

土地利用及不透水地表对河流流量的影响

田迪^{1,2}, 李叙勇^{1,3*}, Donald E. Weller³, 白中科²

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国地质大学 土地科学技术学院, 北京 100083; 3. 美国史密森尼环境研究中心, 美国 马里兰 21037-0028)

摘要: 利用美国地质调查局的逐日连续流量数据计算了美国切斯比克湾地区 150 个小流域的 34 个河流流量指标,并在整个区域和划分的 3 个自然地理区对选择的 17 个指标与 4 种土地利用类型和不透水地表做了相关分析。结果表明,森林在降水较少的冬春两季增加流量,雨量较高的秋季减少流量,森林面积比例的增加可以削减洪峰、延长洪峰历时、稳定流量变化。农业用地比例的增加表现为稳定流量变化,延长洪峰历时,在高原地区还可以削减洪峰流量。草地比例的提高均表现为削减洪峰流量,稳定流量变化,延长洪峰历时。随着不透水地表面积增加,洪峰流量、雨季、汛期和年流量增加,流量变化加剧,洪峰历时减少,不同地理区对不透水地表的水文响应也有所不同。

关键词: 土地利用;不透水地表;流量指标;水文响应

中图分类号: P333.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)06-1012-09

土地利用变化的水文影响为多种形式和不同的时空尺度,最明显的是对流域径流量立即和直接的影响^[1]。不同的气候、地质条件、植被和流域面积具有不同的水文状况^[2-4]。针对“森林能否减少年流量、调节枯水径流以及能否削减洪峰”等生态水文效应问题,国内外出现了不同甚至相反的观点,其原因主要在于区域气候和地理的差异性、研究的尺度问题以及研究方法的局限性等^[5]。城市化会增加不透水地表的面积,引起下渗减少、洪峰流量增大^[6-7]。而由于蓄水和排水复杂机制的中和效应,常常使农业用地对洪水产生的影响相对较小^[8]。本文基于大量监测数据,利用皮尔逊相关分析^[9]对美国切斯比克湾区域的 150 个小流域的森林、草地、农业用地、建设用地和不透水地表在整个切斯比克流域和 3 个自然地理区的水文响应做逐一分析,为进一步揭示土地利用和不透水地表变化对流量的影响规律提供依据。

1 研究材料和方法

1.1 研究区域

切斯比克湾位于美国东北部,是美国最大的海湾,超过 100 000 条河流及其支流流入该海湾,它的流域总面积 166 534 km²,南北延伸约 580 km,东西宽约 290 km,包括 6 个州(纽

收稿日期: 2010-05-21; 修订日期: 2010-11-27。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41071323,40971271);美国国家大气与海洋管理局海岸与海湾环境技术合作研究所环境技术开发计划(NOAA-CICEET, #NA06NOS4190167);城市与区域国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-05)。

第一作者简介: 田迪(1983-),男,陕西涇阳人,硕士,中国自然资源学会会员(S300000964M),主要从事土地利用变化的水文影响方面的研究。E-mail: tianlandi@gmail.com

