

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **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 11 期 2014 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)
基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)
西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)
青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)
黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)
三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)
三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)
流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)
江西省自然保护区发展布局空缺分析 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)
鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 黄和平,彭小琳,孔凡斌,等 (3107)
基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2014-06



封面图说: 三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

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/stxb201306091522

潘磊,肖文发,唐万鹏,雷静品,史玉虎,黄志霖,曾立雄,庞宏东.三峡库区森林植被气候生产力模拟.生态学报,2014,34(11):3064-3070.

Pan L, Xiao W F, Tang W P, Lei J P, Shi Y H, Huang Z L, Zeng L X, Pang H D. Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3064-3070.

三峡库区森林植被气候生产力模拟

潘 磊¹, 肖文发^{2,*}, 唐万鹏¹, 雷静品², 史玉虎¹, 黄志霖², 曾立雄², 庞宏东¹

(1. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430079; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘要: 收集三峡库区森林资源二类调查资料及气候数据, 在建立森林植被地理信息系统基础上, 开展了三峡库区森林气候生产力的模拟, 分析库区森林植被可能生产力, 并对不同气候变化情景下的森林生产力可能变化进行了预测。结果表明: (1) 各种森林类型的气候生产力与年均实际蒸散量均表现出了较强相关性, 建立的 4 种森林植被的气候生产力模式, 模型相关系数都达到极显著水平; (2) 假设了 5 种气候变化情景分析库区森林气候生产力的可能响应, 常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林对温度或降水变化表现出正向变化, 在温度增加 2℃、降水增加 20% 的情况下, 其生产力增幅分别达到 24.34%、22.50% 和 15.98%; 常绿针叶林生产力对气候变化的响应方向与此相反, 在温度与降水同时增加情景下其生产力减幅达 5.55%。

关键词: 三峡库区; 森林植被; 气候生产力

Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area

PAN Lei¹, XIAO Wenfa^{2,*}, TANG Wanpeng¹, LEI Jingpin², SHI Yuhu¹, HUANG Zhilin², ZENG Lixiong², PANG Hongdong¹

1 Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430079, China

2 The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Forest biological production plays an important role in forest ecosystems and is significantly related to the terrestrial carbon cycle and the ecological changes occurring worldwide, so it must be considered during the evaluation of ecosystem functions. The Three Gorges Reservoir Area continues to be a hotspot for research because of its complex topography, rich species diversity and wide variety community types. The construction of the reservoir threatens the eco-stability of the surrounding and downstream areas. Estimating and simulating forest climatic productivity has become necessary and will also provide evidence of vegetation restoration and land use in the Three Gorges Reservoir Area and even in the entire Yangtze River Basin. We developed a method designed to link together data from forest inventories and ecological research sites, including data from 104 permanent sample plots and 118 temporary sample plots, and combined that plot data with meteorological, topographical, leaf area index, live-biomass and net primary productivity (NPP) data collected from across the Three Gorges Reservoir Area using a GIS system. Using this large database and statistical models, the actual and potential productivities of different forest types were estimated and the annual mean temperature/precipitation, latitude, longitude and altitude were documented. Then the distribution patterns of biological production of major forest types in Three Gorges Reservoir Area were analyzed. To acquire actual measurement data of mature forest productivity is critical to predicting and simulating forest climatic productivity. Data based on natural or near natural

基金项目: 国家科技支撑课题(2011BAD38B04)

收稿日期: 2013-06-09; 网络出版日期: 2014-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

conditions were selected from a database of forest production and used to estimate the productivity of major forest types. The criteria for selecting these data included: (1) Forest age: mature or near mature forests were selected for this part of the analysis. Based on the age group division standards of the State Forestry Administration, forests more than 60 years old were treated as mature or near mature for evergreen broad-leaved forest, deciduous broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest and cypress forest. Masson pine forest, coniferous forest and temperate forest were selected if more than 50 years and Chinese fir forest was selected if more than 26 years. (2) Selected forests had a soil which was greater than 60cm thick. (3) Stand density is between 1000—2000 trees/hm². (4) Midslope forests with slopes less than 35° were chosen for analysis. The NPP data within 0.1° (Latitude) × 0.1° (Longitude) × 100 m (Height) were chosen for use in the analysis of forest climatic productivity. If one grid had multiple sets of data, we took the average of the three largest datasets. The amounts of annual evapotranspiration in an area significantly influenced NPP of different forest types in the Three Gorges Reservoir Area. NPP of evergreen broad-leaved forests is related to average annual evapotranspiration in the form of the exponential curve when graphed. For coniferous forests and deciduous broad-leaved forests, the relationship between the NPP and evapotranspiration is in the form of a parabolic surface. NPP of coniferous-deciduous mixed forests is related to annual actual evapotranspiration in the form of an exponential curve when graphed. The potential productivity of the Three Gorges Reservoir Area is 11.26 t · hm⁻² · a⁻¹, which is 1.48 times higher than actual productivity. Forest productivity responded differently in five different modeled climate scenarios. The productivity of evergreen broad-leaved forests, deciduous broad-leaved forests and coniferous-deciduous mixed forests are positively correlated with modeled increases in temperature and precipitation; with a temperature increase of 2°C and a 20% increase in precipitation, their NPP increased by 24.34%, 22.5% and 15.98%, respectively, but NPP of evergreen coniferous forests decreased by 5.55%. Total potential productivity changed slightly (-0.53% to +5.51%) with the changing of the climate as discussed above, but theoretical NPP increased 29.51% with the modeled rise in temperature and precipitation described above.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; forest; climatic productivity

