

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第1期 Vol.32 No.1 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 1 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

局域种群的 Allee 效应和集合种群的同步性	刘志广, 赵 雪, 张丰盘, 等 (1)
叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响	陶 冶, 张元明 (7)
长江口锋面附近咸淡水混合对浮游植物生长影响的现场培养	王 奎, 陈建芳, 李宏亮, 等 (17)
河流流量对流域下垫面特性的响应	田 迪, 李叙勇, Donald E. Weller (27)
中国中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态分区	柯新利, 刘 曼, 邓祥征 (38)
基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略	聂泽宇, 梁新强, 邢 波, 等 (48)
滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨	盛 虎, 郭怀成, 刘 慧, 等 (56)
采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响	杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等 (64)
松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应	刘 利, 王 赫, 林长存, 等 (74)
天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应	周德成, 罗格平, 韩其飞, 等 (81)
草原化荒漠草本植物对人工施加磷素的响应	苏洁琼, 李新荣, 冯 丽, 等 (93)
自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异	张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (101)
晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应	周 伶, 上官铁梁, 郭东罡, 等 (111)
华南地区 6 种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化	薛 立, 张 柔, 奚如春, 等 (123)
河西走廊不同红砂天然群体种子活性相关性	苏世平, 李 毅, 种培芳 (135)
江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算	吴 丹, 邵全琴, 李 佳, 等 (142)
酸雨和采食模拟胁迫下克隆整合对空心莲子草生长的影响	郭 伟, 李钧敏, 胡正华 (151)
棉铃虫在 4 个辣椒品种上的寄主适合度	贾月丽, 程晓东, 蔡永萍, 等 (159)
烟草叶面积指数的高光谱估算模型	张正杨, 马新明, 贾方方, 等 (168)
不同作物田烟粉虱发生的时空动态	崔洪莹, 戈 峰 (176)
长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响	袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等 (183)
新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用	郭 甜, 何丙辉, 蒋先军, 等 (190)
一株产漆酶土壤真菌 F-5 的分离及土壤修复潜力	茆 婷, 潘 澄, 徐婷婷, 等 (198)
木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局	刘 璐, 宋同清, 彭晚霞, 等 (207)
岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系	徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等 (215)
黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征	程积民, 程 杰, 杨晓梅, 等 (226)
棉铃发育期棉花源库活性对棉铃对位叶氮浓度的响应	高相彬, 王友华, 陈兵林, 等 (238)
耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响	李 辉, 张军科, 江长胜, 等 (247)
外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响	闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 等 (256)
强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应	李文阳, 闫素辉, 王振林 (265)
专论与综述	
蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制	赵 琪, 戴绍军 (274)
流域生态风险评估研究进展	许 妍, 高俊峰, 赵家虎, 等 (284)
土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展	汪 青 (293)
研究简报	
青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析	梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等 (311)
菊属与蒿属植物苗期抗蚜虫性鉴定	孙 娅, 管志勇, 陈素梅, 等 (319)
滨海泥质盐碱地衬膜造林技术	景 峰, 朱金兆, 张学培, 等 (326)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 332 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-01



封面图说: 白鹭展翅为梳妆, 玉树临风巧打扮——这是大白鹭繁殖期时的美丽体态。大白鹭体羽全白, 身长 94—104cm, 寿命 20 多年。是白鹭中体型最大的。繁殖期的大白鹭常常在湿地附近的大树上筑巢, 翩翩飞舞吸引异性, 其繁殖期背部披有蓑羽, 脸颊皮肤从黄色变成兰绿色, 嘴由黄色变成绿黑色。大白鹭是一个全世界都有它踪迹的广布种, 一般单独或成小群, 在湿地觅食, 以小鱼、虾、软体动物、甲壳动物、水生昆虫为主, 也食蛙、蝌蚪等。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011121624

田迪, 李叙勇, Donald E. Weller. 河流流量对流域下垫面特性的响应. 生态学报, 2012, 32(1): 0027-0037.

Tian D, Li X Y, Donald E. WELLER. The responses of hydrological indicators to watershed characteristics. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 0027-0037.

河流流量对流域下垫面特性的响应

田 迪^{1,2}, 李叙勇^{1,3,*}, Donald E. Weller³

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

2. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 3. 美国 Smithsonian 环境研究中心, 美国马里兰州 21037)

摘要:以美国切斯比克湾地区为例, 对该区域 150 个小流域的下垫面特性(包括土地利用类型、地面不透水系数和土壤物理属性)进行了提取, 根据 1984—2004 年间逐日流量观测数据计算出了 33 个水文指标, 运用逐步回归方法在不同地理区分析了 9 种下垫面特性对其中 17 个重要水文指标的影响。结果表明:随着草地和林地比例的增加, 流量趋于减小、流量变化趋于稳定, 随着建设用地和不透水层的增加, 流量增加、流量变化剧烈, 随着土壤水文组等级的升高, 流量减少;在整个切斯比克湾流域, 对流域下垫面特性响应最为显著的水文指标是高脉冲个数及历时, 在阿巴拉契亚高地地区响应最为显著的水文指标是年极值流量、高脉冲个数及历时, 在皮德蒙特山地响应最为显著的水文指标是高脉冲个数及历时, 在沿海平原地区响应最为显著的水文指标是高脉冲个数及历时、流量变化的速率与频率。

