

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

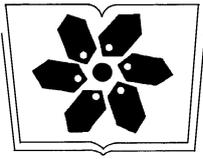
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期  
Vol.30 No.21  
**2010**



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 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应.....	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势.....	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性.....	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康.....	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系.....	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果.....	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子.....	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应.....	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局.....	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 .....	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 .....	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系.....	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征.....	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响.....	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征.....	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较.....	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局.....	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
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 .....	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 .....	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 .....	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 .....	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 .....	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 .....	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响.....	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较.....	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响.....	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 .....	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 .....	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响.....	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
<b>专论与综述</b>	
河流水质的景观组分阈值研究进展 .....	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
<b>研究简报</b>	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 .....	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 .....	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

# 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

王军德<sup>1,\*</sup>, 李元红<sup>1</sup>, 李赞堂<sup>2</sup>, 高 菁<sup>2</sup>, 金彦兆<sup>1</sup>, 胡想全<sup>1</sup>, 黄津辉<sup>3</sup>

(1. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000; 2. 中国水利学会, 北京 100000; 3. 加拿大土木工程学会, 加拿大, 蒙特利尔 H3Z1N1)

**摘要:**以西北干旱区祁连山系杂木河流域为研究区,应用分布式水文模型(SWAT)对该流域的径流进行模拟研究,探讨了流域尺度和微地形尺度7种不同植被组合模式下水文响应特征。结果表明:流域尺度上,单一植被模式在水分收支各分支中能够明显加大流域总蒸散发量,减少流域出山径流量,增加流域的水分蓄变量,为水资源的可持续供给带来时间变异;组合模式明显改善流域水分收支比例,适度减弱流域蒸散发量,增加流域出山径流,为水资源可持续供给提供恒量保证,减弱局地的水资源时间变异程度;微地形尺度上,各种景观类型的水文效应随着海拔高度变化基本一致,径流深随着海拔高度的增加而减小,蒸散发随着海拔高度的增加而增加。不同高度分级中,植被组合模式的不同导致在不同坡度条件下水文效应差异显著,40°坡度是水文效应变化规律发生变化的一个拐点。基于上述分析,提出祁连山区最佳水源涵养效应的生态模式。

**关键词:**祁连山区;最佳水源涵养;植被模式;SWAT 模型

## 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

WANG Junde<sup>1,\*</sup>, LI Yuanhong<sup>1</sup>, LI Zantang<sup>2</sup>, GAO Jing<sup>2</sup>, JIN Yanzhao<sup>1</sup>, HU Xiangquan<sup>1</sup>, Jeanne Jinhui HUANG<sup>3</sup>

1 Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China

2 Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100000, China

3 Canadian Society for Civil Engineering, Montreal H3Z1N1, Canada

**Abstract:** The research studied the Zamu River basin in Qilian Mountains in the arid region in NW China with the use of the distributed hydrological model SWAT (the Soil and Water Assessment Tool that can simulate soil water sediment and nutrient). This paper discussed hydrological response for different vegetation covers at basin and sub-basin scales. The model was able to represent the hydrological cycle even though some discrepancies were observed, probably due to a lack of sufficient rainfall data. This research investigated seven combined cases: forest-deciduous (FRSD), grassland (SPAS), rang-brush (RNGB), FRSD + SPAS, FRSD + RNGB, SPAS + RNGB, and SPAS + URLD (in short for Residential-Low Density). The hydrological responses vary at various spatial scale as well as at various vegetation combinations. At the basin scales, a single vegetation cover would substantially increase the total evapotranspiration amount and basin storage, decrease the runoff, and cause the temporal variations of sustainable water supply. A combination of various vegetation covers would improve the water budget, moderately decrease the total evapotranspiration, increase runoff, ensure the sustainable water supply and decrease the temporal variation of water in the local region. FRSD would increase the soil water capacity and decrease the change of soil water capacity. SPAS would decrease the soil water capacity due to high density roots. Human

**基金项目:**国际科技合作项目(2007DFA70860);甘肃省创新团队建设项目(098TTC A006);水利部公益性行业项目资助(201001060)

**收稿日期:**2010-03-05; **修订日期:**2010-09-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jundwang@163.com

activity play a negative role in hydrological response in Qilian Mountain and they can reduce the total evapotranspiration and soil water capacity. At the sub-basin scale, the changes of hydrological responses of different vegetation covers showed the same trend as the altitude changes. With the altitude increasing, the depth of runoff decreased and evapotranspiration increased. At one altitude, a change in vegetation would result in different hydrological responses on different slopes, and a slope of 40 degrees is the inflection point where the hydrological responses would change diversely. Based on these analyses, optimized vegetation covers with the best hydrological responses were obtained. FRSD and FRSD + RNGB have very good hydrological response in different terrain in Qilian Mountains. RNGB and RNGB + SPAS also have good hydrological response between 2601 and 3000 m above sea level. FRSD + SPAS performs the good hydrological response between 3000 and 3800 m above sea level. The cold region is above 3800 m above sea level and it's best to keep the current vegetation in the region. According to similar studies that compared the hydrological response for different plants and for different land use, we would suggest that *Picea crassifolia* and *Sabina przewalskii* are dominant plants for FRSD, *Cupular willow*, *Potentilla fruticosa* and *Spiraea salicifolia* L. are dominant plants for RNGB, and that *Kobresia pygmaea* is dominant plant for SPAS.

