

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

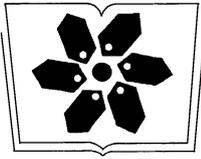
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
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 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112141911

刘玉明,张静,武鹏飞,周德民,宫辉力.北京市妫水河流域人类活动的水文响应.生态学报,2012,32(23):7549-7558.

Liu Y M, Zhang J, Wu P F, Zhou D M, Gong H L. The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7549-7558.

北京市妫水河流域人类活动的水文响应

刘玉明^{1,2,3}, 张 静^{1,2,3,*}, 武鹏飞^{1,2,3}, 周德民^{1,2,3}, 宫辉力^{1,2,3}

(1. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048;

2. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;

3. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要:选取 1986—1987 年、2005—2006 年为两个研究时段,解译 1987 年和 2005 年两幅土地利用图,分析土地利用和气候变化情况。利用土壤水评价模型(Soil Water Assessment Tool, SWAT)量化近 20 年来人类活动对妫水河流域产生的直接与间接影响。结果显示:人类活动的间接影响使径流量增加,汛期(6—8 月)增加显著,增幅达 34.67%。另外,涨水与退水过程明显加快,径流分配趋于不均匀。人类活动的直接影响使径流量大幅度降低,平均径流系数下降了 87% 以上。涨水和退水过程基本消失,径流量分配趋于均匀。因此,在妫水河流域,人类活动的间接影响使流域涵养水源能力下降,易发生洪涝和干旱。人类活动的直接影响增加了降水的利用率,减少了洪涝和干旱。

关键词:人类活动;水文响应;SWAT 模型;径流

The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing

LIU Yuming^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3,*}, WU Pengfei^{1,2,3}, ZHOU Demin^{1,2,3}, GONG Huili^{1,2,3}

1 Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

3 Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System, Beijing 100048, China

Abstract: Over the last several decades, researchers have studied the hydrological disciplines through observed data. But with the impacts of human activities, the observed data cannot show the real hydrological situation gradually. The quantificational analysis of hydrological response to human activities has become the indispensable foundation when reservoir, water control project and large scale farmland were built. This analysis is facing many unresolved problems, and it becomes the advance front of the field of hydrology and water resource. The effects of human activities on hydrology can be divided into direct effects and indirect effects. The direct effects are classified to irrigate farmland and forests, to build reservoirs and to carry out water control projects and so on. These activities change the quality, quantity and distribution of water resource directly. The indirect effects are urbanization, tree planting and agriculture and so on. These activities influence the water resource indirectly by changing the land use types and weather. In this study, the year of 1986—1987 and 2005—2006 were chosen as two study periods. Two land use maps on the base of two TM images of 1987 and 2005 were classified manually. A SWAT model was setup and carried out in Guishui River basin, Beijing China to simulate the hydrological response to human activities. The results indicated that, human activities had remarkable effects on the runoff. In the study periods, the direct effects influenced the runoff much more than the indirect effects did. The indirect effects

基金项目:国家自然科学基金(40901026,41271004);北京市科技新星项目(2010B046);科技部中非科技合作项目(2010DFA92400);北京市自然科学基金(8123041)

收稿日期:2011-12-14; 修订日期:2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maggie2008zj@yahoo.com

increased the runoff, especially dramatically in flood season (June to August) with the variation percentage was 34.67%. The swelling stage (April to August) and falling stage (September to December) got faster and the runoff showed high relativity to the precipitation. Along with the increase of the precipitation, the relativity was also enhancing, and the upward non-uniform coefficient indicated that the runoff varied more. The direct effects decreased the runoff coefficient by 87%, and more obvious in flood season when the peak values almost disappeared. The decreased non-uniform coefficient indicated that the runoff became well-distributed. So the indirect effects brought more droughts and floods while the direct effects can improve the water operating factor and make fewer droughts and floods. In this paper, conclusions are: (1) In this study, SWAT model simulated the runoff of Guishui River basin reasonable. This study also enriched the experience of the applications of SWAT model in China. (2) The expansion of the urban occupied more and more farmland, and then the farmland encroached on forests and grass. The increasing impervious surface changed the ability of water conservation of Guishui River basin. (3) The direct effects and indirect effects had different mechanism, and the direct effects play the most important role in the changes of the runoff. Hence need to note that the direct effects should be never ignored or be confused with the indirect effects. And more exploration need to do to increase the depth of it. Only in this way can we better understand the hydrological response to human activities clearly and correctly.

Key Words: human activities; hydrological response; SWAT model; runoff

随着人类改造世界能力的不断增强和活动范围的扩大,人类活动使自然环境的演化过程发生了改变。人类对水资源的迫切需求,使得人类活动对水文要素的影响逐渐突显出来。人类活动的水文效应的定量分析已成为大型水库、水利枢纽工程、大规模农田建设必不可少的依据,是区域发展迫切需要研究解决的难题,是水文水资源领域的前沿^[1-2]。长久以来,人们都是基于物理成因一致的长期观测资料来认识水文规律。但是,在人类活动日益剧烈影响下,这些观测资料已经逐渐不能真实地反映流域的水文状况。