关键词:流域下垫面特性; 土地利用; 地表不透水系数; 土壤物理属性; 水文指标

The responses of hydrological indicators to watershed characteristics

TIAN Di^{1,2}, LI Xuyong^{1,3,*}, Donald E. Weller³

1 State Key Laboratory of Urban & Regional Ecology, Research Center of Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 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: Watershed characteristics affect the stream flow of the watershed. Those effects vary in different temporal and spatial scales. The long-term stream flow can be statistically described by magnitude, frequency, and duration; those hydrological indicators are important metrics that can be used to reflect the effects on flow by watershed characteristics. However, the responses of hydrological indicators to watershed characteristics are still a controversial topic throughout the world. Our goal is to address the following questions based on data analyses of a large number of hydrological monitoring sites and their corresponding watersheds: (1) what and how watershed characteristics affect stream flow? (2) Which hydrological indicators have significant responses to watershed characteristics and what are the differences of their responses among different physiographic provinces? We randomly selected 150 small watersheds ($<282\text{km}^2$) in three physiographic provinces in Chesapeake Bay region (37 in Coastal Plain area, 56 in Piedmont area, and 57 in Highland area). Using long-term daily stream flow data from the U. S. Geological Survey (USGS), we calculated 34 hydrological indicators for all watersheds. Seventeen hydrological indicators were selected using principle component analysis for further analyses. For all watersheds, we used ArcGIS to develop proportions of agriculture, developed land, grassland, and forest from the Mid-Atlantic RESAC 2000 land use map. We derived the values of impervious surface coefficients for all watersheds from the Mid-Atlantic RESAC impervious surface map. The proportions of sand, rock depth, hydrologic group and permeability rate

基金项目:国家自然科学基金项目(41071323, 40971271); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-05); 中国科学院国际合作团队项目(KZCX2-YW-T13)

收稿日期: 2010-11-12; 修订日期: 2011-01-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@mail.reces.ac.cn

were collected from the STATSGO soil database of the United States. We then used stepwise regression to quantify the effects of watershed land use, impervious surface, and soil physical properties on the selected 17 hydrological indicators in three physiographic provinces of the Chesapeake Bay drainage area. Hydrological data during 2005—2009 was used to validate our predictive regression model. We found that the most important factors affected stream flow were the proportions of grassland, developed land, forest, and impervious surface and soil hydrologic group. Land use types had more strongly influence on stream flow than soil physical properties. Flow volume and flow variability decreased where proportion of grassland or forest increased, but increased where proportion of developed land or impervious surface increased. Flow was lower at higher category of soil hydrologic group. Among the 17 hydrological indicators, we found that the number and duration of the flow pulses with high frequency were the best indicators that were correlated to the watershed characteristics at the whole Chesapeake watershed scale; the peak flow, and the number and duration of high flow pulses were the best indicators that were correlated to the watershed characteristics in the Highland area; the number and duration of high flow pulses were the best indicators that were correlated to the watershed characteristics in the Piedmont area; the number and duration of high flow pulses, and the rate and frequency of flow variability were the best indicators that were correlated to the watershed characteristics in the Coastal plain area. Watershed characteristics can be used to predict number of high flow pulses in the whole Chesapeake Bay watershed, Piedmont and Coastal Plain regions.

Key Words: watershed characteristics; land use; impervious surface; soil physical properties; hydrological indicator

流域下垫面特性(如土地利用方式,土壤属性等)影响着流域的水文情势^[1-3],这种影响表现为多种形式和不同的时空尺度,最明显的是对河流流量直接和间接的影响^[4]。例如,通常情况下林地会减少河流流量^[5];城市化会增加不透水层的比例,引起下渗减少、洪峰流量增加^[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];土壤的下渗能力越高,就会有越多的降水进入地下水^[3]。如果对流量按不同时间尺度、频率、幅度和历时来考虑,流域特性对这些不同的水文指标可能产生不同的影响,而水文指标对流域特性的响应也随着流域的空间尺度不同、流域的地理特征的不同而不同,这些问题国际上尚缺乏清晰的认识。随着流域水文管理精细化的进一步要求及流域监测数据的不断积累和完善,流域特性对各种水文指标的影响成为一个重要的科学问题。

近几年来,国际上不少学者从不同角度研究了人类活动对河流流量的影响,如,Matteau 等^[9]从多元分析的角度研究了水坝对不同水文指标的影响。Poff 等^[10]研究了美国连续地区土地利用和水坝对 10 个水文指标的影响,Schoonover 等^[11]研究了小尺度范围内不同土地覆盖对 33 个水文指标的影响。但是综合考虑多种流域下垫面特性,研究不同水文指标在不同自然地理区的水文影响却显不足。本文选择美国切斯比克湾流域作为研究区,在大量监测数据的基础上,运用 IHA 计算出能够反映流量总量、频率、历时和变化率的各种水文指标,用逐步回归方法分析流域下垫面特性对各类水文指标的影响,以求回答以下几个问题:(1)流域的哪些下垫面特性对河流流量的影响最为显著,会如何影响流量?(2)在不同自然地理区,对流域下垫面特性有着显著响应的水文指标有哪些?响应程度如何?通过对以上问题的回答,更好地揭示了具体水文指标对流域下垫面的响应关系。

1 数据处理与研究方法

1.1 研究区概况

切斯比克湾位于美国东北部,是美国最大的、生物多样性最为丰富的海湾,超过 10 万条河流及其支流流入该海湾,3600 余种植物、鱼类和动物栖息于此^[12],它总的流域面积 16.6 万 km²,包括 6 个州(纽约州,特拉华州,马里兰州,弗吉尼亚州,西弗吉尼亚州,宾夕法尼亚州)的部分地区以及华盛顿特区的全部(图 1)。居住人口大约 157 万人,其中大部分生活在主要城市及其周边地区,如:巴尔的摩,华盛顿特区,里士满等,如果保持现在的城市发展速度,预测在未来 30a,流域的城市面积将增加 60%^[13]。森林、草地和农用地向城市用地

