

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 2014

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 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松锋,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏,靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

- 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等 (1559)
- 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力, 尹云鹤, 赵东升, 等 (1568)
- 石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英, 李月丛, 吕素青, 等 (1575)
- 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞, 辛晓平, 王 旭, 等 (1587)
- 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕, 李玉环, 李增兵, 等 (1596)

资源与产业生态

- 跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境, 发源于长白山东南部的石乙水, 河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河, 下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河, 并由这里流入日本海, 我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一, 随着我国经济的迅速崛起, 图们江地区进入到多国合作联合开发阶段, 湿地生态系统处于中度预警状态, 并有向重度预警发展的趋势, 生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究, 可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

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

DOI: 10.5846/stxb201304190746

郭军庭, 张志强, 王盛萍, Strauss Peter, 姚安坤. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.

Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, Strauss Peter, Yao A K. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559-1567.

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和 气候变化对径流的影响

郭军庭^{1,2}, 张志强^{1,*}, 王盛萍³, Strauss Peter⁴, 姚安坤¹

(1. 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091;

3. 华北电力大学资源与环境研究院/区域能源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206;

4. Federal Agency for Water Management, Institute for Land and Water Management Research, Pollnbergstrasse 1, A-3252 Petzenkirchen, Austria)

摘要:为定量分析潮河流域土地利用和气候变化对流域径流变化的影响,应用 SWAT 模型对流域上游至下游的大阁、戴营和下水 3 个水文站径流进行模拟,采用情景法分析径流对土地利用和气候变化的响应。在模型校准期和验证期采用两个参数: p 因子和 r 因子来评价模拟的拟合度及不确定性。结果表明,3 个水文站在校准期和验证期的 p 因子值分别为:0.70 和 0.77,0.87 和 0.82,0.92 和 0.78, r 因子值分别为 0.63 和 0.90,0.97 和 0.79,0.88 和 0.92,评价整个流域模拟有效性的模型目标函数 g 最佳值为 0.66,说明该模型对潮河流域的产水量模拟具有很好的适用性。以 1981—1990 年为基准期,1991—2000 年流域土地利用变化造成年径流量减少了 4.10 mm,而气候变化导致年径流增加了 29.68 mm;2001—2009 年土地利用变化造成年径流量减少 2.98 mm,气候变化造成年径流量减少了 14.30 mm。与 1999 年土地利用条件模拟径流值相比,几种极端情景法模拟分析结果表明:灌木林地情景下年径流增加了 158.2%,草地情景下年径流增加了 4.1%,林地和耕地情景下年径流分别减少 23.7% 和 41.7%;不同气候变异情景模拟结果显示,径流对降水的变化敏感性高于对温度变化的敏感性,降水每增加 10%,径流平均增加 23.9%。温度每增加 12%,径流平均减少 6%。因此,在气候变化背景下,优化土地利用结构与方式是实现流域水资源科学管理的途径之一。

关键词:土地利用变化;气候变化;产水量变化;SWAT 模型;潮河流域

Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China

GUO Junting^{1,2}, ZHANG Zhiqiang^{1,*}, WANG Shengping³, STRAUSS Peter⁴, YAO Ankun¹

1 Key Laboratory Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China

2 Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 10091, China

3 North China Electric Power University, Beijing 102206, China

4 Federal Agency for Water Management, Institute for Land and Water Management Research, Pollnbergstrasse 1, A-3252 Petzenkirchen, Austria

Abstract: Global warming and intensive changes in land use/cover have posted unprecedented impacts on the watershed hydrology and thus the water security at the global scale. To quantitatively analyze the impacts of land use change and climate variability on the streamflow of Chaohe Watershed located in North China, we calibrated and validated a distributed hydrological model-SWAT by using the multi-site calibration procedure. The effects of land use changes and climate variability on the stream of the watershed were then explored by using scenario analysis approach. Two indices, the p -factor,

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201204102)资助

收稿日期:2013-04-19; 修订日期:2013-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

r -factor as well as efficiency of objective function, were used to assess the calibration/uncertainty performance of the SWAT model at the hydrological stations of Dage, Daiying and Xiahui within the research watershed. Results showed that p -factors in the calibration and validation periods were 0.70 and 0.77, 0.87 and 0.82, 0.92 and 0.78 respectively for the three stations. The r -factors in the calibration and validation periods were 0.63 and 0.90, 0.97 and 0.79, 0.88 and 0.92 respectively for the three stations. The objective function of efficiency of SWAT was 0.66, suggesting that the model was capable for simulating runoff responses to changes of land use and climate variability in the watershed. Compared with the baseline period (1981—1990), land use change caused an annual streamflow reduction of 4.1 mm whereas climate change gave rise to an annual streamflow reduction of 29.7 mm in the period from 1991 to 2000. For the period of 2001—2009 land use change reduced runoff by 3.0 mm, whereas climate change decreased runoff for 14.3 mm. When the land use in 1999 was set as the reference, the annual streamflow would increase by 158.2% and 4.1% for the shrub land scenario and the grassland scenario, respectively. Contrarily, the farmland scenario and the woodland scenario could induce 41.7% and 23.7% annual streamflow reductions, respectively. The climate variability scenario analysis indicated that a 10% increase in annual precipitation could lead to 23.9% annual streamflow increase and a 12% increase in annual mean air temperature could lead to a 6% reduction in annual streamflow. We, therefore, concluded that the annual streamflow variation was more sensitive to precipitation than to temperature in the region. It is of critical importance to develop explicitly integrated “cause-effect” land use planning and strategies for adaptive land and water management at watershed scale under the global change.