***通信作者简介:** 李叙勇,研究员,博士生导师,主要从事流域生态模型与管理方面的研究。E-mail: xyli@mail. rcees. ac. cn

约州、特拉华州、马里兰州、弗吉尼亚州、西弗吉尼亚州、宾西法尼亚州)的部分地区以及华盛顿特区的全部(图 1)。

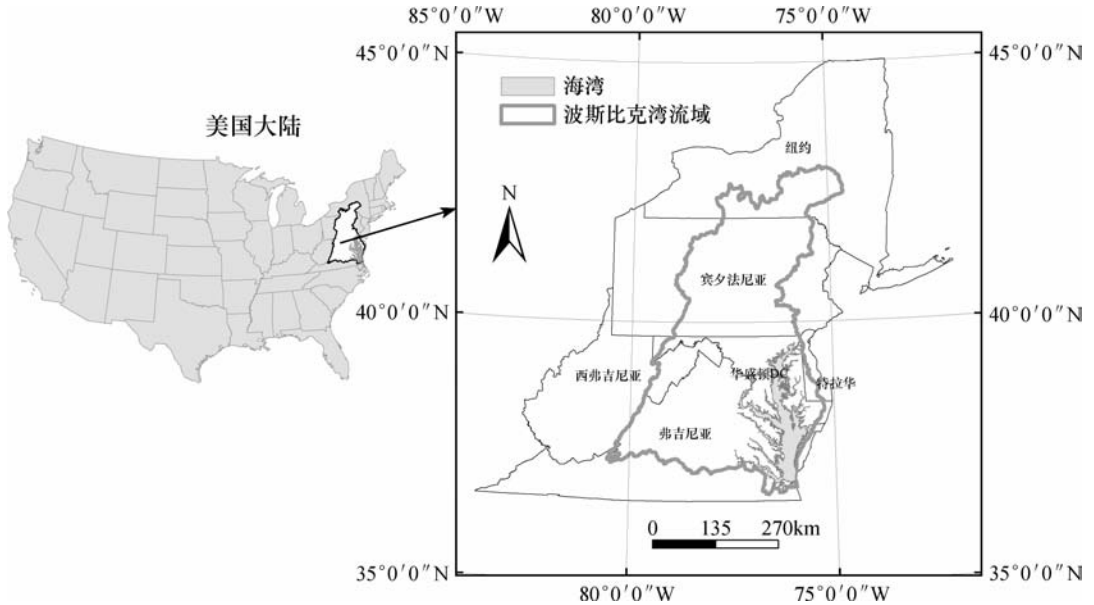


图 1 切斯比克湾流域位置示意图

Fig. 1 The location of Chesapeake Bay Watershed

1.2 数据的收集及处理

1.2.1 自然地理分区与流量数据

根据美国地质调查局的自然地理分区图,将切斯比克湾流域划分为三大自然地理区:沿海平原、皮德蒙特山区和阿巴拉契亚高原。这 3 个地理区的地形地貌有较大的差异。

小流域能够更好地反映土地利用及不透水地表与流量之间的关系,笔者在切斯比克湾流域仅选择面积小于 282 km²的小流域^[9]。根据流量数据的完整性及可得性,每一个小流域都要保证在 1984—2004 年间有连续 21 a 的观测流量数据,但是为了保证选择充足的样本,允许个别站点至少有连续 6 a 的观测流量数据。基于以上标准,根据从美国地质调查局获得的流域矢量图、水文站数据,最终选择了 150 个小流域,其中沿海平原 37 个,皮德蒙特山区 56 个,阿拉巴契亚高原 57 个,并下载了这 150 个小流域对应站点的逐日流量数据(表 1、图 2)。

表 1 切斯比克流域及其 3 个自然地理分区的地形及小流域选择

Table 1 The topography and subwatersheds selection of Chesapeake Bay Watershed and the three physiographic provinces

区域	小流域个数	小流域面积/km ²		平均坡度/%	平均海拔/m
		范围	平均值		
切斯比克湾流域	150	3.47 ~ 279.72	107.3	6.06	299.02
沿海平原	37	3.47 ~ 254.86	71.49	1.92	34.49
皮德蒙特山区	56	3.68 ~ 279.72	102.42	3.91	156.71
阿拉巴契亚高原	57	4.95 ~ 279.72	135.34	8.58	462.77

1.2.2 土地利用数据

根据美国地质调查局提供的切斯比克湾流域矢量图,叠加马里兰大学 Mid-Atlantic RESAC (Regional Earth Science Application Center)开发的 2000 年 30 m 分辨率的栅格土地