的转化将会给陆地和水生态系统、空气质量、水量和水质造成威胁^[14]。

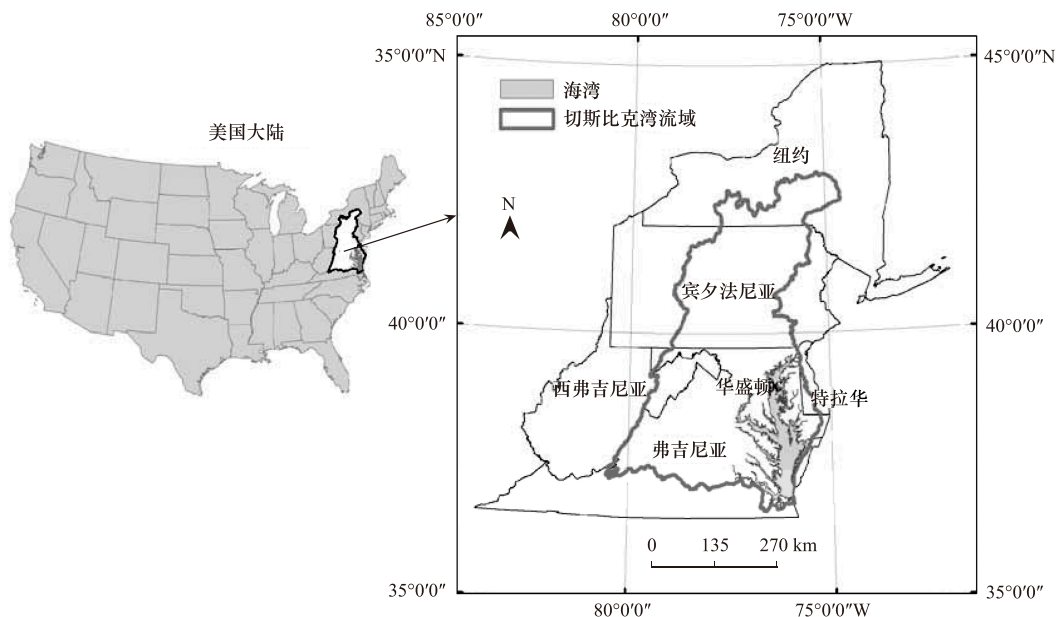


图 1 切斯比克湾流域位置示意图

Fig. 1 Location of the Chesapeake Bay watershed

1.2 自然地理区划分及小流域选择

根据切斯比克湾流域 (Chesapeake Bay watershed/CBay) 地形地貌的差异,使用美国地质调查局 (USGS) 的自然地理分区数据,将流域划分为三大自然地理区:沿海平原 (Coastal Plain/CP),皮德蒙特山地 (Piedmont/PD) 和阿巴拉契亚高地 (Highland/HL)。因为支流能够更直接的反映下垫面特性与流量之间关系^[14-17],因此仅选择面积小于 282km^2 的小流域^[10]。为了避免气候波动的偶然性所带来的影响,每一个小流域都尽量保证在 1984—2004 年间有连续 21a 的观测流量数据,但是允许个别站点至少有连续 6a 的流量观测数据以保证样本数量的充足。基于以上标准,根据从美国地质调查局的流域矢量图和水文数据,最终选择了 150 个小流域,这 150 个小流域较为均匀的分布在整个流域,其中沿海平原 37 个,皮德蒙特山地 56 个,阿巴拉契亚高地 57 个,并收集了这 150 个水文站点的逐日流量数据 (图 2)。

1.3 下垫面特性数据

本文选择土地利用类型、不透水层和土壤物理属性作为流域下垫面特性的代表,汇总结果见表 1。

(1) 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

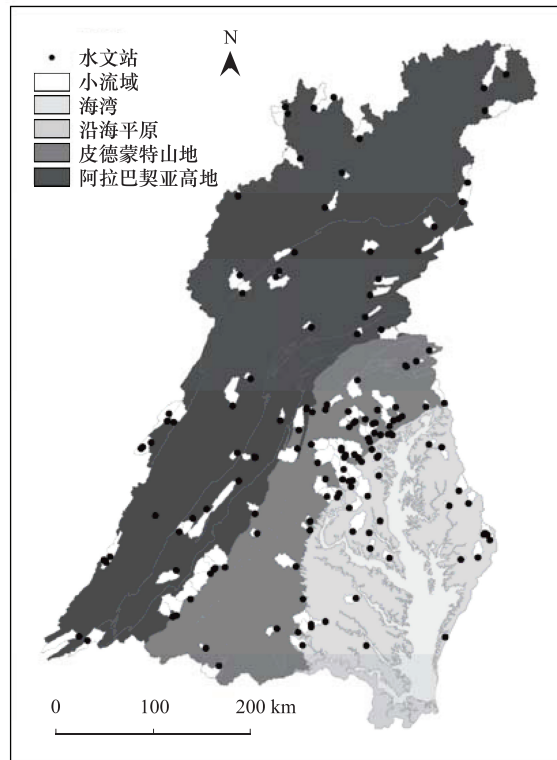


图 2 切斯比克湾流域的自然地理分区及选择的小流域及其水文站

Fig. 2 Physiographic provinces and selected watersheds and hydrologic sites in the Chesapeake Bay watershed