Key Words: land use change; climate change; runoff change; SWAT model; Chaohe Watershed

气候与土地利用变化对流域水文水资源的影响是适应性流域管理的重要基础^[1-2]。评价气候变化,特别是降水变化对水资源及水循环的影响非常迫切,研究结果对未来水资源规划和开发利用具有重要意义^[3]。相对于气候变化的长期性特点,土地利用和覆被变化是短期内流域水文变化的主要驱动因素之一。它通过影响冠层截流、地表入渗、蒸散发和地表径流等,对流域水文循环产生作用。目前定量分析二者对流域径流的影响多采用对比流域试验、统计分析和模型模拟等方法^[4]。对比流域试验不能应用于地质地貌等存在显著空间差异的中大尺度流域,且其重点在于考察流域土地利用变化对流域水文的影响^[5]。统计方法可以用来分析水文气象数据的变化趋势,但不能考虑流域空间异质性以及土地利用和气候变化对流域水文的作用机理。因此,基于物理过程的分布式水文模型近来被广泛用于评价气候变异和土地利用变化的水文响应^[6-7]。其优点在于模型既考虑了流域的空间异质性,同时也对流域水文过程物理过程进行刻画,可以描述流域确定时间范围内土地利用变化后的长期影响,并进行连续模拟,因此适用于空间特征差异较大的流域。

在全球气候变化背景下,华北地区 1951—2009 年间多年平均降水量呈现减少趋势,近 59 年间减少

了 26.8 mm^[8],在 2040 年之前仍可能呈现减少趋势^[9]。该地区的密云水库上游潮河流域 1961—2009 年间年和汛期(6—9 月)降水量呈减少趋势但不显著,而非汛期降水量显著增加并于 1979 年发生突变,即年际降水变化趋势不明显,但年内降水变率减小^[4]。潮河流域作为北京市主要地表饮用水源供应地之一,从 20 世纪 80 年代开始,开展了国家“三北”防护林重点建设工程、国家级水土流失重点治理工程和京津风沙源区防沙治沙项目等。大规模的退耕还林还草等生态措施被用来治理水土流失和改善水质。同时,随着经济发展,人口增加,城镇化速度加快,流域内建设用地迅速增加。流域土地利用和覆被发生变化进而改变该流域下垫面产流环境。因此,潮河流域内气候和土地利用都发生变化的情况下,定量评价二者对流域产水量的影响,是评价前期生态治理措施并为后续措施调整及科学开展流域治理的重要基础和前提^[10-11]。在该流域业已开展的相关研究采用不同的方法,包括经验回归模型^[4,12],集总式模型^[13],以及分布式模型^[1,14],分析了气候和人类活动引起的土地利用变化对流域产水量的影响。各研究尽管方法不同,但研究结果指出人类活动主导的土地利用变化是驱动流域产水量变化的主要因素之一。但是,目前该流域内缺乏对单一土地利用

类型以及潜在气候变化对产流影响的定量研究。

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部开发的分布式水文模型,被广泛应用于流域尺度各种土地管理措施及气候变化对流域水文影响的模拟和预测^[6, 7, 15-19]。本文的目的在基于 SWAT 水文模型,建立潮河流域分布式水文模拟系统,通过模拟径流对气候和土地利用变化的响应,定量分析不同时期二者对流域产流的影响,并进一步分析单一土地利用类型对产水量的影响,以及分析不同气候变化情景对产水量的影响,为应对气候变化和水资源短缺的适应性流域管理和水资源规划提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究中潮河流域是指密云水库以上潮河流域部分(不包括牯牛河、安达木河和清水河等二级支流),总面积 4 855.9 km²,占密云水库以上集水流域面积的 31%。流域位于华北土石山区(116°10'—117°35'E,40°35'—41°37'N),流域地势西北高,东南低,以低山和中山为主,山地面积约占总面积 80%以上(图 1)。流域气候类型属于中温带向暖温带及半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候,多年平均气温为 8.3 ℃,多年平均降水量为 511 mm,汛期(6—9月)占年降水量的 75%以上。汛期多以暴雨形式出现,土壤侵蚀严重,山区多年平均土壤侵蚀总量(轻度以上)为 2 174 万 t,土壤平均侵蚀模数为 2682 t km⁻² a⁻¹,多发生于上游河谷阶地黄土覆盖区^[20]。流域内土壤类型以棕壤和褐土为主,占总面积的 80%以上。

