

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第7期 Vol.34 No.7 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 7 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展 何奕忻, 吴 宁, 朱求安, 等 (1615)
- 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等 (1626)

个体与基础生态

- 小兴安岭红松日径向变化及其对气象因子的响应 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 等 (1635)
- 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 等 (1645)
- 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征 白秀梅, 韩有志, 郭汉清 (1654)
- 思茅松天然林树冠结构模型 欧光龙, 肖义发, 王俊峰, 等 (1663)
- 镁缺乏和过量胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐, 黄 翼, 彭良志, 等 (1672)
- 斑块生境中食果鸟类对南方红豆杉种子的取食和传播 李 宁, 王 征, 鲁长虎, 等 (1681)
- 重金属铅与两种淡水藻的相互作用 刘 璐, 闫 浩, 李 诚, 等 (1690)
- 刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构周年变化 姜森颖, 周一兵, 唐伯平, 等 (1698)
- 控(微囊)藻鲢、鳙排泄物光能与生长活性 王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等 (1707)
- 五爪金龙中香豆素类物质含量及其对福寿螺、水稻和稗草的影响 犹昌艳, 杨 宇, 胡 飞, 等 (1716)

种群、群落和生态系统

- 西双版纳国家级自然保护区勐腊子保护区亚洲象种群和栖息地评价 林 柳, 金延飞, 陈德坤, 等 (1725)
- 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化 李 凡, 徐炳庆, 马元庆, 等 (1736)
- 长期不同施肥方式对麦田杂草群落的影响 蒋 敏, 沈明星, 沈新平, 等 (1746)
- 极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程 周 宏, 张恒嘉, 莫 非, 等 (1757)

景观、区域和全球生态

- 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析 林炳青, 陈兴伟, 陈 莹, 等 (1772)
- 近 20 年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征 徐维新, 辛元春, 张 娟, 等 (1781)
- 丽江城市不同区域景观美学 郭先华, 赵千钧, 崔胜辉, 等 (1794)
- 珠三角河网水域栅藻的时空分布特征 王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (1800)
- 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系 王博雯, 汤祥明, 高 光, 等 (1812)
- 遗传算法支持下土地利用空间分形特征尺度域的识别 吴 浩, 李 岩, 史文中, 等 (1822)
- 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应 靳 翔, 徐 庆, 刘世荣, 等 (1831)

基于 ESDA 的西北太平洋柔鱼资源空间热点区域及其变动研究…………… 冯永玖,陈新军,杨铭霞,等 (1841)

城乡与社会生态

基于居民生态认知的非使用价值支付意愿空间分异研究——以三江平原湿地为例……………

…………… 高 琴,敖长林,陈红光,等 (1851)

浑河河水及其沿岸地下水污染特征 …………… 崔 健,都基众,王晓光 (1860)

社会生态系统及脆弱性驱动机制分析 …………… 余中元,李 波,张新时 (1870)

研究简报

等渗 NaCl 和 Ca(NO₃)₂ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 …………… 周 珩,郭世荣,邵慧娟,等 (1880)

专家观点

关于“生态保护和建设”名称和内涵的探讨 …………… 沈国舫 (1891)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 红豆杉人工林——红豆杉为常绿针叶乔木,树高可达 25m,属国家一级保护植物。红豆杉中含有的紫杉醇,具有独特的抗癌机制和较高的抗癌活性,能阻止癌细胞的繁殖、抑制肿瘤细胞的迁移,是世界公认的抗癌药。红豆杉在我国共有 4 个种和 1 个变种,即云南红豆杉、西藏红豆杉、东北红豆杉、中国红豆杉和南方红豆杉(变种)。由于天然红豆杉稀缺,国家严禁采伐利用,因而我国南方很多地方都采取人工种植的方法生产利用。人工种植的南方红豆杉在南方山区多呈斑块状分布,斑块生境中鸟类对红豆杉种子的传播有重要的影响。

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/stxb201304220769

林炳青, 陈兴伟, 陈莹, 刘梅冰. 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1772-1780.

Lin B Q, Chen X W, Chen Y, Liu M B. Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1772-1780.

流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析

林炳青¹, 陈兴伟^{1,2,3,*}, 陈莹^{1,2}, 刘梅冰^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007;

3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007)

摘要: 为了进一步揭示流域景观格局变化的水文效应, 以晋江流域为研究区, 基于 SWAT 模型分别模拟 1985 年和 2006 年两种景观格局下, 2002—2010 年气象条件时的日径流过程; 应用景观格局分析法和 Pearson 相关分析法, 定量分析了景观格局变化对洪枯径流的影响, 探讨了影响机制。研究表明: (1) SWAT 模型能够较精确模拟晋江流域的日径流过程; (2) 2002—2010 年气象条件时, 与 1985 年景观格局相比, 在 2006 年景观格局下晋江流域年平均最大 1 d 和连续最大 5 d 径流深分别增加 5.46% 和 4.97%, 年平均最小 1 d 和连续最小 7 d 径流深分别减少 3.79% 和 2.55%; (3) 洪水径流与景观格局相关性最显著, 最大 1 d 和连续最大 5 d 与林地景观面积呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.764 和 -0.721; 最大 1 d 与 Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀度指数呈显著正相关, 相关系数分别为 0.721 和 0.736; 与最大斑块指数和蔓延度呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.61 和 -0.596, 说明林地景观面积的减少降低了流域对强降水的截留能力; 景观类型均衡化分布, 连通性降低, 降低了水分在流域的内部循环能力, 导致洪峰流量的增加; (4) 景观格局指数与最小 1 d 和连续最小 7 d 的相关性不显著, 说明景观格局变化对枯水径流的直接影响较小。