的 2000 年 30m 分辨率的栅格土地利用图(土地利用类型分为森林、草地、农用地、建设用地、湿地、水体、裸地 7 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 1 的统计值可以知道,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,本文仅选择森林、草地、农用地、建设用地这四类比例较高的土地利用方式进行进一步的分析。

(2)不透水层数据 不透水层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(Regional Earth Science Application Center)开发的 2000 年 30 m 分辨率的栅格不透水层图,用 ArcGIS 对 150 个小流域的不透水层所占的比例进行了提取与统计。

(3)土壤属性数据 根据美国地质调查局提供的切斯比克湾流域矢量图,叠加美国农业部开发的 STATSGO(State Soil Geographic)土壤图,用 ArcGIS 对上述 150 个小流域的土壤属性进行了提取与统计,本文选择了与流量密切相关的砂土百分比、基岩深度、水文组、渗透率进行进一步分析。

表 1 流域下垫面特性汇总表

Table 1 Summary of watershed characteristics

区域 Region	土地利用类型 Land use /%						
	林地 Forest	建设用地 Developed	农用地 Agriculture	草地 Grassland	湿地 Wetland	水体 Water	裸地 Barren
CBay	50.33	19.49	10.00	17.15	1.97	0.36	0.69
CP	36.95	32.54	15.09	7.60	6.23	0.22	1.38
PD	42.53	22.46	10.42	22.75	0.64	0.38	0.81
HL	67.41	8.00	5.99	17.54	0.48	0.44	0.13

区域 Region	不透水层比例/% Impervious surface coefficient	土壤属性 Soil property			
		砂土/% Sand	基岩深度/m Rock depth	土壤水文组* Hydrologic Group	渗透率/(mm/h) Permeability rate
CBay	5.96	31.39	1.34	2.39	75.40
CP	12.07	48.01	1.48	2.38	109.37
PD	6.16	27.28	1.41	2.23	47.06
HL	1.73	24.39	1.17	2.55	80.29

* 水文组等级为 1 到 4 表示土壤的下渗能力逐渐降低;CBay: 切斯比克湾流域 Chesapeake Bay watershed;CP: 沿海平原 Coastal Plain;PD: 皮德蒙特山地 Piedmont;HL: 阿巴拉契亚高地 Highland

1.4 水文指标的计算及选择

1.4.1 IHA 与水文指标的计算

IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) 是用来计算河流多年流量统计值的软件,它计算出的水文指标 (Hydrologic Indicators) 可以量化自然流量和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水文指标^[18]。水文指标可以反映水文情势,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。水文指标有很多,其中以 IHA 的 33 个特征值最具代表性^[19-20],用 IHA 计算出了 150 个流域的 33 个水文指标,还另外计算出了年均流量,所有计算出的河流流量都除以了河流所在流域的面积,标准化为流量模数。

1.4.2 水文指标的选择

本文选择了流量高的 2、3、4 月份和降水量最大的 5、7、9 月份的月均流量,能反映流量峰值的年 1 日、3 日、7 日和 30 日最大流量的均值,能反映流量年变化程度的高脉冲个数与历时,还选择了能反映地下水对总流量贡献率的基流指标,以及能反映流量变化速率和变化频率的上涨率、落水率、水流变化次数。最终从 IHA 的 33 个指标中选择了 16 个指标,再加上年平均流量,共 17 个指标,详见表 2。

表 2 水文指标按区域汇总表

Table 2 Summary of hydrologic indicators in different region

水文指标 Hydrologic indicators	在不同区域的平均值 Mean values in different regions			
	CBay	CP	PD	HL
年均流量模数 Mean annual flow (MAF [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0108	0.0129	0.0113	0.0089
2 月份月均流量模数 Mean flow for February (Feb [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0142	0.0181	0.0137	0.0122
3 月份月均流量模数 Mean flow for March (Mar [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0179	0.0228	0.0144	0.0182
4 月份月均流量模数 Mean flow for April (Apr [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0156	0.0158	0.0149	0.0162
5 月份月均流量模数 Mean flow for May (May [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0124	0.0130	0.0131	0.0113
7 月份月均流量模数 Mean flow for July (Jul [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0084	0.0084	0.0126	0.0042
9 月份月均流量模数 Mean flow for September (Sep [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.0067	0.0101	0.0083	0.0029
年 1 日最大流量模数的均值 Annual maxima, 1-day mean (Mx1d [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.226	0.256	0.227	0.206
年 3 日最大流量模数的均值 Annual maxima, 3-day mean (Mx3d [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.128	0.133	0.120	0.133
年 7 日最大流量模数的均值 Annual maxima, 7-day mean (Mx7d [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.077	0.074	0.072	0.085
年 30 日最大流量模数的均值 Annual maxima, 30-day mean (Mx30d [*])/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	0.040	0.036	0.040	0.043
BFI 基流指标:年 7 日最小流量的均值/年均流量 Baseflow index: 7-day minimum flow/mean flow for year	0.135	0.119	0.155	0.126
NHiPI 年均高脉冲个数, 高脉冲定义为每年逐日流量的 75% 分位以上的 流量 Number of high pulses within each water year	17.10	21.80	19.24	11.96
DHiPI 年均高脉冲的历时 Mean duration of high pulses/d	3.06	2.55	2.27	4.16
RiseR [*] 年均上涨率: 年逐日流量模数连续上升值的均值 Rise rate: Mean of all positive differences between consecutive daily values /(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻² ·d ⁻¹)	0.00187	0.00226	0.00187	0.00162
FallR [*] 年均落率: 年逐日流量模数连续下降值的均值 Fall rate: Mean of all negative differences between consecutive daily values /(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻² ·d ⁻¹)	-0.000931	-0.000922	-0.000876	-0.000991
Revs 年均水流变化次数 Number of hydrologic reversals	112.79	118.74	118.42	103.39