根据我国土地利用现状分类标准(GB-T21010—2007),将流域内土地利用类型分为耕地、草地、灌木

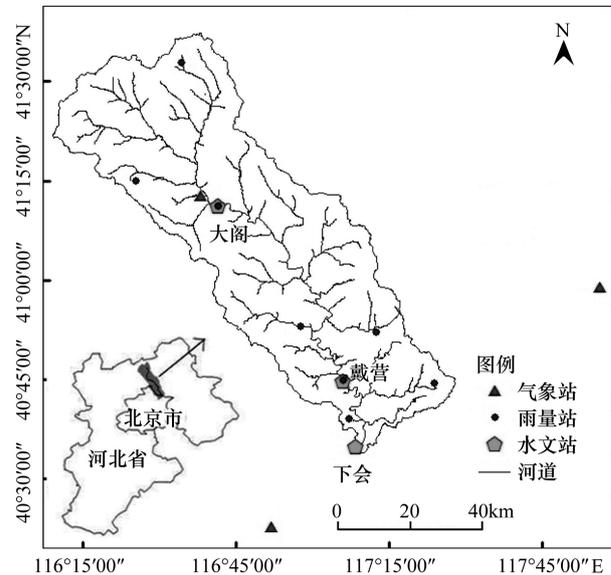


图 1 潮河流域位置图

Fig.1 Location of Chaohe Watershed

林地、有林地、城乡建设用地、水域和未利用地 7 类;潮河流域主要的土地利用类型为耕地、草地、灌木林和有林地,四者占流域总面积 95%以上(表 1)。与 1987 年相比,1999 年耕地面积增加了 6.1%,草地面积减少 26.5%,有林地面积增加 23.57%,灌木林地增加 7.73%。从 1999 年到 2009 年,草地面积大幅减少了 45.9%,耕地减少 31.91%,而有林地和灌木林地分别增加了 27.96%和 17.8%。潮河流域土地利用变化结果表明:耕地和草地面积减少,有林地和灌木林地面积增加。20 世纪 70 年代末期流域修建了一些塘坝和小水库,由于设计不合理及缺乏经费维持,到 80 年代中后期塘坝等逐步废弃。从 20 世纪 80 年代末开始,流域所处地区先后实施了大量水土保持工程,主要采取以植被恢复为主的生物措施。工程措施主要是水平梯田和谷坊,但所占面积相对较小。截至 2005 年底,流域内累计水土保持措施面积为

表 1 潮河流域不同时期土地利用对比

Table 1 Comparison of land use between different periods in Chaohe watershed

	年份 Year	耕地 Farmland	草地 Grassland	水域 Water body	未利用地 Bare land	灌木林 Shrubland	建筑用地 Building land	有林地 Forest land
面积 Area/km ²	1987	424.14	1621.75	53.62	13.59	1598.11	31.06	1113.60
	1999	450.02	1191.98	59.83	15.58	1721.60	40.82	1376.03
	2009	306.41	644.83	55.17	13.05	2028.01	47.68	1760.71
面积变化率 Area change/%	1987—1999	6.10	-26.50	11.58	14.64	7.73	31.45	23.57
	1999—2009	-31.91	-45.90	-7.79	-16.22	17.80	16.81	27.96

2735.69 km²,其中植被恢复面积 2678.47 km²,修建水平梯田 57.27 km²[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 SWAT 模型数据输入及运行

本研究采用 ArcGIS9.3 环境下的 Arc-SWAT2005 版本。模型输入数据主要包括:从国际科学数据服务平台获取的流域 ASTAR 数字高程模型数据 (Digital Elevation Model, DEM),空间分辨率为 30 m;1987,1999 和 2009 年 3 期 Landsat TM 多波段遥感影像数据,空间分辨率为 30 m。通过校正后,选用接近地表真实情景的 7/4/2 波段假彩色合成,根据土地利用现状分类标准,采用人机交互进行图像解译。土壤数据由联合国粮农组织提供的全球土壤分布图库获取,分辨率为 100 m。使用 ArcGIS 将土地利用图和土壤分布图转换为与 DEM 具有相同投影坐标信息以及栅格大小的数据,则 SWAT 模型运算的空间分辨率统一为 30 m。SWAT 模型根据 DEM、土地利用和土壤数据将整个流域划分为若干个子流域。大阁、戴营和下会 3 个水文站 1981—2009 年的径流数据以及流域内 8 个雨量站的数据分别由河北水文水资源局和北京水文总站提供。密云、丰宁和承德 3 个气象站的气象数据由国家气象局提供,包括 1961—2009 年的日降水,气温,风速,相对湿度和太阳辐射。将距离子流域形心最近的气象站的数据赋予该流域,实现气象数据由点及面的空间插值。SWAT 模型自带天气发生器 (WXGEN) 可以用来生成气候数据,并且填补缺失数据。本文构建 WXGEN 所需的参数是通过近 40 年的气象数据统计获得多年逐月气象资料,主要包括月日均降水量、月日均最高和最低气温、月日均太阳辐射总量、月日均露点温度、月日均风速等。本研究中采用 SWAT 官方提供的统计软件 pcpSTAT 及 dew02 软件对气象资料进行统计,求算以上参数。

1.2.2 模型校准和验证

本文分别选择位于流域上中下游的大阁、戴营和下会 3 个水文站,代表流域内不同空间特征,采用多站校准检验的方法,以月为模拟步长,对流域 1981—1991 年的月径流进行模拟,将 1981—1982 年作为模型预热期,1983—1986 年为模型校准期,1987—1991 年为模型验证期,最后确定模型参数值。首先用 LH-OAT 采样法[20],进行参数敏感性分析,选