关键词: 景观格局; 洪枯; 径流; SWAT 模型; 晋江流域

Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model

LIN Bingqing¹, CHEN Xingwei^{1,2,3,*}, CHEN Ying^{1,2}, LIU Meibing^{1,2}

1 College of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

3 Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China

Abstract: The effects of landscape pattern change on hydrological processes have become one of the major ecological concerns in the world. Some researches have been working on the yearly and monthly runoff response to the landscape pattern change based on distributed hydrological model. How the daily runoff, such as flood and low flow, responds to landscape pattern change has not been well studied. The study area of Jinjiang watershed, which is situated at southeastern China, is one of the regions where the economy grow fast and the landscape pattern change dramatically. It is worth to reveal how the change in landscape pattern influences the flood and low flow for the regional ecological security and economic development. In this paper, an integrated approach of distributed hydrological modeling and Pearson correlation analysis was applied to quantify the contributions of the changes of landscape indices on the variation in flood and low flow. Daily stream

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979015); 福建省公益科研院所专项重点项目(2013R04); 2012 年福建省公益科研院所专项(N00298)

收稿日期: 2013-04-22; **修订日期:** 2013-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxwchen215@163.com

flow under the meteorological condition from 2002 to 2010 was simulated with the landscape pattern maps in two periods (1985 and 2006) using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), respectively. The changes of annual maximum 1-day, 5-day, and minimum 1-day, 7-day stream-flow between two simulations were calculated. Finally, the changes of stream-flow were related to the changes of landscape indices in Pearson correlation to quantify the impacts of changes in landscape on that of flood and low flow.

The results show as following: (1) All E_{ns} and R^2 are above 0.75, and E_{rs} are in the range of $\pm 10\%$ in the calibration and validation period for three gauge stations, suggesting SWAT model is well performance. (2) Compared with the landscape in 1985, the annual mean maximum 1-day and 5-day stream flow from 2002 to 2010, which was simulated by SWAT model with the landscape in 2006, increases by 5.46% and 4.97% in the Jinjiang watershed, while the annual mean minimum 1-day and 7-day stream flow decreases by 3.79% and 2.55%, respectively. (3) There are significant correlations between the variation of flood flow and landscape indices. The forestland area is negatively related with annual maximum 1-day and 5-day stream flow with the correlation coefficients of -0.764 and -0.721. The glass area is positively related with annual minimum 1-day and 7-day stream flow with the correlation coefficients of 0.461 and 0.478, respectively. It demonstrates that the increase of forest area can reduce the discharge of flood, while the increase of glass area can increase the discharge of low flow. Furthermore, the relationships between landscape metrics and flood are also revealed. SHDI and SHEI are significantly positively related with maximum 1-day flow with the correlation coefficients of 0.721 and 0.736, respectively. On the other hand, LPI and CONTAG show negative relationships with maximum 1-day flow with the coefficients of -0.61 and -0.596, respectively. The relationships between landscape metrics and flood reveal that equilibrium distribution of landscape classes and low connectivity reduces hydrologic cycle of the basin and eventually leads to the increase of flood flow. (4) Landscape metrics are not significantly related with low flow indicate that the impact of the change in landscape on that of the low flow is not so important.

Key Words: landscape pattern; flood; low flow; SWAT model; Jinjiang watershed

景观格局是由相互作用的生态系统空间镶嵌组成的异质区域,是各种自然因素和人类活动共同作用的结果,而人类活动的影响主要表现为土地利用覆被变化对景观格局演变的驱动^[1]。不同的景观格局改变降水的分配形式、蒸散发和产汇流机制,从而影响了径流量等水文要素的变化^[2-6];目前人类活动水文效应的研究也主要侧重于对径流影响的研究^[7-9]。方法上主要是通过特征参数时间序列法开展相关的研究^[2,9-11],但由于资料时间序列短、观测密度不足,尚难于将景观格局和径流之间建立明确的相关性。研究表明,在相同气象条件下,通过水文模型对过去、现阶段或极端土地覆被情景的径流模拟,可以为研究人类活动对径流的影响提供参考^[12-15]。已有学者采用分布式水文模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型、TOPOG 模型定量分析了景观格局变化的径流效应,结果表明流域景观格局变化对径流具有重要的影响^[16-18]。然而上述

研究大多是分析流域景观面积变化的年、月径流响应,缺少探讨对日径流影响的分析,因此难以将景观格局变化与通常是日时间尺度的洪枯等水文极值事件相结合研究,无法全面揭示水文要素对景观格局变化的响应机制。

晋江流域位于我国东南沿海经济快速增长的泉州市,是福建省土地利用变化最为剧烈的地区之一,80年代以来大量林草地、耕地向园地和建设用地转化。业已开展的关于晋江流域 SWAT 模型的年、月径流模拟研究,初步揭示了土地覆被变化对流域径流的影响^[19-20],但还未探讨日时间尺度的洪枯径流对景观格局变化的响应机制。因此本文在对流域 1985 年和 2006 年景观格局分析基础上,建立适合该流域日径流模拟的 SWAT 模型,在全流域和子流域尺度上,模拟相同气象条件下,不同景观格局的洪枯径流响应,并探讨其响应机制,以期对晋江流域防灾减灾与生态环境治理提供科学的依据。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

晋江流域位于福建东南沿海,泉州市东南部,处于闽江与九龙江之间,流域面积 5629 km²,占泉州市土地总面积 53.8%。晋江是福建省第 3 大河流,全长 302 km,干流长 182 km,有东溪和西溪两大支流,两溪汇流于南安的双溪口(石砦水文站以上 2.5 km 处)。本研究选取石砦水文站以上的流域为研究区,流域控制面积为 5042 km²(图 1)。地形以西北戴云山脉为主,地势由西北向东南海面倾斜,呈波状起伏梯级分布。土壤类型主要有红壤、黄红壤、黄壤和水稻土。土地利用类型以有林地为主,其次是