* 表示流量除以了流域面积

1.5 流域下垫面特性对水文指标的影响分析

运用逐步回归法是一种选择显著性影响因素、拟合最优方程和消除多重共线性的方法。运用这种方法可以从 9 种流域下垫面特性中找出对流量有着显著影响的因素,可以得到这些显著性因素如何影响流量,还可以得到这些因素对水文指标的拟合效果。

具体做法是将变量一个一个引入,当每引入一个自变量后,对已选入的变量要进行逐个检验,当引入的自变量由于后面变量的引入而变得不再显著时,要将其剔除。引入一个变量或从回归方程中剔除一个变量为逐步回归的一步,每一步都要进行 *F* 检验,以确保每次引入新的变量之前回归方程中只包含显著的变量,这个过程反复进行,直到既无显著的自变量选入回归方程,也无不显著自变量从回归方程中剔除为止^[21]。本文使用 SPSS 软件进行逐步回归。引入自变量的显著性水平 $\alpha_{\text{进}}=0.05, \alpha_{\text{出}}=0.10$ 。

2 结果与分析

2.1 逐步回归分析结果

表 3—表 6 总结了不同区域的逐步回归分析的结果。回归系数为正数表示该下垫面特性对相应的水文指标是正向影响,负数表示是负向影响,没有回归系数表示该下垫面特性对相应的水文指标影响不显著,相关系数 (*R*) 和决定系数 (*R*²) 表示下垫面特性的拟合效果。表 7 汇总了逐步回归对不同水文指标组在不同区域的拟合效果。需要注意的是,在皮德蒙特山地,草地、农用地、建设用地、林地、不透水层、砂土含量、基岩深度、水文组等级、渗透率等 9 个下垫面特性对年均和 2、3、4、5、7、9 月份的流量均无显著的影响,这些因素均被剔除,因此不能建立回归方程。

表 3 切斯比克湾流域下垫面特性对水文指标的逐步回归拟合
Table 3 Stepwise regression of watershed characteristics to hydrologic indicators for the Chesapeake Bay watershed

水文指标 Hydrologic indicator	各个变量的回归系数 Coefficient of variables										R ²	P	N
	草地(x ₁) Grassland	农用地(x ₂) Agriculture	建设用地 (x ₃) Developed	林地(x ₄) Forest	不透水层 (x ₅) Impervious surface	砂土含量 (x ₆) Sand	基岩深度 (x ₇) Rock depth	水文组 (x ₈) Hydrologic group	渗透率 (x ₉) Permeability rate	常数(c) Constant			
MAF	-0.00020	—	—	—	—	—	—	—	—	0.014	0.17	<0.05	150
Feb	-0.00020	—	—	—	—	—	—	—	—	0.018	0.23	<0.01	150
Mar	-0.00025	—	—	—	—	—	—	—	—	0.022	0.29	<0.001	150
Apr	-0.00016	—	—	—	—	—	—	—	—	0.018	0.19	<0.05	150
May	-0.00019	—	—	—	—	—	—	—	—	0.016	0.17	<0.05	150
Jul	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sep	—	—	0.00074	—	—	—	—	—	—	0.00020	0.28	<0.01	150
Mx1d	—	—	—	—	0.0046	—	—	—	—	0.20	0.40	<0.001	150
Mx3d	-0.0019	—	—	—	—	—	—	—	—	0.15	0.25	<0.01	150
Mx7d	-0.00070	—	—	—	—	—	-0.00099	—	—	0.090	0.22	<0.01	150
Mx30d	-0.00048	—	—	—	—	—	—	—	—	0.048	0.17	<0.05	150
BFI	—	0.0019	—	—	—	-0.0023	—	-0.15	—	0.54	0.49	<0.001	150
NHiPI	—	—	0.18	—	0.30	0.096	—	—	-0.046	12.32	0.87	<0.001	150
DHiPI	—	—	-0.028	—	—	—	-0.063	—	—	7.36	0.67	<0.001	150
RiseR	—	—	0.000042	—	—	—	—	—	—	0.00052	0.64	<0.001	150
FallR	0.000016	—	—	—	—	—	—	—	0.0000033	-0.0015	0.31	<0.001	150
Revs	—	—	0.48	—	—	—	—	—	-0.098	132.45	0.68	<0.001	150

“—”表示该变量被剔除

表 4 阿巴拉契亚高地地区流域下垫面特性对水文指标的逐步回归拟合
Table 4 Stepwise regression of watershed characteristics to hydrologic indicators for the Highland area