取对模拟结果灵敏度大的参数进行校准和验证。应用 SUFI-2 算法[7, 21-22]进行迭代运算,模拟过程中所有不确定性因素(参数,模型概念,数据输入等)统一用参数的不确定性表示,将参数不确定性能够对所有不确定性因素解释的程度定义为 p 因子,即 95% 预测不确定性 (95% Prediction Uncertainty, 95PPU) 包含观测数据的比例。95PPU 的计算是采用拉丁抽样法选取累积频率位于 2.5% 与 97.5% 之间的模拟值,剔除了 5% 极坏模拟;95PPU 的平均厚度除以观测值的标准偏差定义为 r 因子。 p 取值介于 0 到 100%, r 介于 0 到无穷大。理论上 p 为 1 且 r 值为 0 代表实测数据和模拟结果完全吻合。由于测量误差和模型的不确定性,理论最佳模拟值很难达到。因此本文中模拟结果同时满足以下两个条件:(1) p 值大于 0.7,即超过 70% 的观测数据落在 95% 的预测不确定性内;(2) r 值小于 1,即 95% 预测不确定性值范围的平均厚度(即不确定性程度)小于观测值的标准偏差[7, 15],则认为模拟结果与实测值相符合。另外,本文进一步采用 Karuse[23] 定义的有效评价方法比较潮河流域月径流模拟值对观测值的有效性:

$$\Phi = \begin{cases} |b|R^2, & |b| \leq 1 \\ |b|^{-1}R^2, & |b| > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, R^2 是模拟值与观测值的决定系数, b 是回归曲线斜率。对于同时模拟流域多个流量观测点,模型目标函数为区域内所有模拟站点的 Φ 的平均值:

$$g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_i \quad (2)$$

式中, g 是模型目标函数最佳值, n 是观测站个数。上述有效性评价中 Φ 值变化范围为 (0,1)。相对于目标函数取纳什系数 (Nash-Sutcliffe) 等函数时,最佳模拟值以及优化过程会受到个别较差模拟值的影响,而该函数值则不受较差模拟值的影响,目标函数最佳值大于 0.6 时认为模拟效果较好[23]。

1.2.3 情景设置与模型分析

当模型校准和验证完成后,应用 SWAT 模型模拟不同时期的土地利用和气候变化下流域出口下会站径流的响应。具体情景设置如表 2,在模拟过程中相应改变植被模块的参数和土壤水力参数:以情景 1 为基准期,将情景 4,5 与其对比,获取土地利用和气候变化二者共同对产流量的影响;将情景 2,3 分别与情景 1 比较,获取气候变化对产流量的影响;再将

情景 4,5 与分别与情景 2,3 比较,获取对应时期土地利用变化对产流量的影响。最终,定量分析不同时期土地利用和气候变化对整个流域产流的影响。

表 2 模型模拟情景设置

Table 2 Scenarios for modeling analysis

情景 Scenarios	土地利用 Land use	气象数据 Meteorological data
1	1987	1981—1990
2	1987	1991—2000
3	1987	2001—2009
4	1999	1991—2000
5	2009	2001—2009

为进一步探讨单一土地利用类型在产流量中所起的作用,剔除土地利用变化中地形、地貌等不确定性因素的影响,采用极端土地利用变化情景模拟进行分析,具体设置为:以 1999 年土地利用现状为基础,保留流域内的居民区和交通建设用地以及水域外,将流域内其它所有土地利用类型依次设置为草地情景、灌木林地情景、林地情景和耕地情景,并分别改变相应的植被模块的参数和土壤水力参数,模拟 1999—2009 年不同土地利用情景下的年径流量。

为探讨气候变异对流域出口产水量的影响,根据未来气候变异的可能范围^[24],给定降水和气温的变化值,设定如下情景:保持现有降水状况不变(多年平均降水 511 mm),增加 10%/20%/30%和减少 10%/20%/30%降水共 7 种方案;采用保持现有温度不变(多年平均气温 8.3 ℃),降低 1 ℃(-12%),升高 1 ℃(12%)/2 ℃(24%)4 种方案,总共有 28 种不同的气候变异组合方案。通过不同的气候变异方案,模拟径流对气候变异的响应。年径流量的变化 b 的求解如下:

$$b = (y_i - y_0) / y_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中, y_i 为第 i 中气候方案下的年均径流量(m^3/s); y_0 为真实情景下的年均径流量(m^3/s)。

2 结果与分析

2.1 模型校准与验证

将研究流域 1987 年的土地利用和 3 个水文站 1981—1986 与 1987—1991 年的水文气象数据代入模型,通过 LH-OAT 采样法选取模型中前 14 位对径流模拟结果敏感性高的参数进行校准和验证。

图 2 为潮河流域月径流模拟结果。在校准期,大阁站 1983 和 1986 年汛期模拟峰值大于实测值,1984 年汛期模拟值小于实测值。 p 和 r 值分别为 0.70 和 0.84,决定系数 R^2 为 0.63。戴营站 1985 年汛期模拟峰值大于实测值,而 1986 年和 1983 年的汛期模拟值与实测值基本吻合, p 值和 r 值分别为 0.87 和 0.97,决定系数 R^2 为 0.68。流域出口下会站汛期峰值模拟与实测值基本吻合, p 值为 0.87, r 值为 0.97,决定系数 R^2 为 0.72。由于模型在运行前期,许多变量,如土壤含水量的初始值为零,会影响模型模拟的结果,所以需要将模拟初期作为模型的预热期,合理估算模型参数的初始值。因此,本文将 1981—1982 年作为预热期,从而减少此类误差的影响。