园地、耕地和建设用地。流域气候属于南亚热带湿润气候区,平均气温 20—21 ℃,多年平均降水量 1200—1900 mm,降水年内分布不均,主要集中在 5—8 月,约占全年降雨的 60%,夏季多对流性暴雨和台风雨,洪涝灾害较频繁。同时,该区经济发达,人类活动较活跃,流域土地覆被变化也较明显,这些均对径流产生了不同程度的影响。

1.2 数据来源

(1) 空间数据 包括 DEM (Digital Elevation Model)、土壤类型和土地利用数据。流域 DEM 来自于“中国科学院国际科学数据服务平台”,空间分辨率为 30 m^[21]。土壤数据通过对福建省土壤肥料实验站 1:50 万土壤类型图数字化得到,并概化成 11 种主要土壤类型,土壤的水文属性通过美国农业部开发的土壤水特性软件 SPAW (Soil Plant Atmosphere Water) 软件计算得到^[22]。土地利用数据包括 1985 年和 2006 年两土地利用现状图,其中 1985 年的数据来源于中国科学院南京土壤所,2006 年源于 TM 遥感影像解译所得(图 2)。在景观类型提取过程中,参考研究区的文献资料^[23],并结合其土地利用特征,将晋江流域景观类型分为水田、旱地、林地、园地、草地、建设用地、水域和未利用地 8 种类型。

(2) 水文气象数据 包括晋江流域 32 个雨量站点 2001—2010 年日降水量,安溪站和石砦站 2 个水文站点 2001—2010 年日径流量,数据来源于福建省水文资源勘测局;山美水库水文站 2001—2010 年日

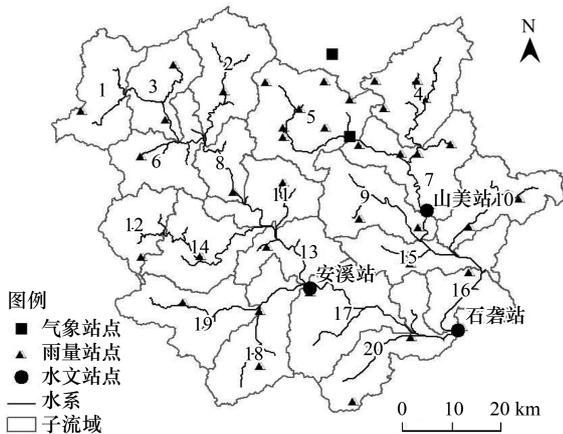


图 1 晋江流域水系图

Fig.1 River system of Jinjiang watershed

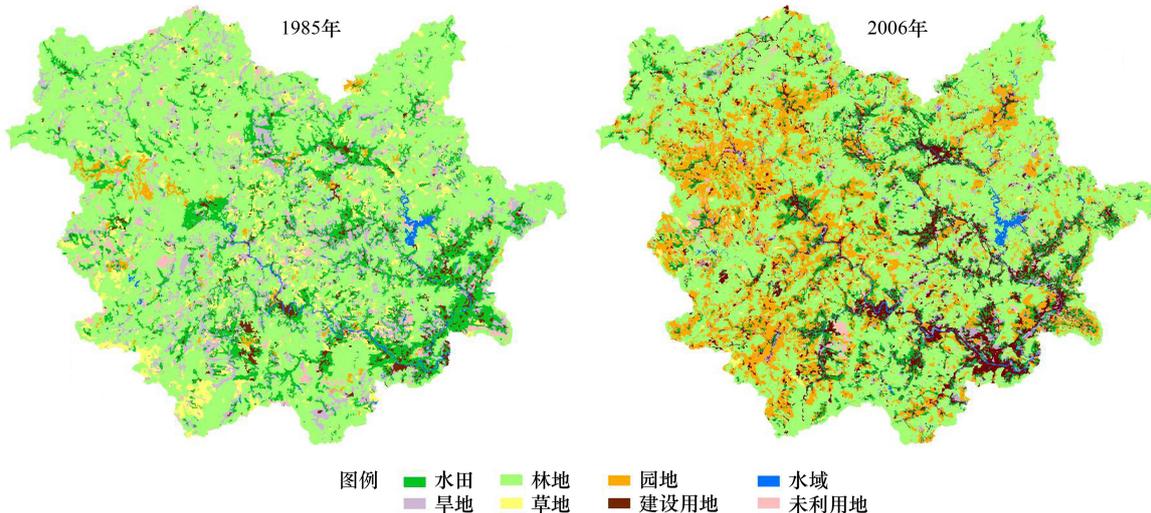


图 2 研究区 1985 年和 2006 年土地利用覆被分布

Fig.2 Land use and land cover maps of study area in 1985, 2006

入库和日出库径流量,数据来源于泉州市山美水库管理局。此外还有永春、德化 2 个气象站点 2001—2010 年数据,包括月平均最高气温、月平均最低气温、太阳辐射、风速、相对湿度等资料,数据来源于福建省气象局。

2 研究方法

2.1 应用日尺度 SWAT 模型模拟径流的空间变化

SWAT 模型是具有较强物理机制的分布式水文模型,它能够用于流域尺度模拟变化环境下的水文响应研究^[20,24],本文选用该模型进行研究区降雨径流模拟。考虑到计算量并兼顾子流域划分的意义,将研究区划分成 20 个子流域。以 2001 年作为模型预热期,2002—2006 年作为率定期,2007—2010 作为验证期,从日时间尺度上对模型进行率定和验证。根据模型自带的 LH-OAT 敏感性分析模块对模型参数进行敏感性分析^[25],确定模型的敏感参数,并进行参数率定。选用 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Ens)、决定系数 (R^2) 和相对误差 (Er) 作为模型的效率评价指标。当这 3 个指标分别达到相应的规定标准,即 $R^2 > 0.6$, $Ens > 0.65$, $Er < 10\%$, 表示模型的模拟精度很高^[26]。运用率定好的模型,固定其他参数不变,选取 2002—2010 年气象条件和 1985 年与 2006 年两种不同土地覆被条件进行模拟,从而得到 1985 年和 2006 年土地覆被条件下,2002—2010 年气象条件时的两组晋江流域逐日径流过程;将两种模拟结果进行比较,以此探讨景观格局变化对洪枯径流的影响。