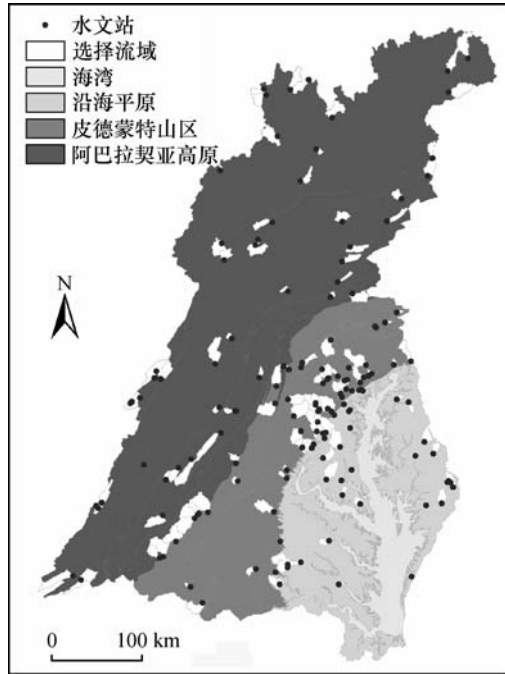


图2 切斯比克湾流域的自然地理分区及选择的小流域及其水文站

Fig. 2 The subwatersheds and hydrologic sites in Chesapeake Bay Watershed and its three physiographic provinces

利用图(土地利用类型分为森林、草地、农业用地、建设用地、湿地、水体、裸地七大类),用 ArcGIS 对上述 150 个小流域的土地利用状况进行了提取与统计。从表 2 的统计值可见,湿地、水体、裸地这 3 类土地仅占了很小一部分,对流量的影响有限,因此,选择了森林、草地、农业用地、建设用地这 4 类比例较高的土地利用方式进行进一步的分析。

表 2 土地利用类型统计(单位:%)

Table 2 The statistics of land use type (unit: %)

区域	土地利用类型						
	森林	建设用地	农业用地	草地	湿地	水体	裸地
切斯比克湾流域	50.33	19.49	10.00	17.15	1.97	0.36	0.69
沿海平原	36.95	32.54	15.09	7.60	6.23	0.22	1.38
皮德蒙特山区	42.53	22.46	10.42	22.75	0.64	0.38	0.81
阿拉巴契亚高原	67.41	8.00	5.99	17.54	0.48	0.44	0.13

1.2.3 不透水地表数据

不透水地表大多是由于人类活动造成的,它在建设用地中占有较大比例,包括人们修建道路、停车场、房屋等建筑物而在地表铺筑的水泥、砖块、柏油、石头,以及建筑物的楼顶和夯实的土壤。根据切斯比克湾流域矢量图,叠加马里兰大学 Mid-Atlantic RESAC 开发的 2000 年 30 m 分辨率的栅格不透水地表图(每一个栅格反映在 900 m² 的范围内不透水地表所占的百分比),用 ArcGIS 对 150 个小流域的不透水地表所占的比例进行了提取与统计,结果见表 3。

表 3 不透水地表统计(单位:%)

Table 3 The statistics of impervious surface (unit: %)

区域	不透水地表的比例
切斯比克湾流域	5.96
沿海平原	12.07
皮德蒙特山区	6.16
阿拉巴契亚高原	1.73

1.2.4 降水数据

从 CCMP(Chesapeake Community Modeling Program) 获得切斯比克湾流域 1984 年 1 月 1 日至 2004 年 12 月 31 日间 308 个气象站点逐小时的降水数据。通过 ArcGIS 对 150 个流域的水文站做 50 km 缓冲区分析,最终选择了落在缓冲区内的 186 个气象站点,然后汇总出这些站点分别在 3 个地理区及整个流域逐月降水数据,结果见表 4。

表 4 不同区域 12 个月的降水量统计(单位:mm)

Table 4 The statistics of the precipitation over 12 months for each region (unit: mm)

区域	1984—2004 年月均降水											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
切斯比克湾流域	79.32	68.78	96.00	82.49	102.87	89.15	104.57	93.23	106.30	72.28	89.06	74.81
沿海平原	90.04	76.60	107.84	79.39	96.38	84.21	111.27	105.59	105.29	75.43	81.12	78.68
皮德蒙特山区	82.07	71.19	99.93	80.79	106.22	86.35	106.01	88.67	108.54	73.64	92.96	77.44
阿拉巴契亚高原	73.18	64.11	88.80	84.69	104.26	92.68	100.87	89.74	105.72	70.22	90.86	71.83