在验证期,大阁径流模拟变化趋势与观测值一致,模拟峰值却大于观测峰值,相应的 p 值, r 值相分别为 0.77 和 0.90,决定系数 R^2 为 0.71。戴营站 1989 和 1990 年模拟峰值小于观测值,1987 和 1991 年模拟峰值与观测值基本吻合,对应的 p 值为 0.82, r 值为 0.79,决定系数 R^2 为 0.86。下会站的径流模拟峰值在 1987 年和 1990 年比观测值小,在 1989 年和 1991 年模拟峰值大于观测值,在 1988 年模拟峰值与观测值基本一致。该站的验证期的 p 值为 0.78, r 值为 0.82,决定系数 R^2 为 0.82。

运用多站校准验证方法,经过 SUFI-2 法迭代运算,3 个测站的 p 值都大于 0.7, r 值小于 1,模型模拟目标函数 g 最佳值为 0.66,说明该模型在潮河有一定的适用性,可以满足该流域产水量的模拟预测。流域出口下会站敏感参数最佳值如表 3 所示。

2.2 情景模拟

根据情境设置,对潮河流域土地利用和气候变化的径流响应进行定量研究。结果如表 4 所示:情景 1 的年均径流量为 42.18 mm,情景 4 的年均径流量为 67.76 mm,情景 5 的年均径流量为 24.90 mm。根据 1.2.4 中的方法描述,基于情景 1,情景 4 中土地利用变化引起产水量减少了 4.1 mm,而气候变化增加了 29.68 mm 径流量;情景 5 中,土地利用变化造成产水量减少 2.98 mm,气候变化造成产水量减少了 14.3 mm。情境 4 相对于情境 1,流域的林地面积增加了 23.57%(表 1),导致流域蒸散发量增加。同时,该时段内年均降水比情境 1 多,特别是 1994 年和 1998 年潮河流域发生全流域性的大洪水,降水迅速

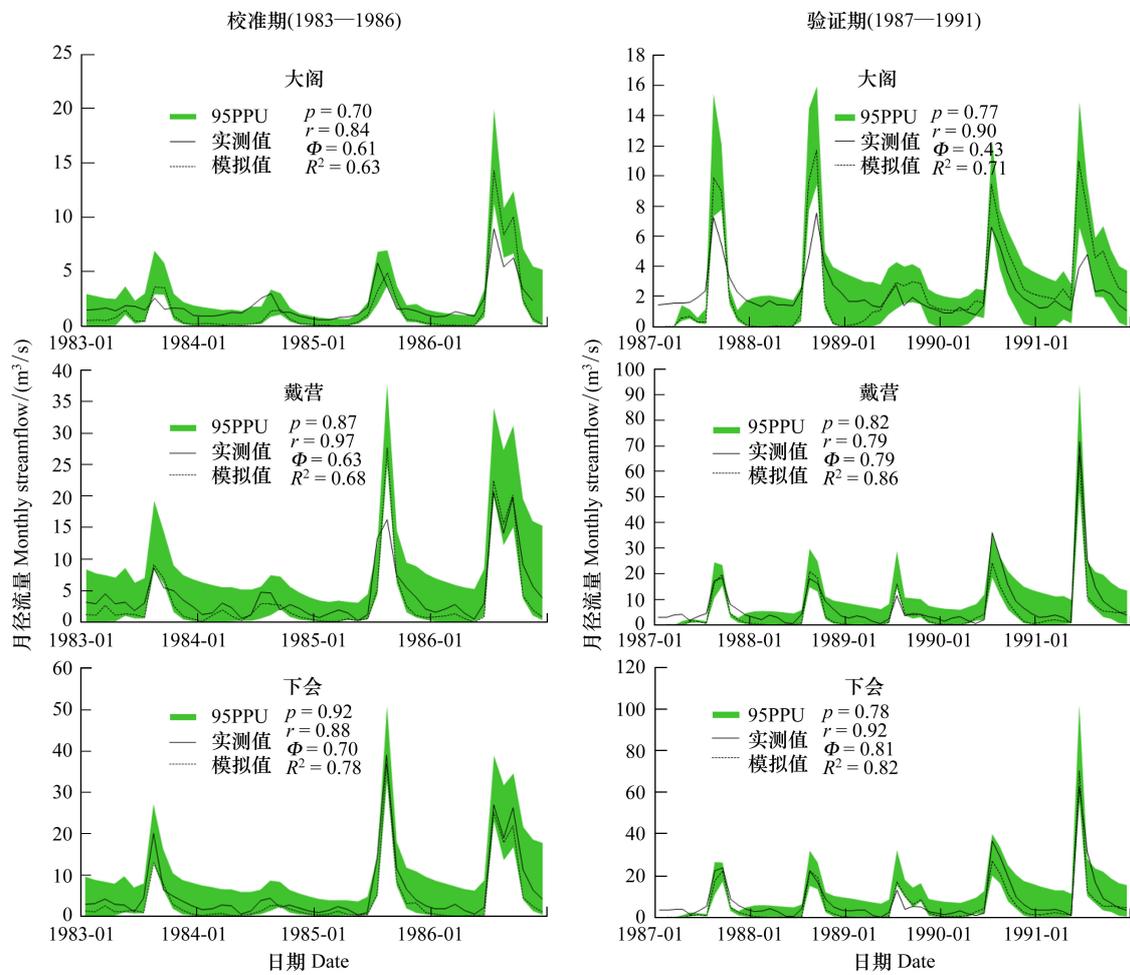


图 2 SWAT 模型对潮河月径流模拟的校准和验证

Fig.2 Calibration and validation of SWAT model for monthly runoff in Chaohe Watershed