分别选取年最大 1 d 和连续最大 5 d 径流作为反映洪水径流变化的指标,选取后者主要考虑到本流域洪水过程一般 5 d 左右;枯水径流变化的指标选取通行的年最小 1 d 和连续最小 7 d 径流。对流域 1985 年和 2006 年两种景观格局下,2002—2010 年气象条件时的逐日径流深模拟结果进行统计,计算全流域和 20 个子流域在两种景观格局下 2002—2010 年的洪枯径流变化率,公式为:

$$Q_{i,t} = \frac{Q_{i,t,2006} - Q_{i,t,1985}}{Q_{i,t,1985}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $Q_{i,t}$ 为 t 年 i 类洪枯径流的径流深变化率, $Q_{i,t,2006}$ 为 2006 年景观格局下 t 年 i 类洪枯径流的径流深模拟值, $Q_{i,t,1985}$ 为 1985 年景观格局下 t 年 i 类洪

枯径流的径流深模拟值。

2.2 景观格局变化

利用景观格局指数分析软件 Fragstats,从斑块类型水平和景观水平上分析晋江流域景观格局变化。在前人研究的基础上^[6,27],结合流域特点,选取较常用且意义较为明确的 9 个指标,包括:斑块类型面积 (CA)、斑块个数 (NP)、平均斑块面积 (AREA_MN)、形状指数 (LSI)、面积加权分维数 (FRAC_AM)、Shannon 多样性指数 (SHDI)、Shannon 均匀度指数 (SHEI)、最大斑块指数 (LPI)、蔓延度 (CONTAG),这些指标分别主要反映各景观类型面积、景观破碎化程度、景观形状复杂度、景观均衡性以及景观连通性。统计全流域和 20 个子流域 1985 年和 2006 年两种景观格局的景观格局指数,并分别计算全流域和 20 个子流域 1985—2006 年景观格局的变化率,计算公式为:

$$R_a = \frac{K_{a,2006} - K_{a,1985}}{K_{a,1985}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, R_a 为 a 类景观格局指数变化率, $K_{a,2006}$ 为 2006 年景观格局下 a 类景观格局指数取值, $K_{a,1985}$ 为 1985 年景观格局下 a 类景观格局指数取值。

2.3 径流变化与景观格局变化的相关性分析

应用 Pearson 相关分析法^[28],计算 20 个子流域在两种景观格局下,2002—2010 气象条件时洪枯径流年平均变化率与景观格局指数变化率的相关性,以此来分析景观格局变化对洪枯径流的影响机制。

3 结果与分析

3.1 日径流模型率定结果

通过多站点的方法率定和验证,能更客观真实地率定模型参数^[19],故选取流域现有的 3 个水文站点,即安溪、山美、石碇 3 个水文站点 2002—2007 年的实测日径流资料进行参数率定,2008—2010 年的实测日径流资料进行模型验证。根据模型参数敏感性分析结果,确定出对模型较为敏感的 7 个参数,包括土壤有效含水量 SOL_AWC、深蓄水层渗透系数 RCHRG_DP、径流曲线系数 CN2、浅层地下水再蒸发系数 GWQMN、土壤蒸发补偿系数 ESCO、土壤饱和水导电率 SOL_K、最大冠层截留量 CANMX。根据参数物理意义和研究区实际情况^[29],进行手动调参,以使径流模拟值和实测值相吻合。

3 个站点的模型评价指标如表 1。除了安溪站验证期 Ens 为 0.772, 3 个站点率定期和验证期的 Ens 都超过 0.8, Er 均小于 8%, R^2 也达到了 0.8 以上, 符合规定的标准^[26]; 其中石砬水文站日径流模拟与实

测的比较如图 3 所示, 两者吻合较好。表明模型模拟的结果令人满意, 可以进行景观格局变化对于晋江流域日径流的影响研究。

表 1 3 个水文站日径流的率定和验证结果

Tsble 1 Calibrated and validated results of daily runoff at three hydrologic stations

水文站 Hydrologic station	率定期 Calibration period			验证期 Validation period		
	Ens	$Er/\%$	R^2	Ens	$Er/\%$	R^2
石砬站	0.854	3.12	0.85	0.808	-6.71	0.83
安溪站	0.824	-5.42	0.84	0.772	-7.89	0.82
山美站	0.873	-3.78	0.87	0.868	-4.78	0.87

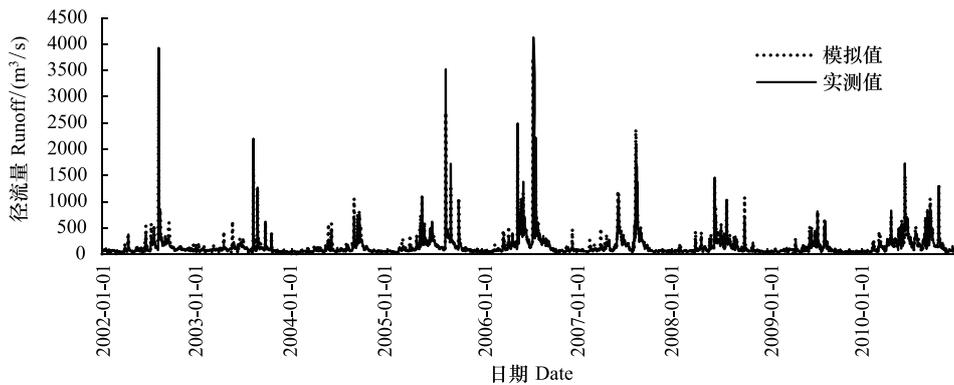


图 3 石砬站日径流量模拟图

Fig.3 Simulated daily runoff in Shilong gauge

3.2 景观格局变化分析

3.2.1 斑块类型面积变化

1985—2006 年晋江流域景观类型面积变化如图 4 所示, 流域发生变化的地类面积占流域面积的 47.31%。园地和建设用地是各类景观要素中变化幅度最大, 面积分别增加 974 km² 和 271.9 km², 增幅