1.3 流量指标计算及选择

IHA 全称 Indicators of Hydrologic Alteration, 它是用来计算河流流量统计值的一款软件,它不仅可以用来量化自然流量,还可以用来量化人类活动对流量的影响,比如修建水坝、土地利用变化、地下水抽取、灌溉等人类活动的影响,它需要输入长年逐日流量数据,用来生成一系列具有生态学意义的水文统计量,这些水文统计量称为流量指标(也称水文指标)^[10]。流量指标可以反映水情,可以帮助人们理解和预测描述流量变化对生态系统的影响。目前流量指标超过了 170 个,其中以 IHA 的 33 个指数最具代表性^[11-12],本文用 IHA 计算出了 150 个流域的 33 个流量指标,还另外计算出了年均流量。

根据研究目标,本文选择了流量最大的 2、3、4 月和降水量最大的 5、7、9 月的月均流量、能反映流量峰值的年 1、3、7、30 日的最大流量的均值、能反映流量年变化程度的高脉冲个数与历时,还选择了能反映基流贡献率的基流指数,以及能反映流量变化率和变化频率的上升率、下降率、流量年变化转折点的个数。最终在 IHA 的 33 个指数中选择了 16 个指数,再加上年平均流量,共 17 个指数,详见表 5。

1.4 统计分析

利用皮尔逊相关分析,在整个切斯比克湾流域和 3 个不同的自然地理区,逐个分析这 17 项流量指标随着 4 种土地利用类型比例、不透水地表比例变化而变化的趋势。

表5 流量指标按区域统计

Table 5 The statistics of the precipitation over 12 months for each region

流量指标	单位	描述	区域			
			切斯比克湾流域	沿海平原	皮德蒙特山区	阿拉巴契亚高原
<i>MAF</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	年均单位面积流量	0.010 8	0.012 9	0.011 3	0.008 9
<i>FEB</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	2月月均单位面积流量	0.014 2	0.018 1	0.013 7	0.012 2
<i>MAR</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	3月月均单位面积流量	0.017 9	0.022 8	0.014 4	0.018 2
<i>APR</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	4月月均单位面积流量	0.015 6	0.015 8	0.014 9	0.016 2
<i>MAY</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	5月月均单位面积流量	0.012 4	0.013 0	0.013 1	0.011 3
<i>JUL</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	7月月均单位面积流量	0.008 4	0.008 4	0.012 6	0.004 2
<i>SEP</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	9月月均单位面积流量	0.006 7	0.010 1	0.008 3	0.002 9
<i>MX1D</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	年1日最大单位面积流量的均值	0.226	0.256	0.227	0.206
<i>MX3D</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	年3日最大单位面积流量的均值	0.128	0.133	0.120	0.133
<i>MX7D</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	年7日最大单位面积流量的均值	0.077	0.074	0.072	0.085
<i>MX30D</i> *	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$	年30日最大单位面积流量的均值	0.040	0.036	0.040	0.043
<i>BFI</i>	-	基流指数:年7日最小单位面积流量的均值/年均单位面积流量	0.135	0.119	0.155	0.126
<i>NHIPL</i>	-	年均高脉冲个数,高脉冲事件定义为每年逐日流量的75%分位以上的流量	17.10	21.80	19.24	11.96
<i>DHIPL</i>	d	年均高脉冲持续天数	3.06	2.55	2.27	4.16
<i>RISER</i>	$\text{m}^3/\text{s}/\text{d}$	流量上升率:年逐日流量连续上升值的均值,后一天的流量减前一天的流量,为正值	0.001 87	0.002 26	0.001 87	0.001 62
<i>FALLR</i>	$\text{m}^3/\text{s}/\text{d}$	流量下降率:年逐日流量连续下降值的均值,后一天的流量减前一天的流量,为负值	-0.000 931	-0.000 922	-0.000 876	-0.000 991
<i>REVS</i>	-	年均流量变化转折点的年均个数	112.79	118.74	118.42	103.39

注:* 为了降低流域面积对流量的影响,变量除以了流域面积。

2 研究结果

2.1 流域不同土地利用类型的水文响应

表6总结了整个切斯比克湾流域和3个自然地理区的17个流量指标和农业用地、建设用地、草地、森林之间的相关关系,这些相关关系揭示了不同土地利用类型的水文响应。

2.1.1 整个切斯比克湾流域

在整个切斯比克湾流域,草地与年均流量,2、3、4、5月月均流量,年1、3、7、30日最大流量的均值,高脉冲个数,流量上升率呈现显著的负相关,即随着草地面积的增加,上述流量指标会随之减小;而草地面积的比例与基流指数与流量下降率呈现显著的正相关,说明增加草地面积的比例会使基流指数和流量下降率(负值)上升。