表 3 潮河流域下会径流模拟敏感参数最佳值

Table 3 Optimal values of sensitive parameters for runoff in Chaohe watershed

参数名称 Parameter name	参数定义 Parameter defenition	初始值范围 Original value	最佳值 Optimal value	敏感性排序 Sensibility order
v_GWQMN	浅层地下水径流系数	[10, 500]	261.125	1
v_ESCO	土壤蒸发补偿系数	[0.224, 0.574]	0.404	2
r_CN2	SCS 径流曲线系数	[-0.259, -0.075]	-0.214	3
$r_SOL_AWC(1)$	表层土壤可利用的有效水	[0.030, 0.280]	0.258	4
$v_SOL_Z(1)$	表层土壤层的厚度/mm	[0.568, 678.455]	500.510	5
v_CANMX	最大冠层蓄水量/mm	[21.349, 54.742]	52.655	6
v_ALPHA_BF	基流消退系数	[0.028, 0.254]	0.1945	7
v_GW_REVAP	地下水再蒸发系数	[0.124, 0.166]	0.164	8
$v_REVAPMN$	浅层地下水再蒸发系数	[120, 220]	211.250	9
$r_SOL_K(1)$	饱和水力传导系数	[-0.381, 0.276]	0.169	10
v_CH_K2	河道有效水力传导系数	[2, 6]	2.950	11
v_GW_DELAY	地下水滞后系数	[314.188, 439.331]	425.253	12
v_EPCO	植物蒸腾补偿系数	[0.564, 0.745]	0.693	13
v_RCHRG_DP	深蓄水层渗透系数	[0.150, 0.456]	0.276	14

$r_$ 表示参数值被赋予原值的若干倍数, $v_$ 表示为参数值被赋予给定值取代初始值

表 4 潮河流域土地利用和气候变化对径流量影响的模拟结果

Table 4 Simulated response of runoff to land use and climate changes in Chaohe watershed

情景 Scenarios	年均降水 Mean annual precipitation/mm	年均潜在蒸发散 Mean annual PET/mm	模拟年径流量 Simulating annual runoff/mm	土地利用变化 对径流量的影响 Effects of land use change on runoff/mm	气候变化 对径流量的影响 Effects of climate variability on runoff/mm
1	514.0	1088.9	42.18		
4	522.4	1125.7	67.76	-4.1	29.68
5	486.7	1108.2	24.90	-2.98	-14.3

转为地表径流直接流出流域。虽然该阶段的潜在蒸发散也显著增加^[4],但潜在蒸发散和温度等对流域径流的影响较小^[25],所以年径流量增加较大。情境 5 中,林地和灌木林地面积继续增加(表 1),年均降水减少,土地利用和气候变化都减少流域的产水量。因此,在气候变化的背景下,根据水资源管理目标,可以通过流域管理措施的调整,包括对土地利用类型和空间分布等进行调整,减缓气候变化对水资源的负面效果。

以 1999 年土地利用情景下的模拟径流为基准,对比四种不同极端情境下的径流变化情况。其中,灌木林地情景中径流增加了 158.2%,草地情景中径流增加了 4.1%。但是林地情景中径流减少了 23.7%,耕地情景中径流减少 41.7%。结果表明,灌木林地和草地均增加流域径流,从而增加下游流域供水量。

根据表 5 所示,潮河流域降水保持不变,当温度

比现有温度降低 12%(减少 1℃),多年平均径流量增加 4.1%。温度比现有气温升高 12%和 24%,则径流分别减少 6%和 5.9%。温度变化对水文效应有正负作用。随着温度升高,流域内的蒸发增加,在降雨不变情况下,径流减少。当温度升高超过一定水平,蒸发量增加,空气中水汽含量增多,云层增厚进而导致蒸发能力降低。当流域可供蒸发的水量不变,则径流变化只对降水量变化敏感,而对温度的变化不敏感。因此,温度变化对径流的影响较为复杂。流域内年均径流随降水的增多而增多,且径流增加的幅度大于降水的增幅。降水增加 10%,20%,30%,径流分别增加 21.6%,45.5%,71.8%;年均径流随降水的减少而减少,减少的幅度也随降水的逐步减少而减小。另外,年均径流随降水减少的减幅小于随降水增加的增幅。模拟结果表明潮河流域径流对降水的变化更加敏感。

表 5 不同气候变异情景下年均径流深的相对变化/%

Table 5 Relative variation of mean annual runoff depth for different climate scenarios/%

温度 Temperature	降水 Precipitation						
	-30%	-20%	-10%	0	10%	20%	30%
-12%	-56.3	-41.9	-24.5	4.1	16.8	41.5	68.4
0	-52.6	-37.8	-19.3	0.0	21.6	45.5	71.8
12%	-54.6	-40.4	-24.2	-6.0	14.5	37.6	63.4
24%	-53.4	-39.4	-23.5	-5.9	14.1	36.4	61.1