达到 1173.19% 和 227.06%。水田和旱地为主的传统农业用地不断被其他景观类型占用, 面积分别减少 244、360.4 km², 减少幅度为 34.65% 和 69.62%。由于人类活动的干扰, 草地和未利用地向经济林、园地转化过程中, 面积分别减少 298、70.4 km²。林地面积减少量达到 289 km², 但其基数大, 面积减少幅度为 9.34%, 对整个流域的景观格局变化影响较大。水域景观类型面积变化较小。

3.2.2 景观水平上景观指数变化

从表 2 可以看出, 1985—2006 年流域景观斑块数大幅增加, 由 5292 增加到 10829 个; 以此同时, 平均斑块面积由 95.3 hm² 下降到 46.6 hm², 表明流域景观呈破碎化趋势。形状指数和面积加权分维数增加, 表明景观斑块形状的不规则程度增加。最大斑块指数和蔓延度下降, 表明景观斑块连接性更差, 优势斑块类型的连通性降低。此外, Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数提高, 表明景观类型向均衡性方向发展的趋势, 这也是传统农业景观和林地景

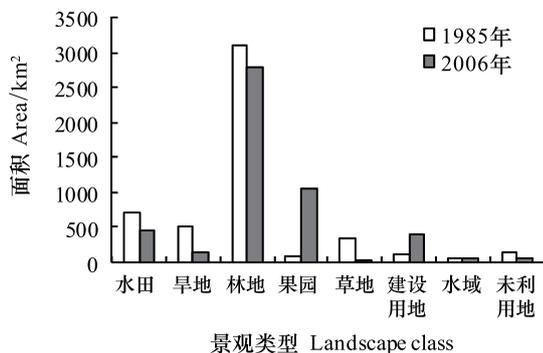


图 4 研究区 1985—2006 年斑块类型面积变化

Fig.4 Area of landscape class change from 1985 to 2006 in study area

观地位不断减低,建设用地和以茶园为主的园地景观地位不断上升,城镇化水平不断提高的反映。

表 2 1985—2006 年研究区景观水平指数变化分析

Table 2 Analysis of landscape metrics in landscape level from 1985 to 2006

景观指数 Landscape metrics	NP	AREA_MN	LSI	FRAC_AM	SHDI	SHEI	LPI	CONTAG
1985	5292	95.3	63.7	1.246	1.29	0.62	30.0	62.6
2006	10829	46.6	84.4	1.256	1.33	0.64	23.8	59.9

CA: 斑块类型面积 Class area; NP: 斑块个数 Number of patches; AREA_MN: 平均斑块面积 Mean patch area; LSI: 形状指数 Landscape shape index; FRAC_AM: 面积加权分维数 Area-weighted mean fractal dimension; SHDI: Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: Shannon 均匀度指数 Shannon's evenness index; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; CONTAG: 蔓延度 Contagion index

3.3 景观格局变化的洪枯径流响应

1985 年和 2006 年两种不同景观格局下, 全流域 2002—2010 年气象条件时的洪枯径流变化率如图 5 所示。与 1985 年景观格局相比, 在 2006 年景观格局下, 流域 9 a 间最大 1 d 和连续最大 5 d 径流深均增加, 最大 1 d 径流深年平均增加 1.85 mm, 连续最大 5 d 径流深年平均增加 4.82 mm; 年平均变化率分别为 5.46%、4.97%, 最大 1 d 增速普遍高于连续最大 5 d。表明相对于 1985 年的景观格局, 晋江流域 2006 年景观格局对于强降水截留能力更低, 容易直接形成地表径流, 进而引起洪水径流的增加。

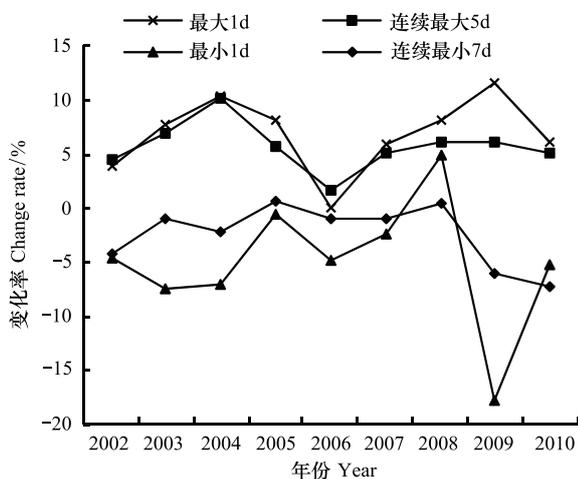


图 5 研究区不同景观格局下洪枯径流变化率的年际变化

Fig.5 The annual change ratio in flood, low flow between two simulations using landscape maps in 1985 and 2006 in study area

对于枯水径流, 在 2006 年景观格局下, 除了 2005 年和 2008 年, 2002—2010 年其他年份全流域最小 1 d 和连续最小 7 d 径流深均小于 1985 年景观格局下的模拟结果。年平均最小 1 d 径流深由 0.151 mm 减少到 0.146 mm, 年平均连续最小 7 d 径流深由 2.185 mm 减少到 2.13 mm; 最小 1 d 减速普遍高于连

续最大 5 d, 年平均变化率分别为 -3.79%、-2.55%。通过对最枯径流前期的降水统计发现, 2005 年和 2008 年最枯径流前期都发生了较强降水, 特别是 2008 年最小 1 d 的前期第 8 天发生了 24.49 mm 的较强降水, 在 2006 年景观格局下较强降水容易直接形成地表径流, 反而有利于最枯径流的增加。表明相对于 2006 年景观格局, 晋江流域 1985 年景观格局的涵养水源、调节河川径流能力更好, 可以增加枯水径流。