水文指标 Hydrologic indicator	各个变量的系数 Coefficient of variables										R ²	P	N
	草地 (x ₁) Grassland	农用地 (x ₂) Agriculture	建设用地 (x ₃) Developed	林地 (x ₄) Forest	不透水层 (x ₅) Impervious surface	砂土含量 (x ₆) Sand	基岩深度 (x ₇) Rock depth	水文组 (x ₈) Hydrologic group	渗透率 (x ₉) Permeability rate	常数 (c) Constant			
MAF	-0.00011	—	—	—	—	—	—	—	—	0.011	0.40	<0.01	57
Feb	-0.00017	—	—	—	—	—	—	-0.0063	—	0.031	0.51	<0.001	57
Mar	-0.00026	—	—	—	—	—	—	—	—	0.023	0.50	<0.001	57
Apr	-0.00021	—	—	—	—	—	—	—	—	0.020	0.45	<0.001	57
May	-0.00017	—	—	—	—	—	—	-0.0045	—	0.026	0.55	<0.001	57
Jul	0.000092	—	—	—	—	—	—	-0.0040	—	0.014	0.48	<0.001	57
Sep	—	—	0.000085	—	—	—	—	-0.0023	—	0.0082	0.57	<0.001	57
Mx1d	—	—	—	—	—	—	-0.0046	—	—	0.42	0.40	<0.01	57
Mx3d	—	—	—	0.0011	—	—	—	—	—	0.057	0.51	<0.001	57
Mx7d	—	—	—	0.00070	—	—	—	—	—	0.037	0.54	<0.001	57
Mx30d	—	—	—	0.00040	—	—	—	—	—	0.019	0.61	<0.001	57
BFI	—	—	—	—	—	—	—	-0.16	—	0.48	0.61	<0.001	57
NHiPI	—	—	—	—	0.68	—	—	—	—	6.82	0.52	<0.001	57
DHiPI	—	—	-0.055	—	—	0.065	—	—	—	2.98	0.56	<0.001	57
RiseR	-0.000026	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0021	0.33	<0.05	57
FallR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Revs	—	—	0.56	—	—	—	—	—	—	99.26	0.34	<0.01	57

“—” 表示该变量被剔除

Table 5 Stepwise regression of watershed characteristics to hydrologic indicators for the Piedmont area

表 6 沿海平原地区流域下垫面特性对水文指标的逐步回归拟合

Table 6 Stepwise regression of watershed characteristics to hydrologic indicators for the Coastal Plain area

水文指标 Hydrologic indicator	各个变量的系数 Coefficient of variables											R ²	P	N
	草地(x ₁) Grassland	农用地 (x ₂) Agriculture	建设用地 (x ₃) Developed	林地(x ₄) Forest	不透水层 (x ₅) Impervious surface	砂土含量 (x ₆) Sand	基岩深度 (x ₇) Rock depth	水文组 (x ₈) Hydrologic group	渗透率 (x ₉) Permeability rate	常数(c) Constant				
MAF	—	—	—	—	0.00013	—	—	—	—	0.011	0.58	0.34	<0.001	37
Feb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mar	-0.00034	—	—	—	—	—	—	—	—	0.025	0.34	0.11	<0.05	37
Apr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
May	—	—	0.000062	—	—	—	—	—	—	0.011	0.52	0.27	<0.001	37
Jul	—	—	—	—	0.00024	—	—	—	—	0.006	0.78	0.61	<0.001	37
Sep	—	—	—	—	0.00032	—	—	—	—	0.006	0.74	0.54	<0.001	37
Mx1d	-0.0064	—	—	-0.0030	—	—	—	—	-0.000096	0.52	0.71	0.50	<0.001	37
Mx3d	—	—	—	-0.0012	—	—	—	—	—	0.18	0.46	0.21	<0.005	37
Mx7d	—	—	—	-0.00057	—	—	—	—	—	0.09	0.42	0.18	<0.01	37
Mx30d	—	—	—	-0.00020	—	—	—	—	—	0.04	0.38	0.15	<0.05	37
BFI	—	—	—	—	—	—	—	-0.13	—	0.44	0.50	0.25	<0.01	37
NHPI	—	—	0.28	—	—	—	—	—	-0.077	21.09	0.93	0.86	<0.001	37
DHIPI	—	—	—	—	—	0.037	0.26	—	—	-14.26	0.77	0.59	<0.001	37
RiseR	-0.000093	—	0.000028	—	—	—	—	0.00095	—	0.00	0.90	0.81	<0.001	37
FallR	0.000021	—	—	—	-0.00001	—	—	—	0.0000028	0.00	0.78	0.61	<0.001	37
Revs	—	—	0.37	—	—	-0.583	—	—	—	134.82	0.81	0.66	<0.001	37

“—”表示该变量被剔除

表 7 逐步回归拟合效果汇总表
Table 7 Summary of stepwise regression results

区域 Region	水文指标组 Group of hydrologic indicators	R	R^2	P
CBay	年均和月均水文指标	0.22	0.05	0.02
	年极值水文指标	0.31	0.11	0.01
	高脉冲频率及历时	0.77	0.60	0.00
	流量变化的速率与频率	0.54	0.32	0.00
HL	年均和月均水文指标	0.50	0.25	0.00
	年极值水文指标	0.53	0.29	0.00
	高脉冲频率及历时	0.54	0.29	0.00
	流量变化的速率与频率	0.34	0.11	0.01
PD	年均和月均水文指标	—	—	—
	年极值水文指标	0.48	0.23	0.00
	高脉冲频率及历时	0.69	0.51	0.00
	流量变化的速率与频率	0.50	0.28	0.02
CP	年均和月均水文指标	0.59	0.37	0.01
	年极值水文指标	0.49	0.26	0.01
	高脉冲频率及历时	0.85	0.72	0.00
	流量变化的速率与频率	0.83	0.69	0.00