3 讨论

经过 SWAT 模型校准和验证,3 个水文站点的模拟结果同时满足应用的标准,即 p 值大于 0.7, r 值小于 1,并且模拟目标函数 g 最佳值为 0.66。文中 SWAT 模型在构建过程中充分考虑了水文和气象观测站点分布、土地利用类型、土壤和坡度等因素,虽然在 80 年代后期流域内的塘坝和小型水库已逐步

废弃,对模型模拟结果影响较小,但由于数据条件限制,该研究中未将湿地等作为单独土地利用类型而是统一归为水域进行分析;另外,流域内是否有地质灾害如滑坡等发生,都会在一定时间内影响局部水文循环。由于缺乏流域内部水量迁移数据,如灌溉抽水与废水排放等,所以本研究采用流域受干扰较少时期的径流观测数据对后续的数据进行了还原,从一定程度减少上述不确定性的干扰。

同时,数据的不确定性同样会导致模型模拟的不确定性。SWAT模型中基于气象和水文观测站点海拔梯度计算流域平均降水和气温,这在一定程度上消除了站点空间分布的误差。本文选用3个气象站点(丰宁,密云,承德)分别处于流域上下游。每个子流域选取距离其形心距离最近站点的气象数据为用。本文选用8个降水站点,3个气象站点和3个水文观测站点,尽可能增大的观测站点分布密度,提高子流域的数据的准确性,减少数据输入引起的模型不确定性。

该研究对流域分处上中下游的3个水文站产水量进行研究。由于流域空间异质性的存在,每个子流域的具有不同的属性特征。研究流域的上游为黄土覆盖区,土层厚,而中下游流域为土石山区,土层薄。在模拟过程中所有子流域被赋予相同的土壤参数值,这在一定程度上导致上下游站点径流模拟效果存在差异。要辨析环境变化影响以及各种误差来源引起的模拟不确定性,Bormann^[26]提出引入“信号噪声比(signal-to-noise ratio)”的概念,判断环境变化影响效应是否较模拟不确定性显著。因此在后续工作中有必要对模型模拟的不确定性进行进一步探讨验证^[27-28]。本文主要关注流域尺度土地利用和气候变化对产水量的影响,而非强调水文过程对二者变化的响应。因此,根据 p 值, r 值以及 g 值对模拟效果的评价分析,表明本研究中潮河流域SWAT模型模拟的不确定性对模拟结果影响不显著,该模型可以很好的模拟流域的产水量变化,在潮河流域具有一定的适用性。

4 结论

本文应用分布式水文模型(SWAT),通过多站点校准和验证,定量模拟分析潮河流域土地利用和气候变化对产水量的影响,结果表明:

(1)流域内3个水文站校准和验证阶段 p 值分别为:0.70和0.77,0.87和0.82,0.92和0.78, r 值分别为0.63和0.90,0.97和0.79,0.88和0.92。SWAT模型在潮河流域模拟的目标函数最佳值为0.66,说明该模型对潮河流域的产水量模拟具有一定的适用性。

(2)不同时期的土地利用和气候变化对流域产水量的影响不同。与基准期相比,情景4中土地利

用变化引起的产水量减少了4.1 mm,而气候变化增加了29.58 mm径流量;情景5中,土地利用变化造成产水量减少2.98 mm,气候变化造成产水量减少了14.3 mm。在未来流域管理中,可以考虑采取不同的流域管理措施,如调整土地利用结构和面积等,来应对气候变化对流域产水量的影响。

(3)模型模拟结果表明:潮河流域径流量随降水的增加而增大,随气温的增加而减少。潮河流域径流以降水补给为主,当降水增加时,径流量增大。气温升高,蒸发量增加,在降水不变的情况下,径流量减少。

(4)不同土地利用类型产流模拟结果表明:灌木林地情景中径流增加了158.2%,草地情景中径流增加了4.1%。林地和耕地情景下径流减少。因此,潮河流域作为密云水库水源区,未来流域管理过程中,在满足流域内用水需求的同时,通过调整土地利用类型,合理布局,从而增加流域出水量,保证流域下游用水。

References:

- [1] Pang J P, Liu C M, Xu Z X. Impact of land use change on runoff and sediment yield in the Miyun reservoir catchment. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2010, 46(3): 290-299.
- [2] Schuol J, Abbaspour K C, Srinivasan R, Yang H. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1/2): 30-49.
- [3] Tao T, Xin K L, Liu S Q. Summarization of climate changing effect on water resources management. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, 18(6): 7-12.
- [4] Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, Yao A K, Ma S Z. Effects of climate and land use changes on stream flow and sediment yield in Chaohe river basin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 236-243.
- [5] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, Western A W, Vertessy R A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/4): 28-61.
- [6] Lai G Y, Wu D Y, Zhong Y X, Zeng F H, Chen J, Zhang L. Progress in development and applications of SWAT model. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(3): 243-251.
- [7] Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2/4): 413-430.
- [8] Zhang Y C, Wu K, Yu J J, Xia J. Characteristics of precipitation and air temperature variation during 1951—2009 in North China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1930-1941.
- [9] Zhang J Y, Wang G Q. Climate change and sustainable utilization