人类活动对水文要素的影响可以分为直接与间接两类。直接影响是指农田林地灌溉、跨流域调水、修建水库及废水处理场等。这些活动直接作用于水资源本身,使其量、质及分布发生改变。间接影响是指城市化、开垦农田及植树造林等。这些活动通过改变流域下垫面及气候状况间接影响水文要素。近年来,对于人类活动的间接影响研究较多。一般通过水文模型法,分析下垫面或气候变化的水文响应^[3-5]。或通过特征参数时间序列法,分析水文状况随下垫面或气候的变化情况^[6-7]。这些研究认为不同地类对径流产生不同的影响。例如:城镇面积的增加会加大产流,林地和草地具有涵养水源的作用,可以减少产流。这些研究忽略了人类活动对径流的直接影响,只适用于人类活动较少的自然流域。对于人类活动直接影响的研究较少,主要通过突变分析、特征参数分析等方法对其进行研究。普遍认为在人类活动作用下,径流量减少,年内分配趋于均匀^[8-9]。但是,这些研究往往只考虑总体变化,并没有对直接影响和间接影响进行区分。随着人类活动范围的扩大和活动能力的加强,人类活动的直接影响逐渐突显出来,与间接影响共同改变流域水文状况。如果根据以往的研究,仅对人类活动的间接影响进行分析,则不能真实、准确地反映流域的水文变化。另外,两种人类影响改变流域水文状况的机理与机制不同,不能一概而论。只有将两种人类影响区分开,进行有针对性的研究,才能正确地认识与评价人类活动在改变流域水文状况时所起到的作用,制定合理的流域发展策略。

本研究以北京市妫水河流域为研究区,选取 1986—1987 年、2005—2006 年两个研究时段,利用 SWAT 模型量化近 20 年人类活动对妫水河流域造成的直接与间接影响。结合研究区土地利用/覆被变化、径流量变化及气候变化情况对这些影响进行具体分析。以期为区域发展提供合理的科学依据。

1 研究区概况

研究区如图 1 所示,妫水河流域位于北京市郊区山前平原,地处华北平原北部,主要县级行政区包括北京市延庆县。研究区四周地势较高,以山地为主,中部地势较低,属平原区。经纬度范围为:40°19'8"—40°38'40"N,115°48'52"—116°20'42"E,海拔高度在 473—2218 m 之间,总面积 860.67 km²。

研究区属于温带大陆性季风气候,冬季受蒙古高压影响盛行偏北风,寒冷干燥;夏季受大陆性低气压控制,盛行偏南风,炎热多雨。多年平均气温 10℃ 左右,多年平均降水量在 390 mm 左右,且多集中在 6、7、8 三个月份。

北京市延庆县城位于研究区内,近 20 年来城市化发展较为迅速。妫水河流域下游有水利工程—官厅水库,已于 1997 年丧失水源地功能,加之近年来城市化进程的加快,目前研究区面临水资源瓶颈和相关农业节水问题。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

在研究区建立 SWAT 模型,选取人类活动较少的时段对模型进行率定和验证。将率定好的 SWAT 模型应用于人类活动强烈的时期,通过 SWAT 模型控制气候变量,人为改变土地利用状况,模拟人类活动对径流量间接影响。同时,通过将模型的模拟值与实测值进行对比,得出人类活动对径流量的直接影响。

2.2 土地利用变化分析

本研究采用妫水河流域 1987 年 9 月 17 日、2005 年 9 月 21 日两期 TM 卫星影像资料,分析研究区在不同时期土地利用的变化情况。以 ArcGIS 软件对两期遥感影像进行人工解译,解译期间参考了“地球科学数据共享网”1980 和 2005 年我国 1:250000 土地利用图的分类情况,尤其对人工及非人工地类进行了仔细的区分。

2.3 气象水文数据分析

如图 1 所示,采用研究区内延庆县气象站、佛爷顶气象站逐日(每日 24 次)全要素数据,大观头、偏坡谷、永宁及康庄雨量站的逐月降水量数据。选取 1986—1987 年及 2005—2006 年两个正常气候时段的数据,分析气候变化情况。径流量分析是采用北京市延庆县水文站定点观测数据,该站点控制流域面积 810.51 km²。已获取 1986—1987 年、1989 年、1991 年、2005—2006 年逐月径流量数据,并结合土地利用变化情况及 SWAT 模型模拟的径流量变化结果,进行对比分析。

3 结果与分析

3.1 气候变化分析

图 2 显示了妫水河流域 1986—1987 年及 2005—2006 年两个时段的降水与气温变化情况。两个研究时段内的年均降水量分别为 388.1 mm 和 383.9 mm,年均气温分别为 9.7℃ 和 9.9℃,变化很小,且接近多年平均值。同时,两个时段内降水量和气温的相关系数达到 0.80 和 0.98,说明两个时段内的降水量和温度虽然在个别月份有细微差异,但在变化趋势上基本相同。因此,1986—1987 年和 2005—2006 年两个研究时段的气候状况相似而且具有代表性。

3.2 土地利用变化分析

通过 ArcGIS 建立研究区空间和属性数据库,详见表 1 和图 3。其中变化率计算公式为:

$$R = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

式中, U_a 和 U_b 分别为研究初期和研究末期某种土地利用类型的面积; T 为研究时段长,当 T 被设定为年时, R 表示研究区某种土地利用类型的年均变化率,这项指标对比较不同地类的变化差异和预测未来地类变化趋势都有积极的作用^[10]。