**Key Words:** Qilian Mountains; optimization of hydrological response; optimal vegetation covers; SWAT model

祁连山系是我国西北内陆区重要的山系,其水源涵养效能对维护河西内陆区水资源稳定、社会经济可持续发展具有举足轻重的地位。然而,在全球气候变暖和人类活动强烈干预下,祁连山区出现冰川消融、雪线退缩、林地草地严重破坏等生态环境问题,祁连山区天然林地的水源涵养作用逐渐减弱。因此,借助合理的植被模式恢复祁连山区水文涵养效应的研究手段成为本研究的关键。

植被恢复模式的水文效应研究目前主要有三大类方法:一是采用试验流域的方法,二是采用特征变量的时间序列分析方法<sup>[1]</sup>,三是 20 世纪 60 年代以来,随着计算机技术的发展,研究流域水文过程的数学模型得到了快速的发展,模型模拟手段来评估植被模式的水文效应<sup>[2-4]</sup>。

目前 SWAT 模型在我国主要被用于流域分布式水文模拟非点源污染负荷估算、土地覆被与气候变化分析等方面<sup>[5-11]</sup>。在分布式水文模拟方面,SWAT 模型已成功应用在黑河流域<sup>[12]</sup>、黄河河源区<sup>[13]</sup>、长江流域<sup>[3]</sup>、海河流域<sup>[14]</sup>、淮河流域<sup>[15]</sup>等我国主要流域的水文过程模拟和分析中,取得较好的成果。本文将 SWAT 模型应用到河西内陆区祁连山系,并模拟了多种不同植被组合模式下的水文响应情况,旨在定量分析不同植被组合模式在流域尺度和微地形尺度上的水文效应,进而探索改善祁连山区生态环境和进行生态恢复的最佳途径。研究结果有助于对祁连山系降水—径流机制的理解,对正在实施的石羊河流域综合治理工程、祁连山系生态修复和可持续发展提供重要的科学依据。

## 1 研究流域概况

杂木河流域位于东经 102°00'—102°35',北纬 37°23'—37°44';属石羊河流域上游水源涵养功能区,是石羊河上有八大支流之一。

杂木河流域为石羊河上游第三大支流,毛藏寺以上由大小牛头沟、车龙沟、半洋河、响水河、小毛藏河等汇合而成;毛藏寺以下有神树沟、岔儿沟、大小藏民沟、黑沟、毛大板沟、塔儿沟等间歇性河沟分别汇入主流,于杂木寺出山。山区干流长约 60km,流域面积 851km<sup>2</sup>,海拔高度为 2050—4830m。上游高山区有冰川 3.74km<sup>2</sup>,河源以降水和冰雪融水为补给水源,毛藏寺以上产流占 80%。年径流总量中降水直接产流占 65.2%,降水渗入基岩裂隙后排入河流的地下水占 30.7%,春季融雪水占 2.6%,夏季融冰水占 1.5%。1948 年以来,杂木寺站最大年径流量为 4.948 亿 m<sup>3</sup> (1958 年),最小的年径流量为 1.395 亿 m<sup>3</sup>/a (1965 年),多年平均径流量为 2.497 亿 m<sup>3</sup>/a。河流水源地植被较好,分布高山草甸、高山草原、灌木、乔木等植被,水土流失甚微,年均输沙量为 16.5 万 t,侵蚀模数为 194t/km<sup>2</sup>。研究区域的土壤共有 4 个土纲,7 个土类,10 种土壤类型,高山土、钙层土所占面积比例较大,分别为 80.84%、16.82%。杂木河水系图见图 1。

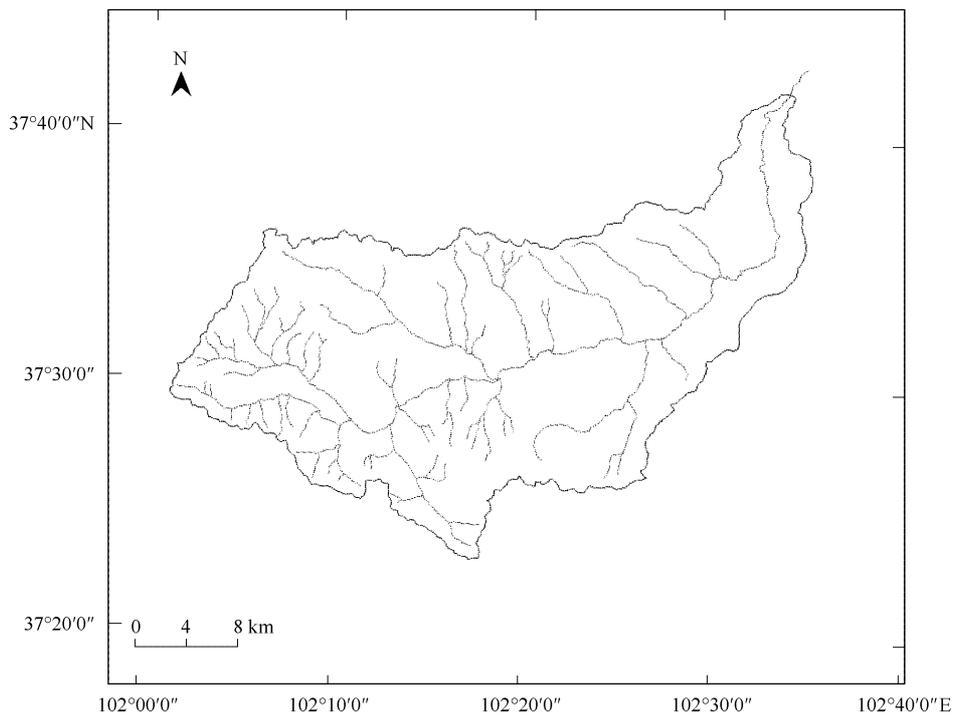


图 1 杂木河流域水系图

Fig. 1 River system of Zamu river basin

## 2 研究内容与方法

### 2.1 SWAT 模型空间数据库和属性数据库的构建

SWAT 模型的主要输入数据有气象数据、数字高程模型 (DEM) 数据、土壤数据、土地利用数据;模型校准和验证采用实测的月径流量资料,气象数据为杂木河流域内杂木寺和毛藏寺的日观测资料。以 GIS 技术为支持,构建了杂木河流域的 SWAT 模型输入的空间数据库和属性数据库(表 1)。