- of water resources in China. *Hydro-Science and Engineering*, 2009, (4): 17-21.
- [10] Zhang Z Q, Wang S P, Sun G, Zhang M L, Li J L. Response of sediment production to land-use change in Luergou watershed of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1607-1612.
- [11] Liu S Y, Yu X X, Xin Z B, Li Q Y, Li H G, Lei F Y. Effects of land use change on runoff-sediment relationship at watershed in the Loess Hilly Region. *Progress in Geography*, 2010, 29(5): 565-571.
- [12] Li Z J, Li X B, Xu Z M. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961—2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(6): 947-960.
- [13] Sun N, Li X B, Li Z J, Yu X X. Simulation of impacts of changes in land use and cover on annual streamflow in the upper reach of Chaohe River Basin. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(Supp. 2): 22-30.
- [14] Wang S P, Zhang Z Q, Ge S, Strauss P, Guo J T, Yao A K, Tang Y. Assessing hydrological impacts of changes in land use and precipitation in Chaohe watershed using MIKESHE model. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3): 320-325.
- [15] Faramarzi M, Abbaspour K C, Schulin R, Yang H. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 2009, 23(3): 486-501.
- [16] Wang L, Chen X W. Simulation of hydrological effects on vegetation restoration of degraded mountain ecosystem with SWAT model. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(1): 71-75.
- [17] Zhang L P, Qin L L, Hu Z H, Zeng S D. Simulated hydrologic responses to climate change of water source area in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(11): 1261-1271.
- [18] Zhang Y Y, Xia J, Chen J F, Meng D J. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(5): 159-164.
- [19] Zhen J, Li G Y, Han Z Z, Meng G X. Application of modified SWAT model in plain irrigation district. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1): 88-97.
- [20] Ren X S. *Haihe Basin Water Resources Assessment*. Beijing: China Water Power Press, 2007.
- [21] Holvoet K, van Griensven A, Seuntjens P, Vanrolleghem P A. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(8/10): 518-526.
- [22] Abbaspour K C, Johnson C A, van Genuchten A M T. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(4): 1340-1352.
- [23] Krause P, Boyle D P, Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 2005, 5: 89-97.
- [24] Hao L S, Zhang J, Yao X X. Characteristics of extreme temperature change in Hebei Province. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(8): 26-31.
- [25] Jones R N, Chiew F H S, Boughton W C, Zhang L. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(10): 1419-1429.
- [26] Bormann H. Regional hydrological modelling in Benin (West Africa): Uncertainty issues versus scenarios of expected future environmental change. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(8/10): 472-484.
- [27] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2/4): 459-471.
- [28] Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, Xia J, Yang H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2): 1-23.

参考文献:

- [1] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(3): 290-299.
- [3] 陶涛, 信昆仑, 刘遂庆. 全球气候变化对水资源管理影响的研究综述. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(6): 7-12.
- [4] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 姚安坤, 马松增. 气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 236-243.
- [6] 赖格英, 吴敦银, 钟业喜, 曾峰海, 陈洁, 张琨. SWAT 模型的开发与应用进展. *河海大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(3): 243-251.
- [8] 张一驰, 吴凯, 于静洁, 夏军. 华北地区 1951—2009 年气温、降水变化特征. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1930-1941.
- [9] 张建云, 王国庆. 气候变化与中国水资源可持续利用. *水利水运工程学报*, 2009, (4): 17-21.
- [10] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 张满良, 李建芳. 黄土高原吕二沟流域侵蚀产沙对土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1607-1612.
- [11] 刘淑燕, 余新晓, 信忠保, 李庆云, 李海光, 雷凤燕. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响. *地理科学进展*, 2010, 29(5): 565-571.
- [13] 孙宁, 李秀彬, 李子君, 余新晓. 潮河上游土地利用/覆被变化对年径流影响模拟. *北京林业大学学报*, 2008, 30(增刊 2): 22-30.
- [14] 王盛萍, 张志强, Ge S, Strauss P, 郭军庭, 姚安坤, 唐寅. 基于 MIKESHE 模型的潮河流域土地利用与降水变化对水文的影响评价. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 320-325.
- [16] 王林, 陈兴伟. 退化山地生态系统植被恢复水文效应的 SWAT 模拟. *山地学报*, 2008, 26(1): 71-75.
- [17] 张利平, 秦琳琳, 胡志芳, 曾思栋. 南水北调中线工程水源区水文循环过程对气候变化的响应. *水利学报*, 2010, 41(11): 1261-1271.
- [18] 张永勇, 夏军, 陈军锋, 孟德娟. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究. *水力发电学报*, 2010, 29(5): 159-164.
- [19] 郑捷, 李光永, 韩振中, 孟国霞. 改进的 SWAT 模型在平原灌区的应用. *水利学报*, 2011, 42(1): 88-97.
- [20] 任宪韶. *海河流域水资源评价*. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [24] 郝立生, 张婧, 姚学祥. 河北省极值气温变化特征. *气象*, 2010, 36(8): 26-31.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifan, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)
- Resource and Industrial Ecology**
- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 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

本期责任副主编 薛建辉 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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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 王如松
主 管 中国科学技术协会
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

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 WANG Rusong
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 90.00 元