3.3.2 典型子流域洪枯径流深变化

全流域水文极值变化是各个子流域水文极值变化叠加的结果。选取 19 号典型子流域进一步分析洪枯径流的变化规律。该子流域面积 281.96 km²。1985—2006 年, 该子流域发生的土地利用变化面积占其总面积的 60.8%, 且以林草地向园地和旱地向园地转换为主, 转换面积分别占子流域面积的 27.71% 和 8.11%, 园地面积也由 3.01 km² 增加到 116.97 km²。也即该子流域的景观类型面积变化率

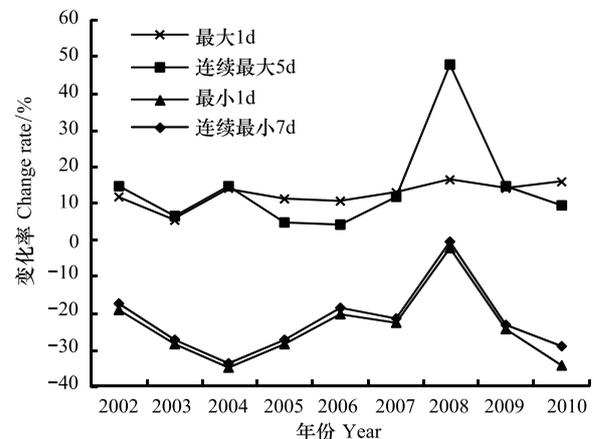


图 6 19 号子流域不同景观格局下洪枯径流变化率的年际变化

Fig.6 The annual change ratio in flood, low flow between two simulations using landscape maps in 1985 and 2006 in no. 19 typical subbasins

大于全流域,且具有涵养水源功能的林草地面积大量减少,而有利于形成地表径流的园地和建设用地面积显著增加。因此由图 6 可以看出,19 号子流域与全流域的洪枯径流响应大致相似,在相同气象条件下,与 1985 年景观格局相比,2006 年景观格局下的洪水径流增加,枯水径流减少,但变化幅度大于全流域。其中,2002—2010 年年平均最大 1 d 和连续最大 5 d 径流深分别增加 11.9% 和 11.38%,年平均最小 1 d 和连续最小 7 d 的径流深分别减少-27.99% 和-25.39%。

3.4 景观格局变化对洪枯径流的影响机制

如前所述,通过统计 20 个子流域各自的景观类型面积变化、景观水平上景观指数变化和洪枯径流变化,应用 Pearson 相关分析法,计算洪枯径流各指标变化率与景观格局指数变化率的相关性,可以定量分析景观格局与洪枯径流间的相互关系,所得结果为表 3。从景观类型面积变化的径流响应看,林地景观面积与最大 1 d、连续最大 5 d 相关性显著 ($P < 0.01$),相关系数分别为-0.764、-0.721,表明林地景观对强降水截留和延长滞留时间具有积极作用,从而起到消减洪峰流量的生态正效应,刘明等^[30]也得到了相一致的结果。水域与最大 1 d、连续最大 5 d 相关性较显著 ($P < 0.05$),相关系数为 0.502、0.515,

水域面积的增加会加速径流的汇流速度,从而导致洪水过程流量的增加。草地与最小 1 d、连续最小 5 d 相关性较显著 ($P < 0.05$),相关系数为 0.461、0.478,表明草地可以提高流域水源的涵养能力,增加枯水径流。

从景观水平上景观指数变化与洪枯径流变化相关性看,景观 Shannon 多样性指数、Shannon 均匀度指数与最大 1 d 相关性显著 ($P < 0.01$),相关性分别达到 0.721、0.736。表明从 1985 年到 2006 年,流域林草地、农业用地景观向园地、建设用地景观转化过程中而引起的景观均衡化分布,导致流域对降水截留能力变差,会引起洪峰流量增加。最大斑块指数和蔓延度与最大 1 d 相关性显著 ($P < 0.01$),相关系数为-0.61、-0.596,最大斑块指数与连续最大 5 d 相关性较显著 ($P < 0.05$),相关系数为-0.472。由此表明与 1985 年景观格局相比,晋江流域 2006 年景观连通性变差,物质循环程度也降低,削弱了其对于降水的截留和水源涵养能力,也会增加洪峰流量。另外,斑块个数、平均斑块面积、形状指数和面积加权分维数变化与各径流指标变化都没有显著的相关性,表明流域景观的破碎度和斑块形状复杂度对径流变化影响不大。

表 3 研究区各景观指数变化与洪枯径流变化间的相关性

Table 3 The correlation coefficients between landscape metric changes with flood, low flow changes in study area

		洪水径流 Flood flow		枯水径流 Low flow	
		最大 1d Maximum 1-day	连续最大 5d Maximum 5-day	最小 1d Minimum 1-day	连续最小 7d Minimum 7-day
景观类型	水田 Paddy	0.235	-0.172	0.402	0.192
Landscape class	旱地 Dry farming	-0.262	-0.303	-0.204	0.02
	林地 Forest	-0.764 **	-0.721 **	0.182	0.427
	园地 Plantation	0.321	0.211	0.089	0.061
	草地 Grass	0.201	-0.121	0.461 *	0.478 *
	建设用地 Urban	0.363	0.369	0.03	-0.099
	水域 Water	0.502 *	0.515 *	0.143	0.038
	未利用地 Barren	-0.356	-0.207	0.099	0.141
景观水平	NP	-0.031	-0.068	0.318	0.297
Landscape level	AREA_MN	-0.065	0.048	-0.206	-0.397
	LSI	0.264	0.321	0.272	0.321
	FRAC_AM	-0.435	-0.268	0.24	0.236
	SHDI	0.721 **	0.174	0.174	0.085
	SHEI	0.736 **	0.226	0.134	0.038
	LPI	-0.61 **	-0.472 *	0.095	0.06
	CONTAG	-0.596 **	-0.248	-0.165	-0.151