表 1 SWAT 模型所需数据及格式  
Table 1 Datas and their format for SWAT

数据 Data	数据项目 Data types	精度 Accuracy	格式 Format	来源 Source
空间数据	数字高程模型 (DEM)	1:10 万	GRID	国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态科学 数据中心”
	土地利用和土地覆盖变化 (LUCC)	1:10 万	GRID/shape	
	土壤类型	1:100 万		
属性数据	土壤属性数据		DBF	《甘肃土种志》、《甘肃土壤》及流域内各县市土壤志
	植被属性数据			
气象数据	降水、最高最低气温、辐射、湿度、风速	日	DBF	中国气象局、甘肃省气象局
水文资料	流量	日、月、年	DBF	甘肃省水文局

### 2.2 土地利用数据

研究中采用的国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态科学数据中心”的 1986 年 1:10 万土地利用图,其土地利用类型采用我国土地资源 6 大类 25 亚类的分类方法。SWAT 模型能够识别的土地利用基于美国的土地利用分类,以 4 个英文字母为编码,需要将上述土地利用数据重新分类,转换成模型规定的土地利用英文字母代码,通过代码把研究区的土地利用类型和模型附带的植被生成数据库、农业管理数据库联系起来(图 2、表 2)。

表 2 SWAT 中杂木河流域土地利用类型

Table 2 Code of land use types of Zamu River basin in SWAT

代码 Code	土地利用类型 Land use type	SWAT 代码 SWAT Code	土地利用类型 Land use type in SWAT
122	丘陵旱地	BARL	Barley
123	平原旱地	AGRC	Agricultural land-close
21	有林地	FRSD	Forest-deciduous
22	灌木林	RNGB	Range-brush
23	疏林地	FRST	Forest-mixed
31	高覆盖度草地	SPAS	Summer pasture
32	中覆盖度草地	SPAS	Summer pasture
33	低覆盖度草地	SPAS	Summer pasture
52	农村居民点	URML	Residential-Med/Low Density
53	其他建设用地	URML	Residential-Med/Low Density
67	其他未利用土地	URLD	Residential-Low Density

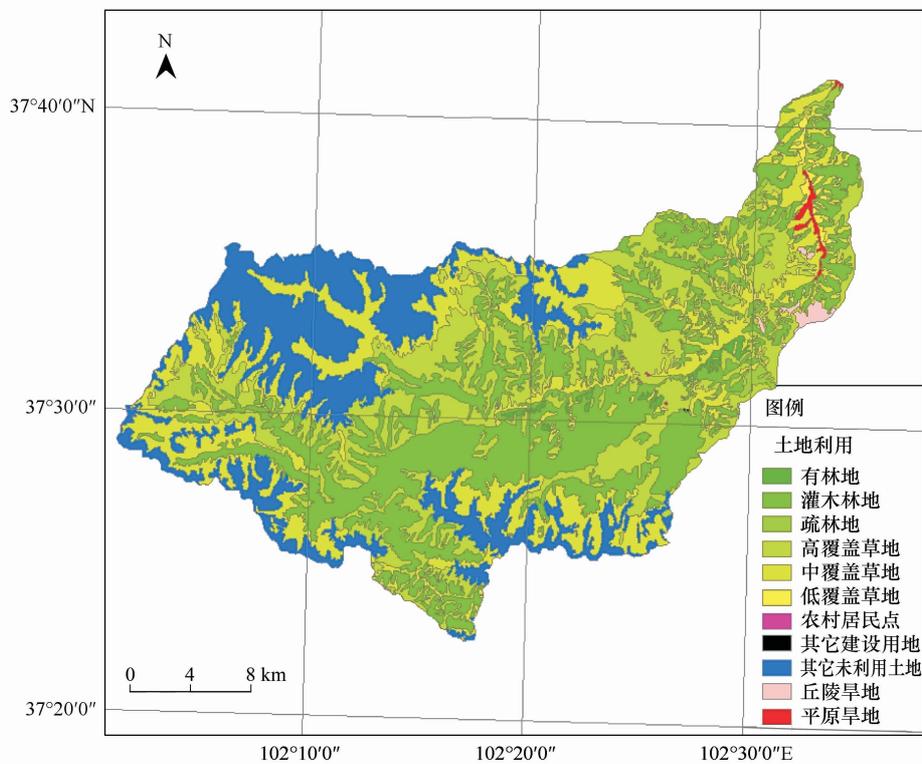


图 2 杂木河流域土地利用图

Fig. 2 Land use maps of Zamu river basin

### 2.3 模型初始参数的选取

杂木河流域 SWAT 模型所需的植被截流、植被与土壤的蒸散发系数和初始含水率主要采用党宏忠<sup>[16]</sup>、董晓红<sup>[17]</sup>等人在项目区的实测资料。

各层土壤容重, 土壤各层有效田间持水量, 土壤各层饱和和导水率的资料利用 USDA 开发的 SPAW 软件中的 Soil Water Characteristics 模块来处理。该模块通过土壤的质地数据来计算土壤水文属性。田间反照率参照前人的研究成果选用 0.23。

