响,同时也会受到降雨强度和降雨前土壤湿润程度的影响。如 1995 年、2000 年地表径流量最大值分别出现在 6 月和 5 月,均未出现在最大降雨量月份,其主要原因是该月份强降雨(>30 mm)场次明显高于其他月份,且降雨时间较为连续,降雨前期土壤湿度较高所致。

**2.2.2 降雨强度对地表径流量的影响** 由表 4 可知,在不同强度降雨场次方面,降雨等级不同,降雨次数差异较大。<10 mm 等级降雨场次最多,年平均达到 103 次,年平均降雨量为 270.7 mm,其次分别是 10~20 mm 和 20~30 mm,年平均降雨场次分别



为 20, 8 次,年平均降雨量分别为 268.7, 173.8 mm, >30 mm 降雨场次平均仅为 7 次左右,但其年平均降雨量达到 259.7 mm。

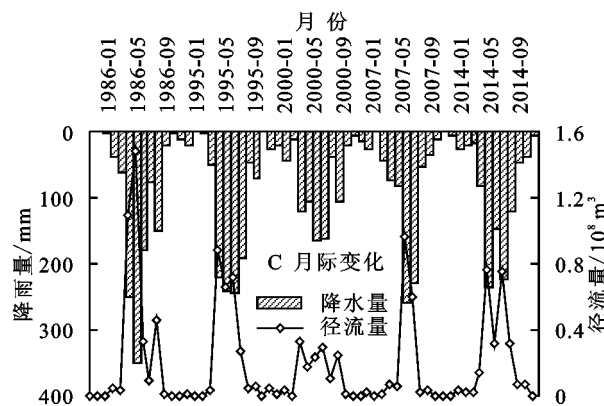
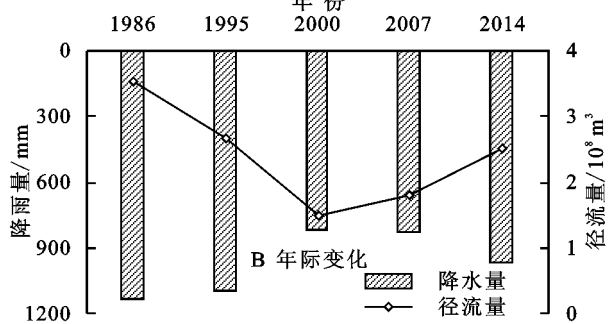
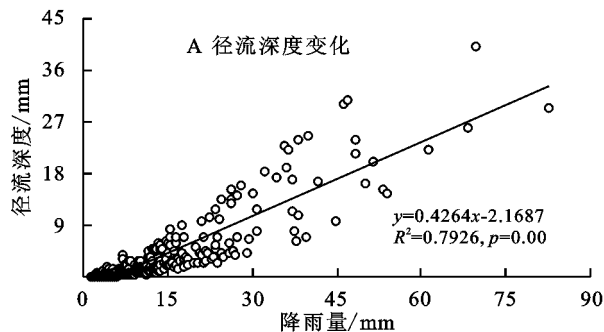


图 3 降雨对地表径流的影响

在不同降雨强度降雨量方面,丰水年内强降雨(>30 mm)降雨量占全年降雨总量比重最大,偏枯水年内弱降雨(<10 mm)降雨量比重最大。在不同强度降雨径流深度方面,降雨强度在不同等级之间变化

时,模拟的地表径流深度变化幅度差异较大。 $<10$  mm 年平均地表径流深度最小,仅为 22.97 mm,10~20 mm 与 20~30 mm 年平均地表径流深度相差不大,分别为 51.32,49.11 mm,而 $>30$  mm 较 $<10$  mm,10~20 mm 和 20~30 mm 地表径流深度分别增加 1.02~4.70,0~2.55,0.50~2.05 倍,年平均地表径流深度

达到 110.49 mm,占全年径流深度的 47.25%。在不同强度降雨径流系数方面,也呈现出降雨强度越大,径流系数越大,产流能力越强。 $<10$  mm 平均降雨径流系数最小,仅为 0.09,其次分别是 10~20 mm 和 20~30 mm,其平均降雨径流系数分别为 0.19,0.27, $>30$  mm 平均降雨径流系数达到 0.43。