水文指标组 R 、 R^2 和 P 值取各项水文指标的平均值

2.2 结果验证

在不同自然地理区对拟合最佳的逐步回归方程分别进行了预测效果验证。

在整个区域,流域下垫面特性对高脉冲个数的逐步回归拟合效果最好,相关系数和决定系数分别达到了 0.87 和 0.75,回归方程如下: $y=0.18x_3+0.30x_5+0.096x_6-0.046x_9+12.32$ 。在该区域另外随机选取了 2005—2006 年的 8 个观测站点的数据进行了预测验证,相关系数和决定系数分别达到了 0.98 和 0.95,预测结果见表 8。

表 8 切斯比克湾流域的高脉冲个数预测结果
Table 8 Predicting result for NHIPL in the Chesapeake Bay region

站点编号 Station number	实际值 Observed value	预测值 Predicted value	站点编号 Station number	实际值 Observed value	预测值 Predicted value
1585090	33	38.21	1589500	24.5	25.19
1651000	29	29.65	1652500	36	39.04
1583580	20.5	14.98	1593500	26	27.49
1650500	25.5	24.24	2032640	14.5	12.56

在阿巴拉契亚高地地区没有得到拟合效果很好的回归方程,因此不进行回归方程预测检验。

在皮德蒙特山地,流域下垫面特性对高脉冲个数的逐步回归拟合效果最好,相关系数和决定系数分别达到了 0.87 和 0.75,回归方程如下: $y=0.67x_5+0.27x_6+0.29x_7-8.19$ 。在该区域另外随机选取了 2005—2006 年 5 个观测站点的数据进行了预测验证,相关系数和决定系数分别达到了 0.98 和 0.96,预测结果见表 9。

在沿海平原,流域下垫面特性对高脉冲个数的逐步回归拟合效果最好,相关系数和决定系数分别达为 0.93 和 0.86,回归方程如下: $y=0.28x_3-0.077x_9+21.09$ 。在该区域另外随机选取了 2005—2006 年 5 个观测站点的数据进行了预测验证,相关系数和决定系数分别为 0.96 和 0.92,预测结果见表 10。

表 9 皮德蒙特山地的高脉冲个数预测结果

Table 9 Prediction results for NHIPL in the Piedmont area

站点编号 Station number	实际值 Observed value	预测值 Predicted value
1583580	20.50	17.42
1586610	17.50	16.31
1593500	26.00	25.55
1650500	25.50	23.63
2032640	14.50	13.44

表 10 沿海平原的高脉冲个数预测结果

Table 10 Prediction result for NHIPL in the Coastal Plain area

站点编号 Station number	实际值 Observed value	预测值 Predicted value
1487000	9.50	9.72
1585090	33.00	39.04
1589500	24.50	20.15
1651000	29.00	33.25
1652500	36.00	37.70

3 结论

本文在大量数据的基础上,运用逐步回归分析的方法,揭示了具体水文指标对流域下垫面的响应关系:

(1)在整个切斯比克湾流域,对各项水文指标影响最为显著的因素是草地和建设用地。在3个自然地理区情况略有不同,在阿巴拉契亚高地地区,对流量影响最为显著的因素是草地、建设用地、林地和土壤水文组等级;在皮德蒙特山地对流量影响最为显著的因素是建设用地;在沿海平原对流量影响最为显著的因素是草地、林地、建设用地和不透水层。

(2)17个水文指标对流域下垫面特征的响应在整个切斯比克湾流域和划分的3个自然地理区显示出较大的差异。在整个流域,对下垫面特性响应最为显著的水文指标是高脉冲频率及历时,在阿巴拉契亚高地地区是年极值流量、高脉冲频率及历时,在皮德蒙特山地是年均高脉冲频率及历时,在沿海平原地区是高脉冲频率及历时、流量变化的速率与频率。

(3)利用拟合出的回归方程可以在整个切斯比克湾流域、皮德蒙特山地和沿海平原很好的预测出高脉冲个数。

References:

- [1] Poff N L, Ward J V. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46(10): 1805-1818.
- [2] Poff N L, Allan J D, Bain M B, Karr J R, Pretegaard K L, Richter B D, Sparks R E, Stromberg J C. The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, 1997, 47(11): 769-784.
- [3] Bosch D D, Sullivan D G, Sheridan J M. Hydrologic impacts of land-use changes in coastal plain watersheds. *Transactions of ASABE*, 2006, 49(2): 423-432.
- [4] Maidment D R. *Handbook of Hydrology* // Zhang J Y, Li J S, et al, Trans. Beijing: Science Press, 2002
- [5] Calder I R. Land use impacts on water resources. Background Paper No. 1. // *Land-water Linkages in Rural Watersheds*. Electronic Workshop, FAO: Rome, 18 September-27 October, 2000.
- [6] UNESCO. Hydrological effects of urbanization // *Studies and Reports in Hydrology* 18. Paris, France; The UNESCO Press Paris, 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. *Water Resources Research*, 2005, 41: W07009.
- [8] Bouraoui F, Vachaud G, Chen T. Prediction of the effect of climatic changes and land use management on water resources. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(4): 379-384.
- [9] Matteau M, Assani A A, Mesfioui M. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1/4): 120-128.
- [10] Poff N L, Bledsoe B P, Cuhaciyan C O. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 264-285.
- [11] Schoonover J E, Lockaby B G, Helms B S. Impacts of Land Cover on Stream Hydrology in the West Georgia Piedmont, USA. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(6): 2123-2131.
- [12] Chesapeake Executive Council. Chesapeake 2000 (18 June 2003) [2010-10-1]. http://www.chesapeakebay.net/content/publications/cbp_12081.pdf.