### 2.4 SWAT 模型的适用性评价

SWAT 模型是具有物理基础的、流域尺度的动态模拟模型, 模型运行以日为时间单位, 但可以进行连续多

年的模拟计算。其适用性评价主要表现在参数的敏感度分析、参数的校准、验证以及不确定性分析。

由于数学模型只是对真实世界所作的粗略模拟,模型的敏感参数影响着模拟结果的准确性和可靠性。论文中参数敏感性分析是在对分布式模型进行初步估算率定之后,用该参数值模拟计算研究区某实测年份的径流量,对模型中重要的 6 个重要参数进行敏感性检验;检验方法采用 LH-OAT,检验输出值为流量、蒸散发量等 2 个输出结果,以确定该地区最敏感的影响参数,详见表 3。

表 3 敏感性参数及其校准值

Table 3 Sensitive analysis and calibration value for SWAT

敏感等级 Sensitive level	输入文件 Input files	校准参数 Calibration factor	参数含义 Factor meaning	参数值 Factor value
1	*. MGT	CN2	半湿润径流曲线系数	65—75
2	*. SOL	SOL_AWC(mm/mm)	土壤可利用水量	0.25
3	*. GW	CWQMN(mm)	最小基流出流阈值	0.12—0.24
4	*. GW	Rchrg_dp	深层地下水下渗率	0.15—0.20
5	*. HRU	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.06—0.30
6	*. HRU	CANMX(mm)	植被最大储水量	0.80—1.8

在参数敏感度分析的基础上,运用实测月径流数据,采用 SCE-UA 方法进行模型的精确校准及不确定性分析,并用该研究区的实测数据进行验证。考虑到径流数据的可获取性以及水文气候条件相似性,研究选用 1972 年作为准备阶段,1975—1979 年作为模型的校正期,1981—1982 和 1985—1986 年作为模型的验证期,进行河道流量对径流进行参数率定。通过调整参数使径流模拟值与实测值吻合,要求模拟值与实测值年均误差应小于实测值的 10%,月均值的线性回归系数  $R^2 > 0.8$ ,且  $Ens > 0.7$ (表 4)。

表 4 模型模拟值的结果评价

Table 4 Evaluation for output of Swat model

尺度 Scale	阶段 Period	Nash 效率系数 Nash efficiency	相关系数 $R^2$ Correlation efficiency
月 Month	校正期	0.7105	0.8610
	验证期	0.7560	0.8965

## 2.5 基于 SWAT 的水文生态响应分析的模式建立

土地利用类型是影响水文的主要因素之一。不同的土地利用有着不同的水文特性,这不仅与其自身特性有关,而且与土地利用在流域内的空间分布特征相关,每种土地利用往往与地形或土壤类型相联系。结合地理信息技术地形分析和空间分析方法将杂木河主要植被类型优势斑块进行组合设定成 7 种不同的土地利用组合模式(表 5)。利用杂木河流域 SWAT 水文模型模拟不同土地利用条件下的水文相应特征,分析不同立地条件下水文响应的空间分布特征。

## 3 结果分析

### 3.1 流域尺度植被组合模式的水文效应研究

利用杂木河流域分布式 SWAT 模型分别进行流域水量收支平衡预测,同时对比分析 1986 年现状条件和未利用土地+草地的景观类型的水量收支(表 6)。

(1)蒸散发是杂木河流域水资源消耗的主要形式,占降水总量的 55.82%—56.57%。良好植被模式条件下,林地由于减弱了土壤蒸腾和根系吸收水的蒸腾作用而蒸发最弱,相反草地总蒸散发强烈。人类活动对于自然植被的破坏能够明显减弱流域的蒸散发强度。

(2)组合植被模式能够明显改善流域的水分收支状况,有利于流域水源涵养效能的提升,林地+草地和林地+灌木林地能够有效减少流域植被蒸散发损失,增加流域产流量,这对于中下游地区水资源供给能够提

供良好保障。

表 5 土地利用组合模式

Table 5 The assumption for land use combination

序号 Number	植被组合模式 Combination land use mode	SWAT 代号 SWAT Code	流域面积比例/% Percentage for whole basin	优势植物 Dominant land use
1	林地	FRSD	100	祁连圆柏、青海云杉、红桦和青杨
2	灌木林地	RNGB	100	绣线菊、青海杜鹃、高山柳和金露梅
3	草地	SPAS	100	小蒿草
4	林地	FRSD	54.8	祁连圆柏、青海云杉、红桦和青杨
	草地	SPAS	45.2	小蒿草
5	林地	FRSD	54.8	祁连圆柏、青海云杉、红桦和青杨
	灌木	RNGB	45.2	绣线菊、青海杜鹃、高山柳和金露梅
6	灌木	RNGB	45.2	绣线菊、青海杜鹃、高山柳和金露梅
	草地	SPAS	54.8	小蒿草
7	草地	SPAS	54.8	小蒿草
	未利用土地	URLD	45.2	黑土滩、裸岩、裸土

表 6 不同植被模式下水量平衡分析/mm

Table 6 Water balance for different land use mode/mm

下垫面条件 Land cover	降水 Precipitation	总蒸发 Whole evaporation	出山径流 Runoff	土壤水含量 Soil moisture	渗漏量 Infiltration
现状	432.90	243.48	184.78	2.82	2.01
FRSD	432.90	243.51	183.79	3.92	2.09
RNGB	432.90	244.50	183.63	3.05	2.08
SPAS	432.90	244.88	183.51	2.83	2.00
URLD	432.90	239.15	188.92	2.64	1.52
F + S	432.90	244.12	183.68	3.43	2.03
F + R	432.90	243.96	183.78	3.49	2.08
R + S	432.90	244.66	183.66	2.91	2.05
U + S	432.90	241.65	186.49	2.72	1.82