植被生产力是评价生态系统结构与功能协调性的重要指标。植物地理学指出,气候是决定陆地植被类型分布格局及其结构功能特性的最主要因素^[1]。植被气候生产力是指在其他条件均适宜的情况下,自然生长发育的植被由气候资源所决定的单位面积生物学产量或经济产量^[2-3],其实质是一种潜在生产力。研究植被的气候生产力,除了能揭示生产力与气候因素的关系,预测植被在某一地区发展的潜在能力外,还可根据全球气候变化的趋势,预测植被生产力的未来发展,对于区域林业生产布局,生态系统管理、气候资源的充分利用、植物产量的提高和全球气候变化的应对均具有重要的指导意义^[4]。

气候生产力研究从 20 世纪 60 年代开始兴起,在国际生物学计划 (IBP) 和国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 的推动下,一些著名全球性气候生产力估测模型应运而生,如 Miami 模型、Thorntwaite Memorial 模型、Chikugo 模型等,成为模拟全球性植被生产力分布及其对气候变化可能响应的经典性工作。从 20

世纪 80 年代开始,国内有学者^[5-8]利用这些模型对全国或地区尺度上的植被气候生产力进行了分析。其后,研究者开始结合我国的气候及植被资源特点,开展了模型开发或改进方面的探索工作^[3-4,9-10]。这些工作为我国植被气候生产力研究起到了重要的推动作用,但由于资料、数据及方法的限制,现有的植被气候生产力研究可比性不强,一定程度上限制了相关成果的实际应用。利用连续、稳定的森林资源清查数据进行相关研究将是解决上述问题的重要途径之一^[11-12]。

三峡库区地形复杂、气候多变,森林分布、生长与物质生产受到众多自然或人为因素的干扰,植被气候生产力研究对于估计植被生产潜力、确定区域人口承载能力及植被生态建设很有意义。有学者^[13]利用光能利用率模型对长江流域植被的生产力进行了估测,而关于库区植被气候生产力的研究尚未见系统报道。本研究将利用库区范围基于森林资源调查数据建立的森林生产力数据对库区森林植

被气候生产力进行研究,以期为这一区域的森林植被生产力研究、决策与应用提供参考。

1 研究方法

1.1 用于气候生产力分析的森林类型划分

根据三峡库区森林植被分类体系^[14-15],结合库区森林的垂直分布特点及亚热带地区植被分布特点,将现有森林类型进行适当合并,共将三峡库区森林植被分为常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔叶混交林及常绿针叶林,分析各自的气候生产力模式,其中常绿针叶林包括马尾松林、杉木林、柏木林、温性松林及针叶混交林。

1.2 用于气候生产力分析的生产力数据选择

根据本研究建立的生产力数据库,从中选择自然或接近自然状态下的森林生产力数据,选择标准包括(1)林龄,要求成熟林或近熟林。按照国家林业局对各类型森林龄组划分标准,常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林及柏木林 60a 以上、马尾松林、针叶混交林、温性松林 50a 以上、杉木林 26a 以上;(2)土层厚度 60 cm 以上;(3)公顷株数 1000—2000 株;(4)坡度小于 35°、坡位中坡。在 0.1°经度×0.1°纬度×100 m 海拔网格内选择用于气候生产力分析的 NPP(Net Primary Productivity,净第一性生产力)数据,若 1 个网格内有多组数据,取值最大的前 3 个数据平均。