- [13] Boesch D F, Greer J. 'Chesapeake Futures: Choices for the 21st Centur. Edgewater, MD, USA: Chesapeake Research Consortium, Inc., A, 2003.
- [14] Claggett P R, Jantz C A, Goetz S J, Bisland C. Assessing development pressure in the Chesapeake Bay watershed: an evaluation of two land-use change models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 94(1/3): 129-146.
- [15] Knox J C. Human impacts on Wisconsin stream channels. *Annals of the Association of American Geographers*, 1977, 67(3): 323-342.
- [16] Gomi T, Sidle R C, Richardson J S. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *Bioscience*, 2002 52(10): 905-916.
- [17] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [18] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, Braun D P. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [19] Olden J D, Poff N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121.
- [20] Sanborn S C, Bledose B P. Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washington, and Oregon. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1/4): 241-261.
- [21] Xiao Q H, Liu W Q. *Applied Regression Analysis*. Beijing: China Renmin University Press, 2007.

参考文献:

- [4] David R. Maidment 主编. 水文学手册//张建云,李纪生,等译. 北京:科学出版社,2002.
- [21] 何晓群,刘文卿编著. 应用回归分析(第二版). 北京:中国人民大学出版社,2007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.1 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Allee effects of local populations and the synchrony of metapopulation	LIU Zhiguang, ZHAO Xue, ZHANG Fengpan, et al (1)
Effects of leaf hair points on dew deposition and rainfall evaporation rates in moss crusts dominated by <i>Syntrichia caninervis</i> , Gurbantunggut Desert, northwestern China	TAO Ye, ZHANG Yuanming (7)
The influence of freshwater-saline water mixing on phytoplankton growth in Changjiang Estuary	WANG Kui, CHEN Jianfang, LI Hongliang, et al (17)
The responses of hydrological indicators to watershed characteristics	TIAN Di, LI Xuyong, Donald E. Weller (27)
Lake nutrient ecosystems in the east-central moist subtropical plain of China	KE Xinli, LIU Man, DENG Xiangzheng (38)
The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis	NIE Zeyu, LIANG Xinqiang, XING Bo, et al (48)
Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi	SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al (56)
Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, et al (64)
Responses of elm (<i>Ulmus pumila</i>) woodland to different disturbances in northeastern China	LIU Li, WANG He, LIN Changcun, et al (74)
Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China	ZHOU Decheng, LUO Geping, HAN Qifei, et al (81)
Response of herbaceous vegetation to phosphorus fertilizer in steppe desert	SU Jieqiong, LI Xinrong, FENG Li, et al (93)
Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities	ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (101)
Response of species diversity in <i>Caragana Korshinskii</i> communities to climate factors and grazing disturbance in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Inner Mongolia	ZHOU Ling, SHANGGUAN Tieliang, GUO Donggang, et al (111)
Seasonal change of leaf morphological traits of six broadleaf seedlings in South China	XUE Li, ZHANG Rou, XI Ruchun, GUO Shuhong, et al (123)
Correlation analysis on <i>Reaumuria soongorica</i> seed traits of different natural populations in Gansu Corridor	SU Shiping, LI Yi, CHONG Peifang (135)
Carbon fixation estimation for the main plantation forest species in the red soil hilly region of southern-central Jiangxi Province, China	WU Dan, SHAO Quanqin, LI Jia, et al (142)
Effects of clonal integration on growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i> under simulated acid rain and herbivory	GUO Wei, LI Junmin, HU Zhenghua (151)
Difference of the fitness of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) fed with different pepper varieties	JIA Yueli, CHENG Xiaodong, CAI Yongping, et al (159)
Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index	ZHANG Zhengyang, MA Xinming, JIA Fangfang, et al (168)
Temporal and spatial distribution of <i>Bemisia tabaci</i> on different host plants	CUI Hongying, GE Feng (176)
Abundance and composition of CO ₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils	YUAN Hongzhao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al (183)
Effect of <i>Leucaena leucocephala</i> on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area	GUO Tian, HE Binghui, JIANG Xianjun, et al (190)
Isolation and the remediation potential of a Laccase-producing Soil Fungus F-5	MAO Ting, PAN Cheng, XU Tingting, et al (198)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area	LIU Lu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (207)
Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River	XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, et al (215)
Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China	CHENG Jimin, CHENG Jie, YANG Xiaomei, et al (226)
Effect of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton bolls on the strength of source and sink during boll development	GAO Xiangbin, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al (238)
Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil	LI Hui, ZHANG Junke, JIANG Changsheng, et al (247)
Effects of exogenous calcium on resistance of <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle to cadmium stress	MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong, et al (256)
Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars	LI Wenyang, YAN Suhui, WANG Zhenlin (265)
Review and Monograph	
Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses	ZHAO Qi, DAI Shaojun (274)
The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment	XU Yan, GAO Junfeng, ZHAO Jiahu, et al (284)
A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments	WANG Qing (293)
Scientific Note	
Variation in main morphological characteristics of <i>Amorpha fruticosa</i> plants in the Qinghai-Tibet Plateau	LIANG Kunlun, JIANG Wenqing, ZHOU Zhiyu, et al (311)
Identification of aphid resistance in eleven species from <i>Dendranthema</i> and <i>Artemisia</i> at seedling stage	SUN Ya, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, et al (319)
Research of padded film for afforestation in coastal argillaceous saline-alkali land	JING Feng, ZHU Jinzhao, ZHANG Xuepei, et al (326)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 1 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 1 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元