F: 有林地; R: 灌木林地; S: 草地, FR: 有林地 + 草地, FS: 有林地 + 草地, RS: 灌木林地 + 草地; SU: 草地 + 未利用土地

(3) 不同植被模式对于流域土壤水含量贡献度不同。良好植被模式中: 林地植被能够有效增加流域土壤水分含量, 减小流域水分蓄变量; 草地由于其根系密集在土层表面形成致密的弱透水层而不利用土壤水分的增加。

(4) 人类活动对于自然植被的破坏, 附加于流域水量收支平衡之上的规律是减小流域总蒸散发量和土壤水含量, 增加了流域出山径流和流域水分蓄变量。从水文循环的长序列周期看, 不利于加强局地的流域水循环, 为流域水资源的可持续供给带来灾害。

(5) 由于本研究土地利用组合模式的构建是通过 GIS 斑块转变而来的, 林地、灌木林地和草地的出山径流逐渐减少, 然而减小的幅度不太明显, 同时, 复合植被模式之间的差异在 9.6% 之间, 因此复合植被模式的出山径流是三种植被的耦合的结果, 其出山径流量介于林地和草地之间。同时, U + S 复合植被模式主要以草地类型为主占该模式 54.8%, 因此对蒸散发的贡献主要是草地的蒸散发过程。

### 3.2 基于 GIS 的微地形尺度的植被组合模式下的水文响应特征分析

根据 SWAT 模型, 按照子流域划分阈值 400hm<sup>2</sup> 进行杂木河流域子流域划分(图 3), 按照不同植被组合模式进行径流和蒸散发模拟。基于 GIS 地形分析技术和空间分析手段, 统计分析不同地形条件下水文效应如表

7 所示。

表 7 不同植被模式下水文效应与立地因子关系表

Table 7 The relation between terrain and water response of different land use mode

海拔/m Altitude	景观结构 Land use	水文因子 Hydrological factor/mm	坡度 Slope degree gradient/(°)						平均 Average	
			19.37—25	25—30	30—35	35—40	40—45	45—67.9		
2220—2600	XZ	ET	—	—	—	—	229.28	231.85	230.56	
		WYLD	—	—	—	—	199.71	196.62	198.16	
	F	ET	—	—	—	—	228.06	230.69	229.38	
		WYLD	—	—	—	—	199.88	196.18	198.03	
	R	ET	—	—	—	—	229.14	231.95	230.54	
		WYLD	—	—	—	—	199.83	196.12	197.98	
	S	ET	—	—	—	—	229.67	232.51	231.09	
		WYLD	—	—	—	—	199.66	195.94	197.80	
	FS	ET	—	—	—	—	229.11	231.77	230.44	
		WYLD	—	—	—	—	199.69	196.03	197.86	
	FR	ET	—	—	—	—	228.73	231.44	230.08	
		WYLD	—	—	—	—	199.85	196.14	198.00	
	RS	ET	—	—	—	—	229.34	232.16	230.75	
		WYLD	—	—	—	—	199.76	196.06	197.91	
	SU	ET	—	—	—	—	225.93	228.69	227.31	
		WYLD	—	—	—	—	203.21	199.48	201.34	
	2601—3000	XZ	ET	—	229.28	233.83	238.99	233.26	233.40	233.75
			WYLD	—	199.69	195.45	190.39	196.00	195.10	195.33
F		ET	—	228.13	232.01	238.30	231.88	232.02	232.47	
		WYLD	—	199.81	196.12	190.13	196.24	195.15	195.49	
R		ET	—	229.20	233.01	239.18	232.88	233.27	233.51	
		WYLD	—	199.76	196.06	190.04	196.17	195.08	195.42	
S		ET	—	229.75	233.52	239.66	233.40	233.82	234.03	
		WYLD	—	199.58	195.85	189.78	195.97	194.87	195.21	
FS		ET	—	229.19	233.31	239.24	232.86	232.99	233.52	
		WYLD	—	199.35	195.64	189.91	196.04	194.91	195.17	
FR		ET	—	228.58	232.96	238.76	232.50	232.51	233.06	
		WYLD	—	199.79	195.79	190.23	196.20	195.22	195.44	
RS		ET	—	229.52	233.49	239.18	233.08	233.45	233.74	
		WYLD	—	199.66	195.68	190.09	196.08	195.07	195.32	
SU		ET	—	227.23	229.88	235.26	229.73	230.76	230.57	
		WYLD	—	201.84	199.17	193.83	199.36	197.70	198.38	
3001—3500		XZ	ET	—	246.43	244.58	242.84	243.90	244.92	244.53
			WYLD	—	183.02	184.80	186.43	185.49	184.49	184.84
	F	ET	—	245.51	243.40	241.69	243.15	244.01	243.55	
		WYLD	—	183.27	185.28	186.75	185.52	184.69	185.10	
	R	ET	—	246.26	244.19	242.53	243.94	244.79	244.34	
		WYLD	—	183.14	185.15	186.64	185.39	184.57	184.98	
S	ET	—	246.69	244.64	242.97	244.40	245.24	244.79		
WYLD	—	182.82	184.84	186.37	185.08	184.25	184.67			
3001—3500	FS	ET	—	245.97	243.76	242.06	243.27	244.39	243.89	
		WYLD	—	183.10	185.33	186.76	185.68	184.60	185.09	