由表 1 和图 3 可以得出,研究区土地利用类型有:天然林地、人工林地、旱田、水田、城镇、草地、天然水域、

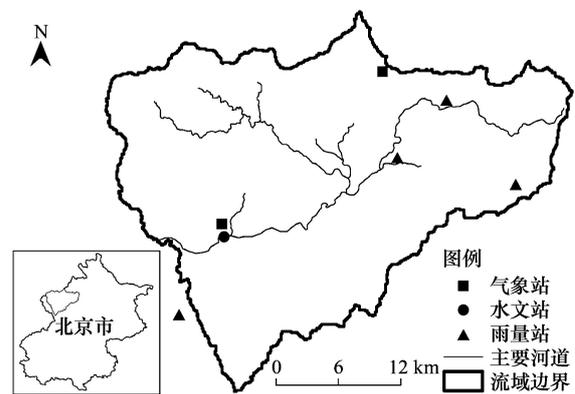


图 1 研究区及气象水文站点分布

Fig. 1 The study area and the distribution of the hydrological and weather station

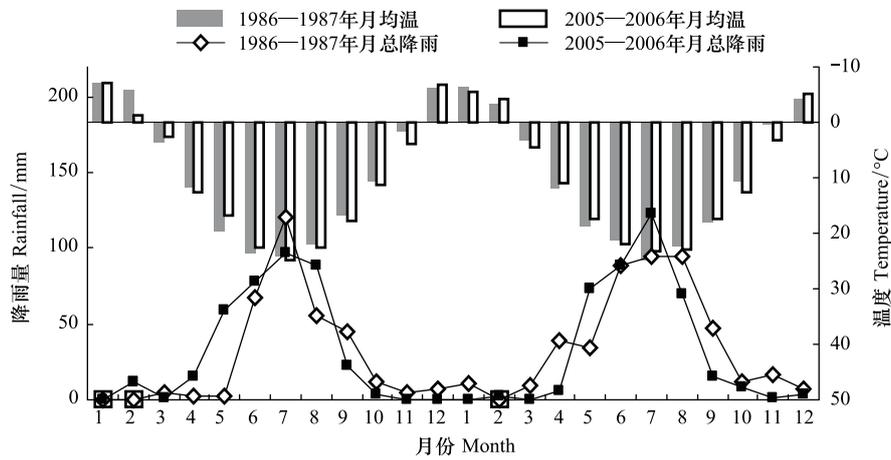


图2 妣水河流域降水与温度变化

Fig. 2 The changes on rainfall and temperature of Guishui River Basin

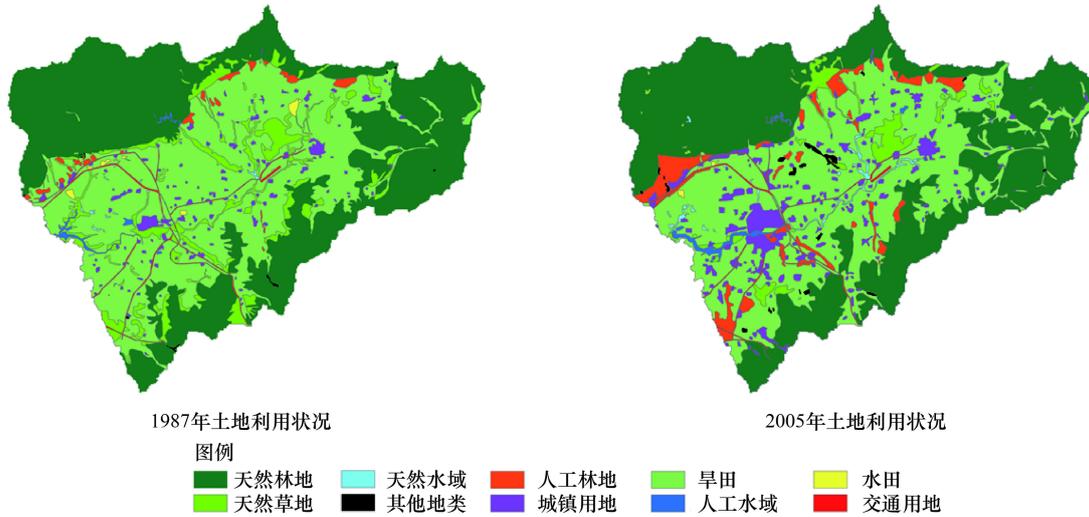


图3 1987年与2005年妣水河流域土地利用图

Fig. 3 Land-use maps of Guishui River Basin in 1987 and 2005

表1 各土地利用类型变化情况

Table 1 The changes of different land-use types

年份 Year	地类 Land-use types	天然林地 Natural forest	人工林地 Artificial forest	旱田 Glebe	水田 Paddy field	城镇用地 Urban	天然草地 Natural grass	天然水域 Natural water	人工水域 Artificial water	交通用地 Road	裸地 Bare land
1987	面积/km ²	388.47	8.06	363.34	2.18	17.33	67.78	1.47	3.49	7.88	0.69
	比例/%	45.14	0.94	42.22	0.25	2.01	7.87	0.17	0.41	0.92	0.08
2005	面积/km ²	378.81	36.81	346.1	0.55	50.16	26.52	4.93	5.37	7.7	3.72
	比例/%	44.01	4.28	40.21	0.06	5.83	3.08	0.57	0.62	0.90	0.43
1987—2005	变化量/km ²	-9.663	28.75	-17.25	-1.63	32.83	-41.26	3.46	1.88	-0.18	3.04
	变化率/%	-0.13	18.79	-0.25	-3.94	9.97	-3.20	12.40	2.84	-0.12	23.31