** 表示相关显著水平为 0.01 (双尾检测), * 表示相关显著水平为 0.05 (双尾检测)

景观格局指数变化与洪水径流变化相关性显著,而与枯水径流变化则不呈显著相关,说明景观格局变化对枯水径流的直接影响较小。这可能是因为枯水径流主要来源与土壤水和地下水,与土壤属性、地质条件关系较密切,受景观格局的直接影响较小。

4 结论

(1) 运用 SWAT 模型模拟晋江流域日径流过程,模拟精度较高,模型可靠,可以定量评估流域景观格局变化对洪枯径流的影响。

(2) 1985—2006 年这 21 a 间,晋江流域景观格局变化较剧烈,园地和建设用地景观面积大幅增加,传统农业农地、林草地景观面积则相应减少。景观呈破碎化、形状复杂化、分布均衡化、连通性变差。

(3) 2002—2010 气象条件时,与 1985 景观格局相比,2006 年景观格局下晋江流域的年平均最大 1 d 和连续最大 5 d 径流深分别增加 5.46%、4.97%,最小 1 d 和连续最小 7 d 径流深分别减少 3.79%、2.55%。表明晋江流域景观格局的变化对于强降水截留能力和涵养水源能力更差,更容易发生洪旱灾害。

(4) 景观格局指数与径流相关性分析结果表明,景观格局变化对洪水径流影响最大,流域林草地、农业景观向园地、建设用地景观转化过程中而引起的景观均衡化分布,降低流域对强降水的截留能力,景观连通性变差,削弱流域内部水循环能力,进而导致洪水径流量的增加;枯水径流主要来源于土壤水和地下水,受景观格局的直接影响较小。

References:

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Wang Y L. Theory and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2001: 120-126.
- [2] Wang L, Xu Y D, Fu B J, Lü Y H. Landscape pattern and eco-hydrological process. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 1238-1246.
- [3] Ludwig J A, Tongway D J, Marsden S G. Stripes, strands or stipples: modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. *Catena*, 1999, 37(1/2): 257-253.
- [4] Li C W, Liu S R, Sun P S, Ge J P. Analysis on landscape pattern and eco-hydrological characteristics at the upstream of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 691-698.
- [5] Yang G J, Xiao D N, Zhou L H. Forest landscape pattern and its eco-hydrological effects of the Qilian Mountains in northwest China. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 489-494.
- [6] Liu N, Wang K L, Duan Y F. Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4641-4650.
- [7] Xu J X. Impact of human activities on the stream flow of Yellow River. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 648-655.
- [8] Gao C, Zhai J Q, Tao H, Liu B, Su B D, Jiang T. Hydrological response to land use/land cover change in Chaohu basin. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1794-1902.
- [9] Dong L H, Xiong L H, Yu K X, Li S. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278-285.
- [10] Zhao Y, Yu X X, Jia Z L. Land use/forest vegetation change and its hydrological effects at the landscape scale. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(11): 1356-1361.
- [11] Huang Q. Coupling relations between landscape pattern and eco-hydrology process in the middle reaches of Tarim River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(9): 83-87.
- [12] Li L J, Jiang D J, Li J Y, Liang L Q, Zhang L. Advances in hydrological response to land use/land cover change. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 211-224.
- [13] Deng H P, Li X B, Chen J F, Zhang M, Wan H T. Simulation of hydrological response to land cover changes in the Suomo basin. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 53-62.
- [14] Hao F H, Chen L Q, Liu C M, Dai D. Impact of land use change on runoff and sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 5-8.
- [15] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, Xu C Y, Gao Y Q, Du J K. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [16] Xie H F. Water Quality Response to Landscape Change in Baihe Watershed [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [17] Chen J. The Effect of Landscape Change on Surface Runoff Jinxiuchuan Watershed of South Mountain in Jinan [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2008.
- [18] Xu L H, Wang Y H, Yu P T, Shi Z J, Xiong W, Mo F, Zhang S L, Dong X H. Hydrological impacts of afforestation: A case study based on simulation of TOPOG in the small watershed of caogou in Liupan Mountains, China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(3): 201-210.
- [19] Wang L, Chen X W. Runoff simulation with calibration and validation of three stations in Jinjiang River basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(6): 21-26.
- [20] 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.