续表

海拔/m Altitude	景观结构 Land use	水文因子 Hydrological factor/mm	坡度 Slope degree gradient/(°)						平均 Average
			19.37—25	25—30	30—35	35—40	40—45	45—67.9	
3501—3800	FR	ET	—	245.80	243.93	242.00	243.19	244.29	243.84
		WYLD	—	183.22	185.10	186.74	185.71	184.65	185.08
	RS	ET	—	246.52	244.52	242.79	244.00	245.08	244.58
		WYLD	—	182.94	184.89	186.47	185.42	184.36	184.82
	SU	ET	—	244.04	241.26	240.55	241.86	242.88	242.12
		WYLD	—	185.22	187.85	188.54	187.42	186.41	187.09
	XZ	ET	—	246.65	246.69	245.26	245.58	244.73	245.78
		WYLD	—	182.80	182.77	183.68	182.99	184.16	183.28
	F	ET	—	245.65	245.68	245.77	245.84	245.77	245.74
		WYLD	—	183.12	182.94	182.49	182.06	182.34	182.59
	R	ET	—	246.40	246.45	246.59	246.72	246.62	246.56
		WYLD	—	182.99	182.80	182.36	181.93	182.21	182.46
	S	ET	—	246.86	246.88	246.98	247.06	246.98	246.95
		WYLD	—	182.64	182.49	182.11	181.75	181.99	182.19
	FS	ET	—	246.28	246.40	246.43	246.60	246.25	246.39
		WYLD	—	182.87	182.66	182.21	181.86	182.17	182.35
	FR	ET	—	246.04	246.11	246.17	246.38	246.09	246.16
		WYLD	—	183.05	182.95	182.52	181.98	182.37	182.57
	RS	ET	—	246.62	246.59	246.73	246.84	246.83	246.72
		WYLD	—	182.82	182.77	182.36	181.87	182.14	182.39
SU	ET	—	243.08	242.60	243.03	242.59	244.24	243.11	
	WYLD	—	186.11	186.52	185.79	185.88	184.57	185.77	
3801—4389	XZ	ET	291.67	246.21	243.74	244.25	243.85	243.03	252.12
		WYLD	125.07	183.08	183.14	182.67	183.09	183.63	173.45
	F	ET	289.56	245.84	246.33	246.34	246.33	246.36	253.46
		WYLD	126.03	182.31	179.54	179.44	179.51	179.34	171.03
	R	ET	290.81	246.68	247.50	247.52	247.50	247.55	254.59
		WYLD	125.72	182.17	179.44	179.34	179.41	179.25	170.89
	S	ET	291.76	247.07	247.60	247.61	247.60	247.63	254.88
		WYLD	125.00	181.93	179.60	179.53	179.59	179.44	170.85
	FS	ET	291.09	246.71	246.87	246.84	246.80	246.73	254.17
		WYLD	125.31	181.90	179.48	179.54	179.49	179.28	170.84
	FR	ET	290.43	246.35	246.77	246.78	246.71	246.65	253.95
		WYLD	125.82	182.41	179.49	179.55	179.54	179.31	171.02
	RS	ET	291.10	246.70	247.50	247.53	247.51	247.55	254.65
		WYLD	125.50	182.36	179.61	179.61	179.65	179.47	171.03
	SU	ET	289.36	241.79	244.54	244.66	244.89	245.47	251.78
		WYLD	127.93	186.78	182.39	182.45	182.18	181.43	173.86

WYLD: 流域产水量; ET: 流域潜在蒸散发; XZ: 流域现状土地利用格局; F: 有林地; R: 灌木林地; S: 草地, FR: 有林地 + 草地, FS: 有林地 + 草地, RS: 灌木林地 + 草地; SU: 草地 + 未利用土地

分析表明,各种景观类型的水文效应随着海拔高度变化基本一致,径流深随着海拔高度的增加而减小,蒸散发随着海拔高度的增加而增加。海拔 2600m 以下的林地 + 草地和灌木林地 + 草地景观结构其径流深较小。相同气象条件下,随着海拔高度的增高,林地 - 林地 + 灌木林地 - 林地 + 草地 - 林地 - 林地 + 草地的垂直地带植物景观结构其径流深和现状水平基本一致,可以认为是保持现有水源涵养条件下最好的生态环境植