人工水域、交通用地及裸地。1987—2005年间,研究区主要的土地利用类型为天然林和旱田,占研究区总面积的80%以上。城镇用地和人工林地面积增长最大,分别为32.83 km²和28.75 km²,年均变化率为9.97%和18.79%,人工林地的变化量为天然林地变化量的3倍。这些变化主要和近年来延庆县城市化进程的加快

及周边植树造林等措施密切相关。天然林地、草地和旱田的变化量较大,但是年均变化率较小并呈负增长,分别为-0.13%、-3.20%和-0.25%,主要与城镇建设侵占林地、农田和草地等因素有关。另外,天然水域和裸地的总体变化量较小,人工水域及交通用地在研究时段内的变化均不明显。

由表 2 的土地利用转移矩阵可以看出,1987—2005 年间变化显著的土地利用类型主要包括:天然林地、天然草地、人工林地、城镇用地和旱田。天然林地和天然草地主要向旱田转化,分别占旱田变化的 35.48% 和 55.47%。旱田主要向城镇用地和人工林地转化,占城镇用地变化的 88.94%,占人工林地变化的 66.99%。这种转化主要是与城镇扩张密切相关。部分农田被城镇用地侵占,同时由于城镇建设的需要,部分农田施行了退耕还林。此时,被削减的旱田则需要向外扩张,开垦天然林地和天然草地,以保证耕种的需要。

表 2 土地利用转移矩阵

Table 2 The land-use transfer matrix

1987 年	2005 年									
	天然林地 Natural forest	天然草地 Natural grass	天然水域 Natural water	裸地 Bare land	人工林地 Artificial forest	城镇用地 Urban	旱田 Glebe	人工水域 Artificial water	水田 Paddy field	交通用地 Road
天然林地 Natural forest	360.94	5.19	0.06	0.30	2.02	0.58	18.93	0.21	0.00	0.14
天然草地 Natural grass	8.16	14.18	2.38	1.53	7.96	2.10	29.60	1.51	0.00	0.23
天然水域 Natural water	0.00	0.00	0.72	0.00	0.00	0.08	0.55	0.01	0.00	0.01
裸地 Bare land	0.35	0.00	0.00	0.04	0.03	0.19	0.08	0.00	0.00	0.00
人工林地 Artificial forest	0.44	0.03	0.00	0.08	5.91	0.19	1.39	0.00	0.00	0.00
城镇用地 Urban	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	17.13	0.08	0.00	0.00	0.01
旱田 Glebe	9.03	6.79	1.77	1.85	20.66	29.43	292.21	1.51	0.01	0.50
人工水域 Artificial water	0.29	0.14	0.27	0.00	0.00	0.06	0.85	1.85	0.00	0.00
水田 Paddy field	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	0.29	0.53	0.00
交通用地 Road	0.01	0.00	0.01	0.00	0.06	0.46	0.41	0.00	0.00	6.88

3.3 人类活动对径流量的影响模拟

3.3.1 SWAT 模型的率定及验证

本研究选取人类活动影响较弱的时期对模型进行率定和验证,使模型能够真实地反映流域产流情况。以 1985 年为模型预热期,1986—1987 年为模型率定期。由于 1990 年径流量数据缺失,因此以 1989 和 1991 年为模型验证期。验证期结果如图 4 所示。经计算,模拟结果的相关系数 $R^2=0.88$, 月均相对误差 $Re=26.8%$, Nash 系数 $Ens=0.87$ 。

在以往类似的研究中,王军德等在祁连山区杂木河流域对 SWAT 模型进行验证,以 1985 年和 1986 年为验证期,得到 $R^2=0.90$, $Ens=0.78$, 获得了较好的模拟结果^[5]。罗睿等在三川河流域评价 SWAT 模型的适用性,以 1984 年和 1985 年为验证期,得到 $Re=7.2%$, $Ens=0.73$, 符合模拟精度要求^[11]。张利平等在白莲河流域得到 SWAT 模型 2002 年至 2004 年验证期的 $R^2=0.86$, $Ens=0.73$, $Re=9%$, 适用于该流域的模拟^[12]。在本研究验证期得到的 $R^2=0.88$, $Ens=0.87$ 及 $Re=26.8%$ 说明 SWAT 模型能够基本反映妫水河流域的径流过程,模拟的径流量与实测值基本一致,但在个别月份存在明显差异。

实测值与模拟值的差异主要体现在 5 月至 9 月,本研究认为主要与蒸散发的模拟误差有关。根据延庆气象站和佛爷顶气象站的数据,研究区在 1989—1991 年的年平均潜在蒸发量为 1823.4 mm,其中 5 月至 9 月的潜在蒸发量为 1210.1 mm,占全年的近 70%。SWAT 模型仅能通过延庆站和佛爷顶站两个点上的逐日最高/最低气温、风速、相对湿度和太阳辐射来对蒸散发进行模拟,无法全面考虑整个流域的实际蒸散发情况,在潜在蒸发量较大时,更容易加大误差。另外,在研究区的农田中,遍布较多沟渠,这部分信息并没有通过土地利用数据传达给模型。考虑到流域的潜在蒸发量较大,因此,由沟渠造成的蒸发损失也是造成误差的一个主要因素。