表 4 不同降雨强度下地表径流深度情况

项目	降雨 等级/mm	年份				
		1986	1995	2000	2007	2014
不同强度降雨次数	$<10$	95	99	121	117	82
	10~20	15	22	20	19	22
	20~30	12	9	7	6	7
	$>30$	10	9	3	4	7
不同强度降雨量/mm	$<10$	292.1	232.2	304.7	289.7	231.1
	10~20	223.4	312.2	274.8	233.5	299.5
	20~30	269.8	196.1	143.2	122.9	136.8
	$>30$	345.5	369.8	98.9	182.6	301.8
不同强度降雨径流深度/mm	$<10$	32.21	22.38	22.38	15.91	21.96
	10~20	48.35	55.05	45.31	40.87	67.02
	20~30	93.12	53.01	31.41	37.05	30.96
	$>30$	171.64	129.10	45.45	81.33	125.12
不同强度降雨径流系数	$<10$	0.11	0.10	0.07	0.05	0.10
	10~20	0.22	0.18	0.16	0.18	0.22
	20~30	0.35	0.27	0.22	0.30	0.23
	$>30$	0.50	0.35	0.46	0.45	0.41

2.3 土壤湿润程度与地表径流的响应关系

土壤湿润程度直接影响着土壤当时最大可持水量(S),降雨前土壤含水量越大,最大可持水量则越小,雨水下渗量相对较少,则越容易产生地表径流。由图 4 可知,整体上呈现出土壤越湿润,雨水产流能力则越强。在单次降雨的产流能力方面,干旱条件下降雨次数最多,正常条件下降雨次数最少,湿润条件下降雨次数相对较多,其年平均次数分别为 58,12,

18 次,分别主要集中 5—10 月、7—8 月、6—7 月,单次降雨平均产流量分别为  $20.44\times10^5$ , $27.25\times10^5$ , $46.02\times10^5$  m<sup>3</sup>/次;在单位毫米降雨的产流能力方面,湿润条件 $>$ 正常条件 $>$ 干旱条件,其单位毫米降雨平均产流量分别为  $1.85\times10^5$ , $2.82\times10^5$ , $3.71\times10^5$  m<sup>3</sup>/mm。可见,湿润条件下降雨的产流能力最强,是干旱条件下产流能力的 2 倍以上,且也明显高于正常条件下的产流能力。

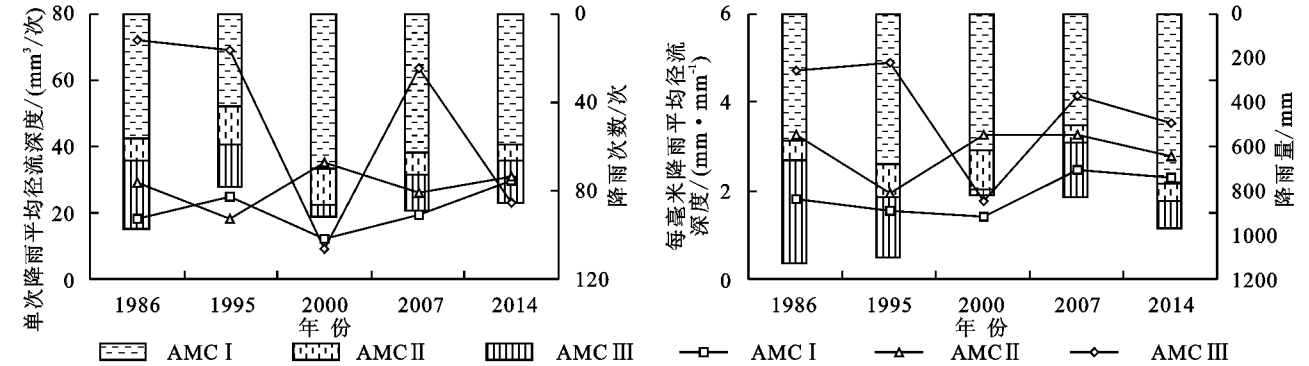


图 4 不同湿润程度下雨水产流能力

2.4 土地利用类型与地表径流的响应关系

随着昆明市城市率的不断提高,土地利用剧烈变化直接影响着 CN 值的确定,导致流域最大蓄水容量的变化。由图 5 可知,1986—2014 年期间昆明市区

渗透比例持续下降,其主要由于城市建设用地面积显著增加,年平均增长幅度为 7.44 km<sup>2</sup>/a,面积占比由 13.16%增加至 33.41%,主要由水田、草地、灌木林和旱地转化而来,而水田、草地、灌木林和疏林地减少

趋势最显著,年平均减少幅度分别为 8.57, 6.68, 5.20, 3.29 km<sup>2</sup>/a, 导致透水地表面积呈持续减小趋势。选取丰水年(1986 年)、偏丰水年(1995 年)、平水年(2014 年)和偏枯水年(2000 年、2007 年),分别计算相同降雨年型下的地表径流量,结果表明地表径流量随着渗透比例的减小整体呈现上升趋势,2014 年地表径流量较 1986 年分别增长了 0.420 8 亿 m<sup>3</sup>, 0.513 7 亿 m<sup>3</sup>, 0.431 8 亿 m<sup>3</sup>, 0.335 4 亿 m<sup>3</sup>, 0.308 4 亿 m<sup>3</sup>, 减小幅度呈现出丰水年>平水年>偏枯水年的趋势,其中 1995 年、2007 年地表径流量均有减少趋势,其原因主要均是水田面积大幅减小,导致流域产流能力下降。可见,随着渗透比例的不断减少,土地利用变化对地表径流的影响越来越显著,且丰水年土地利用变化对地表径流的影响明显大于平水年和偏枯水年。