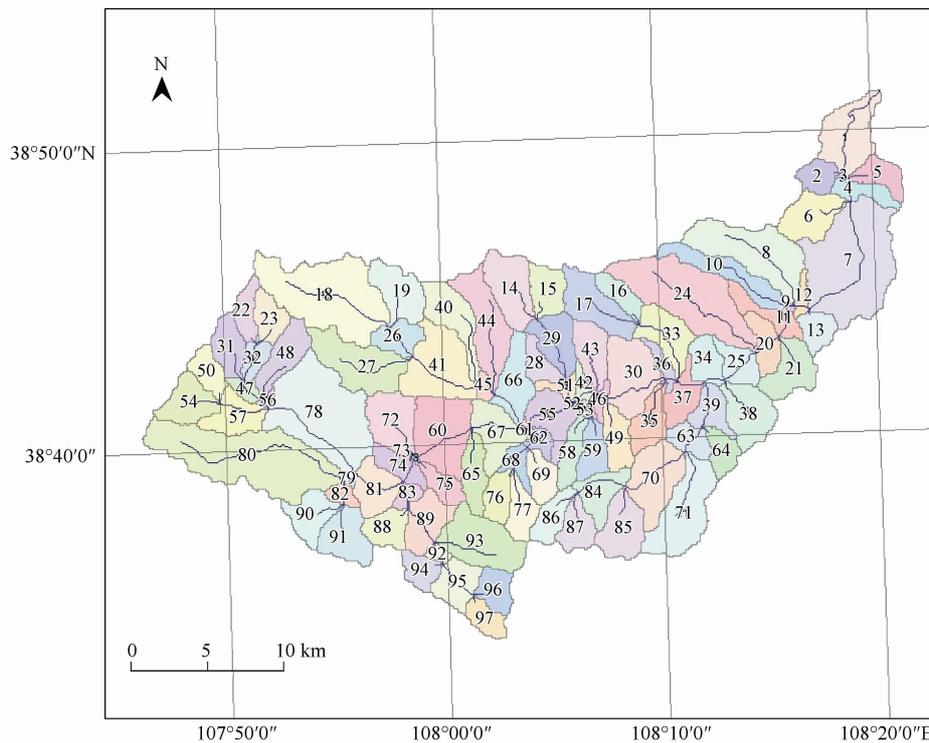


图3 杂木河子流域划分图

Fig.3 Subbasin division for Zamu river basin

图中1,2,3,⋯,97为子流域编号,子流域即水文效应研究的空间尺度

被种植模式。

坡度是影响不同植被组合模式水文效应空间异质性的主要立地因子。自然植被组合模式下的景观结构其径流深在缓坡条件下随着坡度增大而增大,陡坡随着坡度增大而减小,蒸散发随着坡度变化趋势与径流深相反。相同气象条件下,随着坡度的增加,产生较大径流的景观地带分布为林地-林地+草地-林地+灌木林-林地+灌木林地,其蒸散发也高于现状水平,有力加强了局地的水文循环过程。

不同高度分级中,植被组合模式的不同导致在不同坡度条件下水文效应差异显著。坡度低于 $40^{\circ}$ 的区域,其径流量随着坡度的增加而减小,坡度高于 $40^{\circ}$ 时,由于坡度过陡导致降雨直接地表产流增加,出现径流量增大的现象。在高于 $40^{\circ}$ 的坡度条件下,径流量随着坡度的增加而逐渐减小。

### 3.3 祁连山区最佳水源涵养效能植被模式提出

祁连山区最佳水源涵养效能植被模式的选择主要考虑:

(1)水源涵养林地的水源涵养效应主要是通过降低林内蒸发减少水分损失、提高稳定足量的地表径流来加以表现的。因此,本研究主要通过不同立地条件下主要植被类型的蒸发量较小的情况下产生较大的地表径流作为不同立地条件的最优植被组合模式。

(2)水源涵养林的地带性分布。金会军<sup>[18]</sup>等对祁连山水源涵养林的地带性分布做了充分的研究,提出了以青海云杉林作为主要建群种的植物的地带性分布规律,指出海拔2200—3500m的地理范围内存在灌木青海云杉林、苔藓类青海云杉林、马藓蒿类青海云杉林。

(3)主要水源涵养林的水文效应实测资料。党宏忠<sup>[16]</sup>、金会军<sup>[18]</sup>等人对祁连山水源涵养林带的水文效应的研究结果,青海云杉、祁连圆柏、金露梅、绣线菊和小嵩草分别作为林地、灌木和草地的最佳水源涵养林的优势物种。

根据祁连山区降水、气候条件和土壤类型等自然条件,通过对比分析表7不同立地条件下不同植被组合

模式与现状条件下的蒸发和地表径流的相对大小,结合上述3点内容提出提升祁连山区水源涵养能力的生态修复合理种植模式见表8和表9。

表8 不同立地条件下最佳水源涵养植被组合模式

Table 8 The optimal land use mode with best hydrology in different terrain

海拔/m Altitude	坡度 Slope/(°)					
	19.37—25	25—30	30—35	35—40	40—45	45—67.9
2220—2600	—	—	—	—	F、F+R	现状
2601—3000	—	F、F+R	F、R、F+R	现状	F、R、F+R、R+S	F、F+R
3001—3500	—	F、R、F+R	F、F+S、F+R	F、F+S、F+R	F+S、F+R	F、F+R
3501—3800	F、F+S、F+R	F+R	现状	现状	现状	现状
3801—4389	F、R、F+S、F+R、R+S	现状	现状	现状	现状	现状

F: 有林地;R: 灌木林地;S: 草地,F+R: 有林地+草地,F+S: 有林地+草地,R+S: 灌木林地+草地

## 4 结论及讨论

### 4.1 结论

(1)在GIS技术的支持下建立了研究流域的基础空间数据库和属性数据库,实现了分布式水文模型SWAT对河西内陆区水源补给区祁连山系小流域的水文响应模拟研究,模拟精度可靠。

(2)基于SWAT模型的流域尺度的不同植被模式水文效应分析结果表明,祁连山区单一植被模式在水分收支各分支中能够明显加大流域总蒸散发量,减少流域出山径流量,增加流域的水分蓄变量,为水资源的

可持续供给带来时间变异;组合模式明显改善流域水分收支比例,适度减弱流域蒸散发量,增加流域出山径流,为水资源可持续供给提供恒量保证,减弱局地的水资源时间变异程度。

(3)基于SWAT模型的微地形尺度的不同植被模式水文效应分析结果表明,各种景观类型的水文效应随着海拔高度变化基本一致,径流深随着海拔高度的增加而减小,蒸散发随着海拔高度的增加而增加。不同高度分级中,植被组合模式的不同导致在不同坡度条件下水文效应差异显著。