3.3.2 人类活动对径流的影响模拟

人类活动的间接影响是通过改变土地利用及气候状况从而改变径流量。由于两个研究时段内气候相似,本研究认为人类活动的间接影响主要通过土地利用的变化对径流量产生影响。另外,SWAT 模型无法考虑人类活动对径流量的直接影响。因此,通过模拟得出的径流量为人类活动间接影响下的径流量,即土地利用变化影响下的径流量。

以 1987 年土地利用情况为原始状态,假设 1987—2006 年土地利用情况不发生改变,使用 1987 年土地利用图及 2005—2006 年气象数据对 2005—2006 年径流量进行模拟,得到无人人类活动影响的径流量。将 1987 年土地利用图替换为 2005 年土地利用图,进行第二次模拟,得到土地利用变化后 2005—2006 年的径流情况。土地利用变化后的 2005—2006 年径流量即为人类活动间接影响下的径流量。由于从水文站得到的径流量实测数据受人类活动的直接与间接影响的共同作用,因此第二次模拟与实测径流值之间的差异反映了人类活动对径流量的直接影响。结果如图 5 所示,人类活动间接影响使径流量增加,人类活动的直接影响使径流量减少,且变化十分显著。

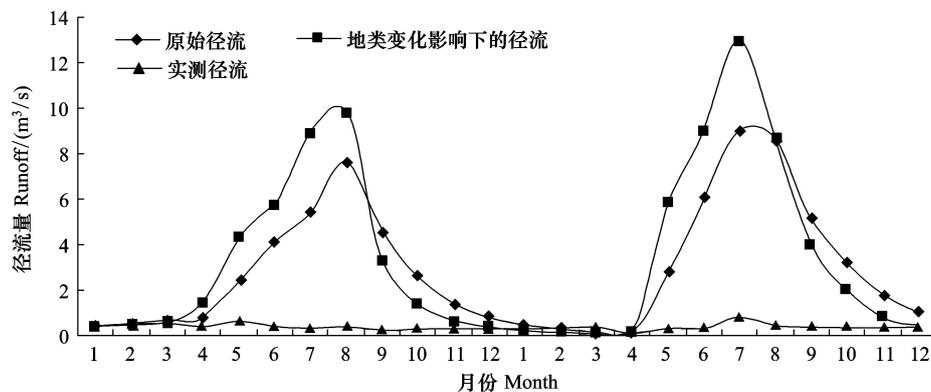


图 5 人类活动影响下的径流量

Fig. 5 The runoff under the effects of human activities

3.4 人类活动的水文响应分析

3.4.1 人类活动的间接影响分析

图 5 中“无人人类影响的径流”和“地类变化影响下得径流”两条曲线之间的差异反映了妫水河流域近 20 年来人类活动对径流量产生的间接影响。在没有人类活动影响时,径流量最大值 $9.04 \text{ m}^3/\text{s}$,最小值 $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在人类活动的间接影响下,径流量最大值 $13.00 \text{ m}^3/\text{s}$,最小值 $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 。两种情景下的径流系数分别为 0.28 和 0.33,增幅度达 17.86%。其中,汛期(6—8 月)的径流量增加最显著,月均增加 $2.36 \text{ m}^3/\text{s}$,增幅度达 34.67%。

为更深入地研究土地利用/覆被类型变化对径流量的影响情况,本研究采用径流分配不均匀系数来对其进行评价,公式为:

$$C = \sigma/\bar{R} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (R_i - \bar{R})^2} \quad (2)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T R_i \quad (3)$$

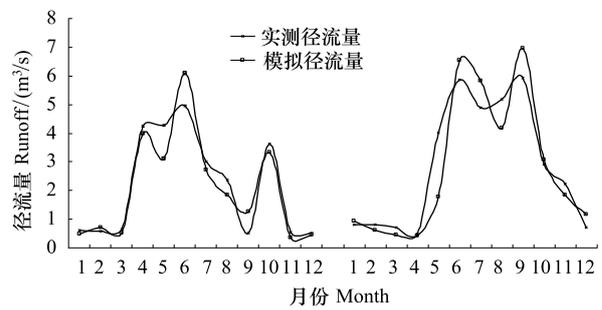


图 4 实测径流量与模拟径流量

Fig. 4 The observed runoff and the simulated runoff

式中, \bar{R} 为研究时段内月平均径流量, R_i 为研究时段内各月径流量, T 为研究时段内月数总和, C 为研究时段内径流分配不均匀系数。 C 值越大, 表明研究时段内各月径流量值相差越悬殊, 径流量分配越不均匀。 C 值越小则结论相反。 径流分配不均匀系数的变化可以反映径流分配的演化特征。 经计算, 无人人类活动时 2005—2006 年径流分配不均匀系数为 0.93, 受人类活动间接影响时径流分配不均匀系数为 1.12。 因此, 受人类活动间接影响, 各月径流量差异增大。