农业用地与基流指数、流量下降率有显著的正相关,与流量上升率有显著的负相关,而与年流量、雨季和汛期月流量、流量的峰值没有显著的相关关系;林地与年1日最大流量、基流指数、年均高脉冲个数、流量上升率、流量变化转折点的年均个数呈现显著的负相关,与流量下降

率呈显著的正相关;不难发现林地对基流指数的响应与农业用地和草地相反,笔者认为这是由于森林的林冠截流和枯枝落叶层阻止了地表水进入地下,从而导致了基流对流量贡献率的下降。

总之,在整个切斯比克湾流域,农业用地的增加可以稳定流量变化,草地和林地的增加对削减洪峰流量、稳定流量变化具有积极的作用。建设用地的水文响应与其它 3 类用地几乎相反,它与 9 月雨季的月均流量、年 1 日最大流量呈现较强的正相关关系,与年均高脉冲个数、流量下降率、流量变化转折点的年均个数呈高度的正相关,其中与年均高脉冲个数的相关系数数值甚至高达 0.85;然而它与高脉冲历时、流量下降率呈较强的负相关。这说明建设用地的增加会增大流量的峰值、加剧流量的变化。

2.1.2 三个自然地理区

土地利用在 3 个自然地理区的水文响应表现了一定的差异。草地与 17 个流量指标在 3 个不同自然地理区具有完全一致的相关关系,这种相关关系与在整个切斯比克流域也完全一致。

农业用地在沿海平原与年 2 月的月均流量却呈现显著的正相关,这与年 5、7 月月均流量的相关性相反。对于这个问题笔者认为,2 月处于冬季,不属于灌溉季节,农作物的生长还处在青苗时期,农作物的蒸散发、蓄水能力有限,而 5、7 月抽水灌溉和农作物的蒸(散)发能力提高导致了农业用地在这两个不同季节的水文响应不同。

比较有趣的是,林地在阿拉巴契亚高原、沿海平原、皮德蒙特山区的水文响应差异巨大,它在阿拉巴契亚高原对年 2、3、4、5 月的月均流量,年 1、3、7、30 日最大流量的均值,高脉冲历时呈显著的正相关性,而对年 9 月月均流量、基流指数却有着有显著的负相关性;在皮德蒙特山区与高脉冲历时呈显著的正相关,与高脉冲个数和流量变化转折点的年均个数有显著的负相关关系;在沿海平原与年均流量,年 7、9 月月均流量,年 1、3、7、30 日最大流量的均值,高脉冲个数,流量上升率,流量年均升降次数呈显著的负相关。林地在皮德蒙特山区和沿海平原的表现说明了林地的增加减少了雨季的流量,削减了洪峰,缓和了流量的变化。但是林地在阿拉巴契亚高原为什么会有几乎相反的表现呢?阿拉巴契亚高原的森林属于落叶林,而且海拔较高,坡度较陡,树木在 2、3、4、5 月还没有发芽或正在发芽,而且降水量较少,枯枝落叶层和土壤中储存的水会通过侧向流入河道,增加流量,而且年 1、3、7、30 日的最大流量也基本出现在这几个月,因此上述几个流量指标会随着林地面积的增加而增加,而在 9 月由于雨量较大,其相关关系呈现了相反的态势,而且与高脉冲历时、基流指数的负相关恰恰说明森林的林冠截流、蓄水和稳定流量变化的功能。

建设用地在 3 个地理区的水文响应较为一致,表现为与年均流量,年 5、7、9 月的月均流量,年 1 日最大流量呈显著的正相关,与高脉冲个数、流量上升率、流量变化转折点的年均个数呈高度的正相关(相关系数均在 0.6 以上,有的甚至达到了 0.8 以上),与流量下降率呈显著的负相关,这些结果再一次说明了建设用地的增加会增大流量的峰值,加剧流量的变化,并阻止地表水进入地下。值得一提的是建设用地在阿拉巴契亚高原与年 7、30 日的最大流量均值呈显著的负相关,与基流指数呈显著的正相关,是不是可以说建设用地在阿拉巴契亚高原的增加可以削减洪峰、增加地表水进入地下的比例呢?笔者认为是这样的:因为阿拉巴契亚高原小流域的建设用地比例平均只有 8%,与其它两个地区城市化的水平有较大的差别,在这种城市化水平下会有不同的水文响应,但是对于这个问题还有待于进一步研究。