- [21] International Scientific Data Service Platform. <http://datamirror.csdb.cn/admin/datademMain.jsp>. [2013-2-6].
- [22] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569-1578.
- [23] Zhang J Q, Wei S Q. A study on landscape pattern dynamical change during rapid urbanization in Quanzhou city. *Territory & Natural Resources Study*, 2006, (4): 63-64.
- [24] Arnold J G, Srinivasan P, Mutiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [25] Van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, Bishop T, Diluzio M, Srinivasan R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1/4): 10-23.
- [26] Moriasi D N, Arnold J G, Vanliew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [27] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently. *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 235-254.
- [28] Xia L L, Liu R Z, Zhang K. Research on the landscape pattern's impacts on water quality in Baiyangdian Watershed based on GIS. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(S1): 87-95.
- [29] Lin B Q, Chen Y, Chen X W. Study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [30] Liu M, Wang K L. Analysis on hydrological responses to changes of landscape patterns in the middle and upper reaches of Dongting Lake Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5970-5979.
- [5] 杨国靖, 肖笃宁, 周立华. 祁连山区森林景观格局对水文生态效应的影响. *水科学进展*, 2004, 15(4): 489-494.
- [6] 刘娜, 王克林, 段亚锋. 洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响. *生态学报*, 2012, 32(15): 4641-4650.
- [7] 许炯心. 人类活动对黄河河川径流的影响. *水科学进展*, 2007, 18(5): 648-655.
- [8] 高超, 翟建青, 陶辉, 刘波, 苏布达, 姜彤. 巢湖流域土地利用/覆被变化的水文效应研究. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1794-1802.
- [9] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 李帅. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展. *水科学进展*, 2012, 23(2): 278-285.
- [10] 赵阳, 余新晓, 贾子利. 基于景观尺度的流域土地覆被变化及其水文响应. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(11): 1356-1361.
- [11] 黄青. 塔里木河中游景观格局与生态水文过程的耦合分析. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(9): 83-87.
- [12] 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 梁丽乔, 张丽. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 211-224.
- [13] 邓慧平, 李秀彬, 陈军锋, 张明, 万洪涛. 流域土地覆被变化水文效应的模拟——以长江上游源头区梭磨河为例. *地理学报*, 2003, 58(1): 53-62.
- [14] 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.
- [16] 谢贺芳. 白河流域景观格局变化的水质响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [17] 陈娟. 济南市南部山区锦绣川流域景观变化对河川径流的影响研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2008.
- [19] 王林, 陈兴伟. 基于 3 个站点校准与验证的晋江流域径流模拟. *中国水土保持科学*, 2007, 5(6): 21-26.
- [20] 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.
- [23] 张金泉, 韦素琼. 泉州市快速城市化过程中土地利用景观格局变化研究. *国土与自然资源研究*, 2006, (4): 63-64.
- [28] 夏琳琳, 刘仁志, 张珂. 基于 GIS 的白洋淀流域景观格局对水质的影响研究. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(S1): 87-95.
- [29] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 1988-1999.
- [30] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 5970-5979.

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001: 120-126.
- [2] 王朗, 徐延达, 傅伯杰, 吕一河. 半干旱区景观格局与生态水文过程研究进展. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1238-1246.
- [4] 李崇巍, 刘世荣, 孙鹏森, 葛剑平. 岷江上游景观格局及生态水文特征分析. *生态学报*, 2005, 25(4): 691-698.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.7 Apr., 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The 5000-year climate change of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and historical ecology of Zoige wetlands HE Yixin, WU Ning, ZHU Qiu'an, et al (1615)
- Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors Aminem ELI, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al (1626)

Autecology & Fundamentals

- Daily stem radial variation of *Pinus koraiensis* and its response to meteorological parameters in Xiaoxing' an mountain LI Xinghuan, LIU Ruipeng, MAO Zijun, et al (1635)
- Effects of logging residues on surface soil biochemical properties and enzymatic activity WU Bobo, GUO Jianfen, WU Junjun, et al (1645)
- Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Pangquangou Nature Reserve BAI Xiumei, HAN Youzhi, GUO Hanqing (1654)
- Modeling tree crown structure of Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) natural forest OU Guanglong, XIAO Yifa, WANG Junfeng, et al (1663)
- Influence of magnesium deficiency and excess on chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall navel orange leaves LING Lili, HUANG Yi, PENG Liangzhi, et al (1672)
- Seed foraging and dispersal of Chinese yew (*Taxus chinensis* var. *mairei*) by frugivorous birds within patchy habitats LI Ning, WANG Zheng, LU Changhu, et al (1681)
- Interactions between heavy metal lead and two freshwater algae LIU Lu, YAN Hao, LI Cheng, et al (1690)
- Annual variations of the primary productivity and its size-fractioned structure in culture ponds of *Apostichopus japonicus* Selenka JIANG Senhao, ZHOU Yibing, TANG Boping, et al (1698)
- Growth and photosynthetic activity of *Microcystis* colonies after gut passage through silver carp and bighead carp WANG Yinping, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (1707)
- Contents of two coumarins in *Ipomoea cairica* and their effects on *Pomacea canaliculata*, *Orzya sativa*, and *Echinochloa crusgalli* YOU Changyan, YANG Yu, HU Fei, et al (1716)

Population, Community and Ecosystem

- Population and habitat status of Asian elephants (*Elephas maximus*) in Mengla Sub-reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan of China LIN Liu, JIN Yanfei, CHEN Dekun, et al (1725)
- Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China LI Fan, XU Bingqing, MA Yuanqing, et al (1736)
- Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in wheat field JIANG Min, SHEN Mingxing, SHEN Xinping, et al (1746)
- Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario ZHOU Hong, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (1757)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model LIN Bingqing, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al (1772)
- Phenological variation of alpine grasses (Gramineae) in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China during the last 20 years XU Weixin, XIN Yuanchun, ZHANG Juan, et al (1781)
- Landscape aesthetics in different areas of Lijiang City GUO Xianhua, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al (1794)
- Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (1800)

- Spatiotemporal dynamics of bacterial abundance and related environmental parameters in Lake Bosten
 WANG Bowen, TANG Xiangming, GAO Guang, et al (1812)
- Scale domain recognition for land use spatial fractal feature based on genetic algorithm
 WU Hao, LI Yan, SHI Wenzhong, et al (1822)
- Relationships of stable carbon isotope of *Abies faxoniana* tree-rings to climate in sub-alpine forest in Western Sichuan
 JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al (1831)
- An exploratory spatial data analysis-based investigation of the hot spots and variability of *Ommastrephes bartramii* fishery resources
 in the northwestern
 Pacific Ocean FENG Yongjiu, CHEN Xinjun, YANG Mingxia, et al (1841)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Spatial differentiation research of non-use value WTP based on the residents' ecological cognition: taking the sanjiang plain as a case
 GAO Qin, AO Changlin, CHEN Hongguang, et al (1851)
- Contamination characteristics in surface water and coastal groundwater of Hunhe River
 CUI Jian, DU Jizhong, WANG Xiaoguang (1860)
- Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis YU Zhongyuan, LI Bo, ZHANG Xinshi (1870)
- Research Notes**
- Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings
 ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, et al (1880)
- View Point**
- The discussion about the designation and content of ecological conservation and construction SHEN Guofang (1891)

《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 魏辅文 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 7 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 7 (April, 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