图 6 显示, 在人类活动的间接影响下, 径流量与降水量的相关性显著增加, 相关系数 R^2 由 0.69 增加到 0.93。 为更深入地研究径流量变化情况, 将枯水期(1—3 月)、涨水期(4—8 月)及退水期(9—12 月)分开进行研究。 如图 7 所示, 在涨水期, 受人类活动间接影响的点分布在无人人类活动的点的上方, 涨水过程加快, 月均增加 $1.98 \text{ m}^3/\text{s}$, 增幅为 42.13%, 降水-径流的相关性显著且变化较大, 相关系数为 0.91 和 0.70。 在退水期, 受人类活动间接影响的点分布在无人人类活动的点的下方, 退水过程加快, 月均减少 $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$, 减幅为 37.32%, 降水-径流的相关性降低且变化较小, 相关系数为 0.81 和 0.80。 在枯水期, 受人类活动间接影响的点分布在无人人类活动的点的下方, 月均减少 $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$, 减幅为 27.96%, 降水-径流基本无相关性。

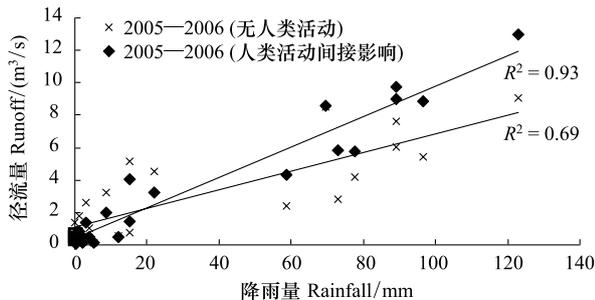


图 6 降水-径流点阵图(间接影响)

Fig. 6 The lattice figure of rainfall-runoff(indirect effects)

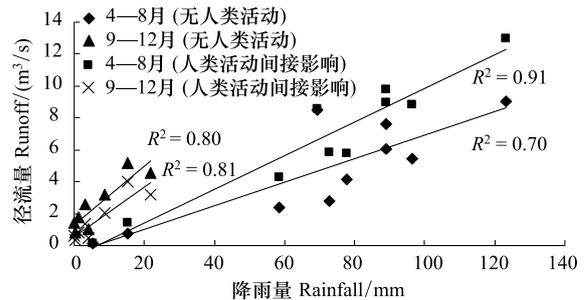


图 7 涨水期及退水期降水-径流点阵图

Fig. 7 The lattice figure of rainfall-runoff in swelling and falling stage

在以往类似的研究中, 主要认为林地和草地具有涵养水源的作用, 能够减少径流量, 农田和城镇用地的增加会降低流域涵养水源的能力, 能够增加径流量^[7,13-15]。 在不同的流域内, 这些影响在量上存在一定的差异。 同时, 这些研究还普遍认为, 林地较草地能够更多的削减径流量, 城镇用地较农田能够更多的增加径流量。

结合 1987 年至 2005 年的土地利用变化情况, 本研究推测妫水河流域在人类活动间接影响下径流量增加的原因是城镇用地的增加和草地的减少。 城镇用地面积的增加及草地的减少使流域内不透水面增加, 下渗减少, 降低了流域的涵养水源的能力。 降水-径流的相关性显著增加且年内随降水量波动, 降水量越大, 则相关性越高, 使径流量年内分配的差异增大。 人工林地的增加对涵养水源起到积极作用, 但不能改变径流量的整体变化趋势。 旱田的减少虽然能够减少径流量, 但是由于年均变化率 -0.25% 较小, 无法对径流量产生较大影响。 因此, 近 20a 来人类活动对妫水河流域的间接影响使流域的涵养水源能力降低, 降水量较大时容易发生洪涝灾害, 降水量较少时容易发生干旱甚至断流。

3.4.2 人类活动的直接影响分析

图 5 中“地类变化影响下的径流”和“实测径流”两条曲线之间的差异反映了人类活动对妫水河流域的直接影响。 在人类活动的直接影响下, 径流量最大值由 $13 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少至 $0.84 \text{ m}^3/\text{s}$, 减幅为 93.54%, 径流量最小值由 $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, 增幅为 157.14%。 总径流量减少, 径流系数由 0.33 减少至 0.04, 减幅为 87.88%, 月均减少 $3.01 \text{ m}^3/\text{s}$, 减幅为 88.62%。 图 8 显示, 由于人类活动的直接影响, 降水-径流的相关性由 $R^2=0.93$ 减少至 $R^2=0.16$, 径流量已基本不随雨量波动。

图 9 显示, 人类活动间接影响下汛期(6—8 月)的点基本分布在 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 径流量线以上, 且分布不集中。 实测数据汛期的点贴近 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 径流量线分布, 且分布集中。 人类活动的直接影响使汛期径流量及波动大幅减少, 月均减少 $8.71 \text{ m}^3/\text{s}$, 减幅达 95.14%, 汛期径流量的峰值基本消失。 其他月份的点也由分布不集中

向集中转变,变化幅度没有汛期显著。2005—2006 年径流分配不均匀系数由 1.12 减少至 0.34,各月径流量分配由不均匀向均匀转变,稳定在 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。

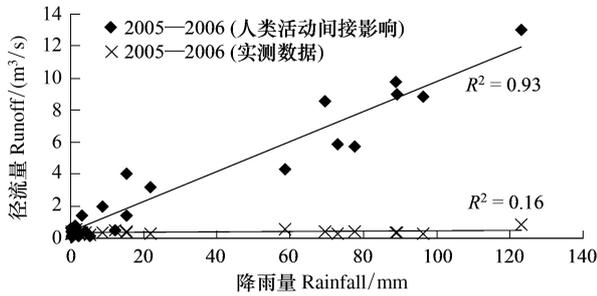


图 8 降水-径流点阵图(直接影响)