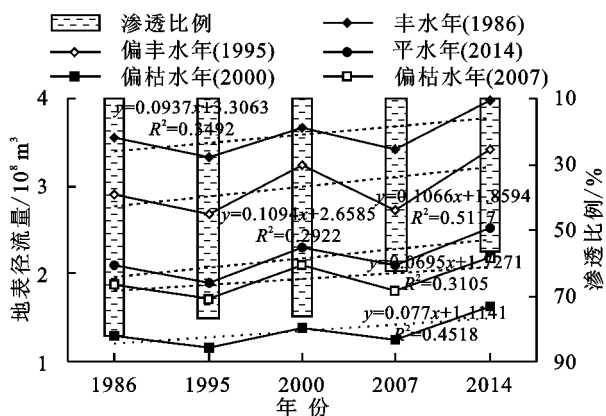


图 5 昆明市区不同阶段径流深度变化

### 3 结论与讨论

(1) 影响地表径流的主要因素是降雨,其中地表径流深度与降雨量呈极显著线性关系,且呈现出丰水年>偏丰水年>平水年>偏枯水年的趋势。而降雨量与降雨强度、降雨前土壤湿润程度具有较强的相关性,如在丰水年内强降雨(>30 mm)降雨量占全年降雨总量比重最大,在偏枯水年内弱降雨(<10 mm)降雨量占比则最大,而强降雨(>30 mm)下的地表平均径流量达到 1.135 8 亿 m<sup>3</sup>,占全年径流总量的 47.25%,直接影响全年地表径流总量的多少。地表径流最大值就出现在降雨最多月份(6 月或 7 月),月平均雨水产流次数达到 20 次,日平均径流量达到 0.034 1 亿 m<sup>3</sup>/d,平均 1~2 d 就有一次降雨径流发生,且降雨量较大,土壤湿润程度基本上呈湿润条件,此时单次降雨和单位毫米降雨产流能力最强,这也是 6 月或 7 月地表径流量最大的原因之一。

(2) 土地利用变化主要是影响流域渗透面积比例,在相同降雨年型下,地表径流量随着渗透比例的减小整体呈现上升趋势,且丰水年土地利用变化对地

表径流的影响明显大于平水年和偏枯水年。

与以往研究相比较,本研究通过修订 CN 值和率定  $\lambda$ ,能够较为准确地模拟研究区地表径流特征,能够为今后雨水利用提供一定的参考价值。但由于缺乏长序列的降雨—径流数据,未对每种土地利用类型的  $\lambda$  进行率定,此外降雨前期土壤湿润程度的划分还有待修正,尤其是在城市建设用地方面。因此,应在着重补充实测数据的同时,通过土壤水分吸收平衡原理不断修订和补充 CN 值,探讨各影响因子对地表产流的影响,从而更加科学地认识本地区降雨—径流关系。

#### 参考文献:

- [1] 王晓东,张洪江,程金花,等.三峡库区森林植被坡面产流特性[J].水土保持研究,2007,14(4):146-148.
- [2] 李建柱,冯平.降雨因素对大清河流域洪水径流变化影响分析[J].水利学报,2010,41(5):595-600.
- [3] 陈晓安,杨洁,汤崇军,等.雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J].农业工程学报,2017,33(9):141-146.
- [4] 陈晓燕,张娜,吴芳芳.降雨和土地利用对地表径流的影响:以北京北护城河周边区域为例[J].自然资源学报,2014,29(8):1391-1402.
- [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[J].生态学报,2001,21(7):1041-1050.
- [6] 郑璟,方伟华,史培军,等.快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究:以深圳市布吉河流域为例[J].自然资源学报,2009,24(9):1561-1572.
- [7] 马亚鑫,周维博,宋扬.西安市主城区土地利用变化及其对地表径流的影响[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):49-54,90.
- [8] Mishra S K, Singh V P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates[J]. Hydrological Processes, 2010,18(17): 3323-3345.
- [9] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the three Gorges area[J]. Catena, 2009,77(1):1-7.
- [10] Xiao B, Wang Q H, Fan J, et al. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity [J]. Pedosphere, 2011,21(6):738-749.
- [11] 陈正维,刘兴年,朱波.基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测[J].农业工程学报,2014,30(7):72-81.
- [12] 王瑾杰,丁建丽,张成,等.基于 SCS 模型的新疆博尔塔拉流域径流模拟[J].农业工程学报,2016,32(7):129-135.
- [13] 李子海,张秀敏.滇池流域分散园地土壤侵蚀研究[J].云南环境科学,2003,22(S1):109-110.