2.2 流域不透水地表的水文响应

表 7 总结了整个切斯比克湾流域和 3 个自然地理区的 17 个流量指标和不透水地表之间的相关关系,这些相关关系揭示了不透水地表的水文响应。

表 6 土地利用与流量指标在这个切斯比克流域和 3 个自然地理区的相关系数

Table 6 The correlation coefficients between land use and flow metrics for Chesapeake Bay Watershed and each physiographic province

区域	土地利用	流量指标												高脉冲个数和历时			流量变化的速率与频率		
		年均和月均流量						年极值流量						NHIFL	DHIPL	RISER	FALLR	REVS	
		MAF	FEB	MAR	APR	MAY	JUL	SEP	MX1D	MX3D	MX7D	MX30D	BFI						
切斯比克湾 流域	草地	-0.17*	-0.23**	-0.29**	-0.19*	-0.17*	-0.12	-0.15	-0.21**	-0.25**	-0.22**	-0.17*	0.17*	-0.30**	-0.14	-0.35**	0.25**	-0.12	
	农业用地	-0.05	0.02	-0.03	-0.06	-0.09	-0.06	-0.04	-0.05	-0.1	-0.12	-0.11	0.21**	-0.19*	-0.07	-0.24**	0.16*	-0.04	
	建设用地	0.16	0.12	0.09	0.03	0.13	0.15	0.22**	0.39**	0.13	0.05	0.07	0.1	0.85**	-0.49**	0.61**	-0.19*	0.64**	
阿拉巴契亚 高原	森林	-0.03	-0.02	0.07	0.09	0.02	-0.05	-0.1	-0.19*	0.07	0.14	0.09	-0.27**	-0.46**	0.53**	-0.21**	-0.07	-0.45**	
	草地	-0.40**	-0.41**	-0.50**	-0.45**	-0.49**	-0.11	-0.05	-0.21	-0.38**	-0.45**	-0.53**	0.13	-0.23	-0.26	-0.33**	0.23	0.07	
	农业用地	-0.09	-0.19	-0.19	-0.11	-0.27*	0.12	0.24	-0.39**	-0.42**	-0.38**	-0.39**	0.27*	-0.12	-0.15	-0.04	0.02	0.15	
皮德蒙特 山区	建设用地	0.04	-0.06	-0.18	-0.17	-0.01	0.35**	0.48**	-0.08	-0.25	-0.26*	-0.32*	0.50**	0.39**	-0.50**	0.11	0.04	0.34**	
	森林	0.24	0.35**	0.45**	0.38**	0.38**	-0.14	-0.29*	0.31*	0.51**	0.54**	-0.42**	0	0.43**	0.17	-0.17	-0.26		
	草地	-0.17	-0.16	-0.12	-0.14	-0.16	-0.18	-0.18	-0.14	-0.18	-0.17	-0.18	0.17	-0.37**	-0.19	-0.31*	0.26	-0.30*	
沿海平原	农业用地	-0.12	-0.11	-0.09	-0.1	-0.13	-0.13	-0.13	-0.11	-0.19	-0.18	-0.17	0.36**	-0.13	-0.32*	-0.18	0.18	0.02	
	建设用地	0.15	0.13	0.11	0.12	0.14	0.17	0.16	0.41**	0.23	0.17	0.17	-0.08	0.83**	-0.19	0.62**	-0.27*	0.62**	
	森林	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	-0.23	-0.01	0.03	0.03	-0.18	-0.42**	0.41**	-0.26	0	-0.35**	
沿海平原	草地	-0.54**	-0.17	-0.34*	-0.21	-0.37*	-0.58**	-0.49**	-0.41**	-0.34*	-0.33*	-0.37*	-0.02	-0.57**	0.19	-0.71**	0.57**	-0.36*	
	农业用地	-0.19	0.32*	-0.02	0.09	-0.33*	-0.33*	-0.25	0	0.17	0.18	0.08	0.16	-0.59**	0.53**	-0.56**	0.45**	-0.43**	
	建设用地	0.55**	-0.12	0.16	-0.08	0.52**	0.75**	0.69**	0.50**	0.26	0.21	0.25	0.08	0.88**	-0.61**	0.85**	-0.68**	0.74**	
森林	-0.40**	-0.19	-0.16	0.04	-0.16	-0.47**	-0.51**	-0.54**	-0.46**	-0.42**	-0.38*	-0.23	-0.36*	0.07	-0.38*	0.23	-0.39*		