Fig. 8 The lattice figure of rainfall-runoff(direct effects)

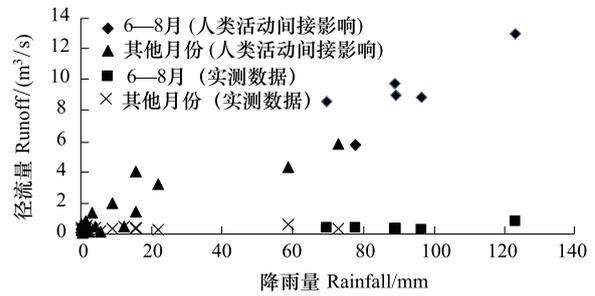


图 9 汛期及其他月份降水-径流点阵图

Fig. 9 The lattice figure of rainfall-runoff in flooding season and other months

流域径流量的大量减少主要与流域治理、发展措施有关。近几十年来,政府为减少官厅水库上游地区(包括研究区)的水土流失,开展了农林、水利、水土保持相结合,治坡、治沟相结合的流域综合治理工程,修滞洪水库和支流水库,引水漫灌,加强河道治理,植树造林,梯田建设等措施。数据显示,截至 2007 年,上游地区建蓄水工程 245 座,总库容 12.6 亿 m^3 ,有效地防止了水土流失,减少了径流量。另外,截至 2006 年,上游地区有万亩以上灌区 32 处,其中大型灌区 5 处,中型灌区 6 处有效灌溉面积 1548 km^2 ,每年农业用水量约 8.1 亿 m^3 ,是解放初期的 2 亿 m^3 的 4 倍^[16]。

研究区内植树造林、退耕还林措施体现尤为明显。研究时段内,人工林地累计增加 28.75 km^2 ,旱田累计减少 17.25 km^2 。一方面,人工林地增加了地表径流的下渗和叶面的蒸散,旱田的减少使地表产流量减少;另一方面,林地的增加使恢复和保护植被存活用水及造林灌溉用水量加大。例如油松造林每株集水坑用水 $0.2-0.3 \text{ m}^3$ 可提高成活率 40%^[17]。

研究区在 1987 年至 2005 年间城镇扩张十分迅速,面积增长达 32.8 km^2 ,使延庆的城镇绿化保育用水大量增加。延庆县近年来大力发展旅游业,建成“夏都”、“妫水”、“江水”三大滨河公园,更加重了城市绿化保育用水的负荷。同时,为增加公园内水体面积,在河道中修建橡胶坝对河道进行截蓄。人工水域面积累计增加 1.88 km^2 ,年均蒸发量增加约 350 万 m^3 。另外,城市的扩张导致了地下水开采的增大。地下水水位的下降会增加降雨的下渗,减少地表径流^[18]。延庆的潜水埋深由 1991 年的 6.93 m 下降到 2003 年的 7.47 m ,在增加雨水下渗、减少地表径流的同时,潜水位的下降也减少了河流的基流补给。

近几年来,延庆县耕地中,如玉米、小麦等耐旱型粮食作物的播种面积呈逐年下降的趋势,2003 年比 1999 年减少了 45.3 km^2 ,1999—2003 年当中,平均每年减少 9.1 km^2 。减少的耕地主要用于发展耗水量较大的水果和蔬菜,较少一部分转种经饲作物。截止 2004 年底,延庆县的水果生产规模已达到 160 km^2 。同时,政府还修建了一系列水利工程以便农业灌溉。例如,2001 年修建的妫水河农场橡胶坝对河道进行截蓄,以解决县城以西农作物的灌溉的用水问题。高耗水型作物的漫灌及农业水利工程的截蓄是流域径流量减少的主要因素之一。

4 结论

(1) SWAT 模型成功应用于妫水河流域,模型能够合理的模拟妫水河流域的产流情况,丰富了 SWAT 模型在国内半干旱地区的应用经验。同时,利用 SWAT 模型量化了近 20a 来人类活动对妫水河流域产生的直接与间接影响,将两种人类影响分别进行研究,对于人类活动剧烈地区的水文响应研究具有探索意义。

(2) 妫水河土地利用类型变化的主要表现为城镇用地的迅速向农田的扩张,农田向天然林地和草地的扩张,部分地区退耕还林的实施。其中以城镇用地、人工林地的增长及天然草地的减少最为显著。土地利用的变化使流域涵养水源的能力整体下降,城镇用地的增长和天然草地的减少是主要原因。

(3)人类活动的间接影响和直接影响使妫水河流域的径流量发生了明显的差异。人类活动的间接影响通过改变土地利用状况,使流域的产流机制发生改变,间接增加了径流量,在汛期增加尤为明显,枯水期变化较小。人类活动的直接影响作用于水体,通过截蓄、漫灌等措施,使径流量直接发生改变,全年径流量明显减少,峰值基本消失。同时,人类活动的直接影响在人类的整个影响过程中占主要地位,以后应该加强这方面的研究,不能与人类活动的间接影响混为一谈。对于人类活动的直接影响,目前还没有有效的手段对其真实值进行监测,还需研究人员更多的探索和研究。

References:

- [1] Zhang S T, Bai C Y, Wan S Q, Liu Y. The research process on hydrological effects to human activities. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3):317-319.
- [2] Chen X H, Tu X J, Xie P, Li Y. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements. *Advanced in Earth Science*, 2010, 25(8):800-811.
- [3] Feng X J, Zhang G X, Yin X R. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur River basin based on the SWAT model. *Progress in Geography*, 2010, 29(7):827-832.
- [4] Cheng L, Xu Z X, Luo R, Mi Y J. SWAT application in arid and semi-arid region: a case study in the Kuye River basin. *Geographical Research*, 2009, 28(1):65-73.
- [5] Wang D J, Li Y H, Li Z T, Gao J, Jin Y Z, Hu X Q, Huang J H. Optimization of vegetation covers in Qilian Mountains based on hydrological responses by SWAT model: a case study of Zamu River basin in Upper Shiyang River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21):5875-5885.
- [6] Mansur S, Nurkamil Y. Oasis land use change and its hydrological response to Tarim River Basin. *Geographical Research*, 2010, 29(12):2251-2260.
- [7] Zhu L, Qin F C, Yao Y F, Yu X X. Response of forest vegetation/land use change to hydrological Dynamics in Hongmenchuan Watershed of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16):4287-4294.
- [8] Luan Z Q, Deng W. Study on hydrological effects of human activities in Sanjiang Plain. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(5):11-14.
- [9] Luan Z Q, Cao H C, Zhou D M, Deng W. Impact of human activities on the hydrological regime of Bielalong River watershed. *Wetland Science*, 2008, 6(2):258-263.
- [10] Li Z F, Wang Y M, Feng Y S, Wang J H, Ma A Q. Analysis of land-use change in Yulin prefecture based on RS and GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2):97-99, 140-140.
- [11] Luo R, Xu Z X, Cheng L. Application of SWAT model in the Sanchuan River catchment. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, 18(5):28-33.
- [12] Zhang L P, Chen X F, Zhang X L, Song X Y. Application of SWAT model in Bailian River Valley runoff simulation. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(6):4-8.
- [13] Xie Y Y. Study on the Ecological Response of Hydrology on Forest Vegetation Change in Luoyu Watershed Based on the SWAT Model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4):197-202.
- [14] Song Y H, Ma J Y. SWAT-Aided research on hydrological responses to ecological restoration: a case study of the Nanhe River Basin in Huajialing of Longxi Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):636-644.
- [15] Wan R R, Yang G S, Li H P. Flood response to land-use and land-cover change: a case study of Xitiao Rivulet Basin in upper reach of Taihu Lake. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(3):10-15.
- [16] Chen Y P. Present situation analysis of water resources in Guanting reservoir. *Beijing Water*, 2007, (6):7-11.
- [17] Wang Y A. Talking about ecology water usage of forest. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2004, 23(1):44-46.
- [18] Fang S, Dai W Y. Control and utilization of rainwater in saline groundwater region of North China Plain. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2003, 1(1):38-43.

参考文献:

- [1] 张升堂, 拜存有, 万三强, 刘音. 人类活动的水文效应研究综述. *水土保持研究*, 2004, 11(3):317-319.

- [2] 陈晓宏,涂新军,谢平,李艳. 水文要素变异的人类活动影响研究进展. 地球科学进展, 2010, 25(8):800-811.
- [3] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应. 地理科学进展, 2010, 29(7):827-832.
- [4] 程磊,徐宗学,罗睿,米艳娇. SWAT 在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例. 地理研究, 2009, 28(1):65-73.
- [5] 王军德,李元红,李赞堂,高菁,金彦兆,胡想全,黄津辉. 基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例. 生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [6] 满苏尔·沙比提,努尔卡木里·玉素甫. 塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应. 地理研究, 2010, 29(12):2251-2260.
- [7] 朱丽,秦福仓,姚云峰,余新晓. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应. 生态学报, 2010, 30(16):4287-4294.
- [8] 栾兆擎,邓伟. 三江平原人类活动的水文效应. 水土保持通报, 2003, 23(5):11-14.
- [9] 栾兆擎,曹会聪,周德民,邓伟. 人类活动对别拉洪河流域水文情势的影响研究. 湿地科学, 2008, 6(2):258-263.
- [10] 李忠锋,王一谋,冯毓菀,王建华,马安青. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区土地利用变化分析. 水土保持学报,2003,17(2):97-99, 140-140.
- [11] 罗睿,徐宗学,程磊. SWAT 模型在三川河流域的应用. 水资源与水工程学报, 2008, 18(5):28-33.
- [12] 张利平,陈小凤,张晓琳,宋星原. SWAT 模型在白莲河流域径流模拟中的应用研究. 长江科学院院报, 2009, 26(6):4-8.
- [13] 谢媛媛. 基于 SWAT 模型的罗玉沟流域森林植被变化的水文生态响应研究. 水土保持研究, 2009, 16(4):197-202.
- [14] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例. 生态学报, 2008, 28(2):636-644.
- [15] 万荣荣,杨桂山,李恒鹏. 流域土地利用/覆被变化的洪水响应——以太湖上游西苕溪流域为例. 自然灾害学报, 2008, 17(3):10-15.
- [16] 陈月平. 官厅水库水资源现状分析. 北京水务, 2007, (6):7-11.
- [17] 王永安. 浅谈森林生态用水. 中南林业调查规划, 2004, 23(1):44-46.
- [18] 方生,代文元. 华北平原咸水区雨洪控制利用. 南水北调与水利科技, 2003, 1(1):38-43.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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