1.3 水热气候因子计算方法

本研究选择的估算气候生产力的水热因子包括年均降水量、年均温度、最大蒸散量、实际蒸散量、温暖指数、湿度指数、辐射干燥度等气候因子。

(1) 温暖指数

$$WI = \sum (t - 10)$$

式中, t 指 ≥ 10 °C的月平均气温。

(2) 湿度指数

$$MI = P / (WI + 20) \quad WI \leq 100$$

$$MI = 2P / (WI + 140) \quad WI \geq 100$$

式中, P 指年降水量。

(3) 年最大蒸散量

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

(4) 年实际蒸散量

$$E = 1.05P / [1 + (1.05P/L)^2]^{0.5}$$

(5) 生物温度

$$BT = \sum t' / 12,$$

式中, t' 指 0—30 °C 的月均温。

(6) 可能蒸散率

$$PER = 58.93 \times BT / P$$

(7) 辐射干燥度

$$RDI = 0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2$$

2 结果与分析

2.1 三峡库区森林植被气候生产力模拟

2.1.1 三峡库区典型森林类型的气候生产力模式

选择年均降水量、年均温度、最大蒸散量、实际蒸散量、温暖指数、湿度指数、辐射干燥度等气候因子,与选择出的各森林类型净第一性生产力进行单因素和多因素回归分析,结果表明各种森林类型 NPP 与年实际蒸散量的单因子回归效果良好。

从图 1 中所示的散点分布规律也可以看出,4 种森林类型的生产力都表现出了与年实际蒸散量的良好相关性,表 1 列出了各森林类型气候生产力模型,模型的相关系数、 F 值及剩余标准差等指标可反映本次模拟的效果理想。

表 1 三峡库区不同森林植被类型气候生产力模型

Table 1 The model of climatic NPP for different forest types in the Three Gorges Reservoir Area

森林类型 Forest type	模型 Model	R	F	N	$P > Pr$
常绿阔叶林 Evergreen Broadleaf Forest	$NPP = 3.4976 \times \exp(0.0021 \times E)$	0.6569	70.85	40	< 0.0001
落叶阔叶林 Deciduous Broadleaf Forest	$NPP = -120.3064 + 0.6732 \times E - 0.0011 \times E^2 - 6.3375 \times 10^{-7} \times E^3$	0.5684	17.12	43	< 0.0001
常绿针叶林 Evergreen Needleleaf Forest	$NPP = 0.4516 \times E - 6.0487 \times 10^{-4} \times E^2 + 2.6384 \times 10^{-7} \times E^3 - 98.0373$	0.8495	67.76	40	< 0.0001
针阔混交林 Mixed Forest	$NPP = 0.0101 \times E^{1.0023}$	0.5438	35.76	33	< 0.0001

* E 指年实际蒸散量, R 指回归模型的相关系数, F 为显著性检验值, N 为样本数

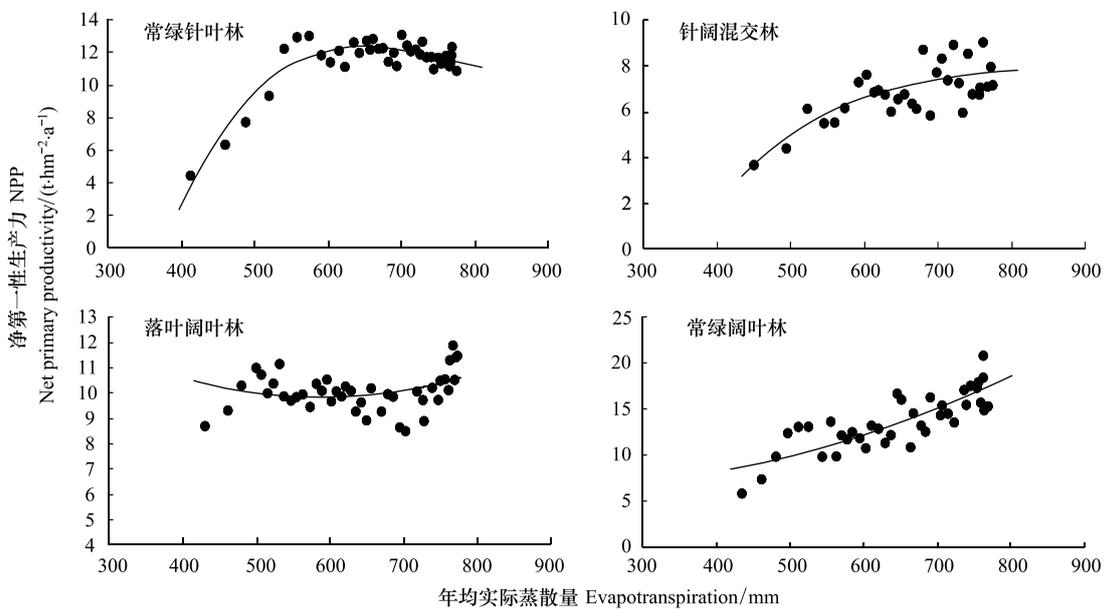


图 1 三峡库区不同森林植被气候生产力与年蒸散量关系

Fig.1 Relationship between climatic NPP and annual actual evaporation of different forest types