注: **表示显著性水平 $P < 0.01$, *表示显著性水平 $P < 0.05$ 。下同。

表 7 不透水地表与流量指标在整个切斯比克流域和 3 个自然地理区的相关系数

Table 7 The correlation coefficients between land use and flow metrics for Chesapeake Bay Watershed and each physiographic province

区域	土地利用	流量指标												高脉冲个数和历时			流量变化的速率与频率		
		年均和月均流量						年极值流量						NHIFL	DHIPL	RISER	FALLR	REVS	
		MAF	FEB	MAR	APR	MAY	JUL	SEP	MX1D	MX3D	MX7D	MX30D	BFI						
切斯比克湾 流域	草地	0.1	0.07	0.06	-0.02	0.07	0.09	0.16*	0.40**	0.13	0.04	0.03	0.05	0.83**	-0.42**	0.58**	-0.16	0.61**	
	农业用地	0	-0.11	-0.2	-0.2	-0.05	0.26	0.44**	0.01	-0.15	-0.18	-0.27*	0.46**	0.43**	-0.45**	0.07	0.06	0.33**	
	建设用地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
阿拉巴契亚 高原	森林	0.58**	-0.06	0.17	-0.04	0.52**	0.78**	0.74**	0.53**	0.31	0.27	0.3	0.09	0.85**	-0.56**	0.82**	-0.69**	0.73**	
	草地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
	农业用地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
皮德蒙特 山区	建设用地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
	森林	0.58**	-0.06	0.17	-0.04	0.52**	0.78**	0.74**	0.53**	0.31	0.27	0.3	0.09	0.85**	-0.56**	0.82**	-0.69**	0.73**	
	草地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
沿海平原	建设用地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	
	森林	0.58**	-0.06	0.17	-0.04	0.52**	0.78**	0.74**	0.53**	0.31	0.27	0.3	0.09	0.85**	-0.56**	0.82**	-0.69**	0.73**	
	草地	0.04	0.02	0	0.01	0.03	0.06	0.06	0.36**	0.15	0.09	0.07	-0.13	0.84**	-0.19	0.53**	-0.16	0.61**	

注: **表示显著性水平 $P < 0.01$, *表示显著性水平 $P < 0.05$ 。下同。

经过对比不难发现,不透水地表的水文响应与建设用地的水文响应基本一致。在整个切斯比克湾流域,随着不透水地表比例的增加,年9月月均流量、年1日最大流量、高脉冲个数、流量上升率、流量变化转折点的年均个数会随之增大,高脉冲历时和流量下降率会随之减小,这说明流域不透水地表比例的增加会增大流量峰值,加剧流量变化。不透水地表分别在3个自然地理区与在整个切斯比克湾流域具有相似的水文响应,它的增加会导致高流量的月份和雨季月份的流量增加,增加流量的峰值、高脉冲个数、流量上升率以及流量变化转折点的年均个数,减少高脉冲历时和流量下降率,这就再一次说明了流域不透水地表比例的增加会增大流量峰值,加剧流量变化。