流域气温呈上升趋势,且 6 月份增幅最大,2 月份增幅最小;未来气温在最高温度、RCP8.5 情况下变化幅度最大,最高气温在 4—6 月、9 月、10 月温度增幅较为显著,到 21 世纪末升温约 4℃。降水总体呈增加趋势,5—10 月降水量均呈现下降趋势,1—4 月、11 月、12 月降水量呈现增加态势。

本文仅使用一种气候模式数据进行气候变化预估,具有不确定性。在以后的研究中,将增加更多的评价指标,采用不同的降尺度方法,运用多模式集合等方法综合分析未来气候变化,以减少模拟结果的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] Gray V. Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers[J]. Energy & Environment, 2007,18(3): 433-440.
- [2] Gleick P H, Adams R M, Amasino R M, et al. Climate change and the integrity of science[J]. Science, 2010, 328(5979):689-690.
- [3] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental panel on climate change(IPCC)[J]. Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics, 2005, 26(2):48-56.
- [4] 刘昌明,刘文彬,傅国斌,等. 气候影响评价中统计降尺度若干问题的探讨[J]. 水科学进展,2012,23(3):427-437.
- [5] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012,93(4):485-498.
- [6] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. Nature, 2010, 463(7282):747-756.
- [7] 吴佳,周波涛,徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3048-3060.
- [8] 刘敏,王冀,刘文军. SDSM 统计降尺度方法对江淮地区地面气温模拟能力评估及其未来情景预估[J]. 气象科学,2012,32(5):500-507.
- [9] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等. 气象资料的统计降尺度方法综述[J]. 地球科学进展,2011,26(8):837-847.
- [10] 郝振纯,时芳欣,王加虎. 统计降尺度法在黄河源区未来降水变化分析中的应用[J]. 水电能源科学,2011(3):1-4.
- [11] 魏凤英,黄嘉佑. 我国东部夏季降水量统计降尺度的可预测性研究[J]. 热带气象学报,2010,26(4):483-490.
- [12] 翟文亮,李朋俊,林凯荣,等. 基于 SDSM-SWAT 的气候变化下东江流域径流预测模拟[J]. 人民珠江,2016, 37(4):1-6.
- [13] 邱冰,姜加虎,孙占东,等. 基于统计降尺度模型的博斯腾湖流域未来气温和降水变化趋势分析[J]. 资源科学,2010,32(6):1133-1140.
- [14] 赵芳芳,徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应[J]. 资源科学,2009,31(5):722-730.
- [15] 郭家力,郭生练,郭靖,等. 鄱阳湖流域未来降水变化预测分析[J]. 长江科学院院报,2010,27(8):20-24.
- [16] 田鹏. 气候与土地利用变化对径流的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [17] 杨绚,李栋梁,汤绪. 基于 CMIP5 多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析[J]. 中国沙漠,2014,34(3):795-804.

(上接第 144 页)

- [14] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报,2015,35(6):1961-1972.
- [15] 赵磊,杨逢乐,王俊松,等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报,2008,28(8): 1561-1570.
- [16] 黄英,王杰,史正涛,等. 高原盆地城市水源地脆弱性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [17] 刘志勇. 昆明市城市住宅小区雨水水质特性及资源化研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
- [18] 曹言. 基于 SCS 模型的滇池流域雨水资源潜力估算研究[D]. 昆明:云南大学,2013.
- [19] 顾雯,李丽,石晓丹,等. 改进的 SCS 模型在黑龙江省中小流域径流模拟中的应用[J]. 水文,2017,37(3):70-74.
- [20] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理,2012,35(3):415-420.
- [21] 曹言,柴素盈,王杰,等. 昆明市土地利用变化对地表径流的影响[J]. 水电能源科学,2018,36(8):22-25.
- [22] 王红雷,王秀茹,王希. 利用 SCS-CN 模型方法估算流域可收集雨水资源量[J]. 农业工程学报,2012,28(12):86-91.
- [23] 吴志宜,余志强,朱雪坚. SCS 模型在不同土地利用类型地表产流计算中的应用:以余姚地区为例[J]. 浙江大学学报:理学版,2016,42(2):226-230.
- [24] 谢长坤,蔡永立,左俊杰. 基于 SCS 法模拟的上海郊区农田地表产流特征及原因[J]. 长江流域资源与环境, 2012,21(1):44-51.
- [25] 王红艳,张志强,查同刚,等. 径流曲线数(SCS-CN)模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进[J]. 北京林业大学学报,2016,38(8):71-79.