蒸散量受太阳辐射、温度、降水、气压、风速等一系列气候因素的影响,理论上包括了植被的蒸腾量,是一个反映能量平衡、植被与环境相互作用的综合性因子,在估算水热梯度变化较大区域的森林气候生产力上有较好的实际应用效果^[3]。从各森林类型自然状态下与蒸散量表现出的关系看,与各森林类型现实生产力在水热因子上的变化规律较为一致,但是从生产力值的大小上看,各类型森林的气候生产力明显高于其现实生产力的平均水平,库区森林生产与生态服务能力还有较大发展潜力。

2.1.2 三峡库区森林气候生产力分布与模拟

按 0.1°经度×0.1°纬度×100 m 海拔将库区划分成若干网格,同时将温度与降水量按相同分辨率进行插值,同一网格内取其中中心点的气候因子平均值,基于 ArcGIS 建立库区网格内的温度、降水及蒸散量

数据库。在每个网格内代入前述建立各森林类型气候生产力模式,得到 1 组气候生产力数据,若忽略立地条件、树种组成等其它生物或非生物因子对森林分布的影响,在库区范围内由气候决定的森林生产力则可由每一个网格内 4 种森林类型 NPP 的最大值确定。据此,得到库区森林植被的气候生产力与蒸散量分布的关系,可用下式进行模拟:

$$NPP_E = 3.7055 \times \exp(0.00202 \times E) \quad (1)$$

式中, E 指年实际蒸散量(mm)

表 2 列出了 4 种森林类型代表全库区气候生产力的分布范围及气候生产值区间,可以看出,根据气候生产力大小确定的常绿阔叶林分布范围最广,主要分布在海拔 200—1600 m,温度 10 °C 以上,年均蒸散量在 550—900 mm 的区域,在这一区域常绿阔叶林的理论气候生产力应该在 11.95—21.27

表 2 不同森林植被类型的气候生产分布区间

Table 2 Distribution region of climatic NPP for different forest types in the Three Gorges Reservoir Area

森林类型 Forest type	温度范围 Temperature /°C	降水范围 Precipitation /mm	海拔区间 Altitude /m	蒸散量区间 Evaporation /mm	气候生产力值区间 Climatic NPP /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
常绿阔叶林 Evergreen Broadleaf Forest	10.5—19.5	800—1800	200—1600	550—900	11.95—21.27
落叶阔叶林 Deciduous Broadleaf Forest	4.5—9.0	1550—1750	1750—2550	420—530	8.54—10.62
针阔混交林 Mixed Forest	8.5—9.2	1500—1700	1750—1900	520—550	8.61—9.22
常绿针叶林 Evergreen Needleleaf Forest	8.5—10.5	1500—1700	1400—1800	520—590	10.64—12.55

t·hm⁻²·a⁻¹之间变动。在海拔 1400—1900 m 区域,温度明显下降,蒸散量亦趋降低,常绿针叶林和针阔混交林的气候生产力最大,成为这一区域分布的主要森林类型,常绿阔叶林和落叶阔叶林仅有少量分布,这一区域的气候生产力大致变动在 8.61—12.55 t·hm⁻²·a⁻¹之间。到了 2000 m 以上的高海拔地段,气温下降和湿度加大的趋势更加明显,年实际蒸散量大都在 550 mm 以下,这一区域分布的落叶阔叶林是区域气候生产力的代表,其理论气候生产力为 8.54—10.62 t·hm⁻²·a⁻¹。

2.2 气候变化对三峡库区森林气候生产力的影响

为估算气候变化对三峡库区森林气候生产力的可能影响,首先需要对气候变化进行定量表达,而气温和降雨是区域气候变化情景分析的 2 个基本要素^[16]。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 3 次评估报告预测,全球平均气温在 1990—2100 年间将升高 1.4—5.8 °C,预计 21 世纪全球平均年降水量会增加,但在区域尺度上降水的增加和减少都有可能,主要介于增加 5%—20%。三峡库区局地气候多变^[17],水库蓄水对气候变化也会因距库体远近不