3 结论与讨论

综合以上研究可以得到以下结论:①森林在不同季节具有不同的水文响应,表现为冬春两季增加河流流量,雨季减少流量,但总体上讲森林面积比例的增加可以削减洪峰,延长洪峰历时,稳定流量变化;②农业用地对在不同季节、不同自然地理区具有不同的水文响应,总体上表现为稳定流量变化,延长洪峰历时,在高原地区还可以削减洪峰流量;③草地的水文响应在时间和空间上较为一致,表现为削减洪峰流量,稳定流量变化,延长洪峰历时;④城市化的发展增加不透水地表面积,使得入渗减少,洪峰流量、雨季、汛期和年流量增加,流量变化加剧,洪峰历时减少,但不同地区城市化发展的程度不同,表现出的水文效应也有所不同。

本研究仅从空间上考虑了不同土地利用类型和不透水地表与流量指标的相关关系,对于土地利用类型和不透水地表随着时间序列变化的水文响应有待于进一步补充,希望进一步引入分布式流域水文模型,从时间和空间上模拟流量,通过设置情境模式来分析不同因素对流量的影响。

参考文献 (References):

- [1] David R Maidment. 水文学手册[M]. 张建云, 李纪生, 等译. 北京: 科学出版社, 2002. [David R Maidment. Handbook of Hydrology. Translated by ZHANG Jian-yun, LI Ji-sheng, et al. Beijing: Science Press, 2002.]
- [2] Poff N L, Ward J V. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure, a regional analysis of streamflow patterns [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46: 1805-1818.
- [3] Poff N L, Bain J D, Karr M B, et al. The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restoration [J]. *Bio-science*, 1997, 47: 769-784.
- [4] Bosch D D, Sullivan D G, Sheridan J M. Hydrologic impacts of land use changes in coastal plain watersheds [J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(2): 423-432.
- [5] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 474-480. [CHEN Jun-feng, LI Xiu-bin. The impact of forest change on watershed hydrology—Discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 474-480.]
- [6] UNESCO. Hydrological effects of urbanization [R]. Studies and Reports in Hydrology 18, Paris, France, 1974.
- [7] Konrad C P, Booth D B, Burges S J. Effects of urban development in the Puget Lowland, Washington, on interannual streamflow patterns; Consequences for channel form and streambed disturbance [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41, W07009, doi: 10.1029/2005WR004097.
- [8] Bouraoui F, Vachaud G, Chen T. Prediction of the effect of climatic changes and land use management on water resources [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(4): 379-384.
- [9] Poff N L, Brian P Bledsoe, Christopher O C. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems [J]. *Geomorphology*, 2006, 79: 264-285
- [10] Brian D Richter, Jeffrey V Baumgartner, Jennifer Powell, et al. A method for assessing hydrologic alteration within eco-

- systems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [11] Julian D Olden, Poff N L. Redundancy and the choice of Hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. *River Research and Applications*, 2003, 19: 101-121.
- [12] Stephen C Sanborn, Brian P Bledose. Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washington, and Oregon [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325: 241-261.

Impacts of Land Use and Impervious Surface on Stream Flow Metrics in Chesapeake Bay Watershed

TIAN Di^{1,2}, LI Xu-yong^{1,3}, Donald E. WELLER³, BAI Zhong-ke²

(1. State Key Laboratory of Urban & Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China;

2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Smithsonian Environmental Research Center, Maryland 21037-0028, USA)

Abstract: Using daily discharge data from the US Geological Survey, we calculated 34 stream flow metrics for 150 watersheds (area < 282 km²) within the Chesapeake Bay basin, and selected 17 of the metrics. We quantified the proportions of forest, agriculture, grassland, developed land, and impervious surface in each watershed. For each of the three physiographic provinces, we correlated the flow metrics with the land cover proportions to elucidate how different land cover types affect the flow regime. Higher proportions of forest increased stream flow in relatively dry winters or springs and reduced stream flow in comparatively rainy autumns. Higher forest proportions also reduced flooding, prolonged pulses of higher flow, and reduced flow variability. Higher proportions of agriculture reduced flow variability and prolonged pulses of higher flow in all physiographic provinces and reduced flooding in the highland physiographic provinces. Higher grassland proportions reduced flooding and flow variability and prolonged high flow pulses in all provinces. Higher proportions of developed land and impervious surface reduced infiltration, increased flooding and flow during high rainfall periods, intensified flow variability, and shortened high flow pulses; there are different hydrologic effects in different urbanized areas.

Key words: land use; impervious surface; flow metrics; hydrologic response