### 4.2 讨论

(1)由于收集数据和资料系列长度的限制,部分参数采用类似流域移植的办法,对最终模拟结果的精度有一定的影响。

(2)对于最佳水源涵养能力植被种类的提出,极大程度参考了东北农业大学在祁连山系微观尺度的植物水文效应的观测研究,亟待进一步建立系统科学的微观尺度植被水文效应现场观测实验。

(3)进行流域水文响应不同植被模式情景模拟时,仅从理论上设置了几种植被组合模式,尚需进行更为细致深入的情景分析,以寻求最佳水源涵养植被模式。

## References:

- [ 1 ] Conway D. Understanding the Hydrological Impacts of Land Cover and Land Use Change. IHDP Update, 2001, (1): 5-6.
- [ 2 ] Chen J F, Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology: Discussing some controversies on forest hydrology. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 474-480.
- [ 3 ] Chen J F, Li X B, Zhang M. Water balance of the SWAT model and its application in the Suomo Basin. Science in China series D: Earth Sciences, 2004, 34(7): 668-674.
- [ 4 ] Hao F H, Chen L Q, Liu C M, Dai D. Impact of Land Use Change on Runoff and Sediment Yield. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(3): 5-8.

- [ 5 ] Chen J F, Li X B. Simulation of hydrological response to land-cover changes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5) :833-836.
- [ 6 ] Stanley A C, Misganow D. Detection of changes in stream flow and floods resulting from climate change fluctuations and land use drainage changes. *Climate Change*, 1996, 32(4) :411-421.
- [ 7 ] Sun G, Riekerk H, Comerford N. Modeling the Hydrologic Impacts of Forest Harvesting on Florida Flatwoods. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34(4) :843-854.
- [ 8 ] Wiberg D A, Strzepek K M. CHARM: A Hydrologic Model for Land Use and Climate Change Studies in China. *International Institute for Applied Systems Analysis Interim report*, 2000, IR-00-072.
- [ 9 ] ZHANG Y H. Development of Study on Model-SWAT and Its Application. *Progress In Geography*, 2005, 24(5) :121-129.
- [ 10 ] Yu G, Xue B, Lai G Y, Gui F, Liu X M. A 200-Year historical modeling of catchment nutrient changes in Taihu basin, China. *Hydrobiologia*, 2007, 581 :79-87.
- [ 11 ] Lai G Y, Yu G, Gui F. Preliminary study on assessment of nutrient transport in the Taihu Basin based on SWAT modeling. *Science in China series D: Earth Sciences*, 2006, 49(1) :135-145.
- [ 12 ] Wang Z G, Liu C M, Huang Y B. The theory of SWAT Model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(1) :79-86.
- [ 13 ] Li D F, Tian Y, Liu C M. Distributed hydrological simulation of the source regions of the Yellow River under environmental changes. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4) :565-573.
- [ 14 ] Zhu X J, Wang Z G, Li J X, Yu L, Wang J G. Application of SWAT model in Zhang wei River Basin. *Progress in Geography*, 2006, 25(5) :105-111.
- [ 15 ] Zhang Y Y, Xia J, Wang G S, Jiang Y, Zhao C S. Research on influence of dams' union dispatch on water quality in Huai River Basin. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(4) :31-35.
- [ 16 ] Dang H Z, Zhou Z F, Zhao Y S, Yang H X. Soil hydrological characteristics of water conservation forest in qilian mountains. *Forest Research*, 2006, 19(1) :39-44.
- [ 17 ] Dong X H, Yu P T, Wang Y H, Wang J Y, Wang S L, Liu X D, Xu L H, Wu X D. The Application of the Distributed Eco-hydrological Model TOPOG in a Mountainous Small Watershed of Temperate Zone: A Case Study in the Small Watershed of Pailugou in Qilian Mountains. *Forest Research*, 2007, 20(4) :477-484.
- [ 18 ] Jin H J, Wang J Y. Role of permafrost and water retaining forests in the mountain runoff // Kang Ersi, Cheng G D, Dong Z C. *Glacier-snow water resources and mountain runoff in the arid area of Northwest China*. Beijing: Science Press, 2002:125-155.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5) :474-480.
- [ 3 ] 陈军锋, 李秀彬, 张明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(7) :668-674.
- [ 4 ] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 戴东. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. *水土保持学报*, 2004, 18(3) :5-8.
- [ 5 ] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究. *应用生态学报*, 2004, 15(5) :833-836.
- [ 9 ] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展. *地理科学进展*, 2005, 24(5) :121-129.
- [ 12 ] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(1) :79-86.
- [ 13 ] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟. *地理学报*, 2004, 59(4) :565-573.
- [ 14 ] 朱新军, 王中根, 李建新, 于磊, 王金贵. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究. *地理科学进展*, 2006, 25(5) :105-111.
- [ 15 ] 张永勇, 夏军, 王刚胜, 蒋艳, 赵长森. 淮河流域闸坝调控对河流水质的影响分析. *武汉大学学报(工学版)*, 2007, 40(4) :31-35.
- [ 16 ] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森, 杨洪学. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究. *林业科学研究*, 2006, 19(1) :39-44.
- [ 17 ] 董晓红, 于澎涛, 王彦辉, 王金叶, 王顺利, 刘贤德, 徐丽宏, 吴旭东. 分布式生态水文模型 TOPOG 在温带山地小流域的应用——以排露沟小流域为例. *林业科学研究*, 2007, 20(4) :477-484.
- [ 18 ] 金会军, 王金叶. 冻土和水源涵养林在径流形成中的作用 // 康尔泗, 程国栋, 董增川. *中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流*. 北京: 科学出版社, 2002:125-155.

# 2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 30 No. 21 2010

**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

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
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

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**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

**订 购** 全国各地邮局  
**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

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**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

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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