同产生不同程度的影响^[18],为此本研究在确定气候情景时综合考虑了温度增加,降雨量变化(增加和减少)的情况(表 3)。

表 4 列出了不同气候变化情景下库区森林气候生产力变化的统计结果。降水量增加能不同程度地提高常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林的生产力,在温度不变降水量增加 20% 情况下,常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林生产力可提高 3.31%—4.43%,而在降水量减少 10% 情况下,3 种森林类型的气候生产力将下降 0.03%—2.44%。常绿针叶林则出现了相反的变化趋势,降水量增加库区常绿针叶林生产力总体上呈减少趋势,但是其变动幅度明显小于其它 3 种森林类型。主要是由于针叶林在库区分布的范围很广,在不同的水热组合条件下,针叶林的 NPP 会表现出正负 2 个方向的变化,反映出来的总体变动值较小。温度增加对常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林生产力的提高有明显促进作用,3 者在温度增加 2°C 情景下,气候生产力可分别提高 17.19%、8.57% 和 11.15%;而增温对针叶纯林的作用不明显,总体上其生产力还略有下降。对于温度与降水同时增加的气候情景下,各种森林类型生产力的变动幅度都进一步加大,常绿阔叶林增幅最大为 24.34%,常绿针叶林减幅则达 5.55%。落叶阔叶林对气候变化最为敏感,5 种气候情景下其 NPP 变动的标准误都最大,而针阔混交林和常绿针叶林的变动标准误相对较小。不同森林类型对温度与降水变化的反映不一,常绿阔叶林、落叶阔叶林对温度的变化反映较为敏感,而降水量变化对针阔混交林与常绿针叶林影响更大。

表 3 拟采用的不同气候情景

Table 3 Climate scenarios to be used

代码 Code	气候情景 Climate scenarios
TOP0	当前气候状况
TOP20	气温不变,降水量增加 20%
TOP-10	气温不变,降水量减少 20%
T2P0	气温升高 2 °C,降水量不变
T2P20	气温升高 2 °C,降水量增加 20%
T2P-10	气温升高 2 °C,降水量减少 10%

表 4 不同森林植被类型不同气候变化情景下生产力预测值

Table 4 Predict NPP values under different climate scenarios

代码 Code	常绿阔叶林 Evergreen Broadleaf Forest				落叶阔叶林 Deciduous Broadleaf Forest				针阔混交林 Mixed Forest				常绿针叶林 Evergreen Needleleaf Forest			
	生产力 NPP	增减比 ±%	平均值 Mean	标准误 Std	生产力 NPP	增减比 ±%	平均值 Mean	标准误 Std	生产力 NPP	增减比 ±%	平均值 Mean	标准误 Std	生产力 NPP	增减比 ±%	平均值 Mean	标准误 Std
TOP0	13.88				10.26				8.17				11.90			
TOP20	14.49	4.43	0.89	0.60	10.63	3.65	1.00	1.33	8.46	3.51	0.28	0.14	11.70	-1.66	-0.18	0.25
TOP-10	13.48	-2.86	-0.57	0.35	10.13	-1.22	-0.37	0.53	7.97	-2.44	-0.19	0.09	12.01	0.97	0.10	0.19
T2P0	16.26	17.19	2.43	0.43	11.13	8.57	2.28	2.26	9.08	11.15	0.77	0.05	11.64	-2.16	-0.34	0.72
T2P20	17.25	24.34	3.85	1.23	12.56	22.50	5.53	5.46	9.48	15.98	1.15	0.16	11.24	-5.55	-0.51	0.85
T2P-10	15.62	12.55	1.56	0.36	10.54	2.74	0.91	1.02	8.82	7.87	0.51	0.13	11.65	-2.05	-0.14	0.60

* ±% 为各气候变化情景下 NPP 与本底状况增减百分比; Mean 为各 0.1° 经度×0.1° 纬度×100 m 海拔网格差值平均值, std 为差值标准误

3 结论与讨论

(1) 三峡库区不同森林类型气候生产力与年均实际蒸散量表现出了较强相关性。建立了 4 种森林类型的气候生产力模式,模型相关系数都达到极显著水平。罗天祥^[19]分析了全国尺度上的马尾松林、杉木林等常绿针叶林的水热分布模式,认为在潜在蒸散量为 960—980 mm 及 920—922 mm 时马尾松和杉木林的生产力达到最大值。本研究建立的常绿针叶林随实际蒸散量的变化曲线亦表现为抛物线型,库区常绿针叶林在实际蒸散量 650—700 mm 之间气候生产力值最高,而与之对应的潜在蒸散量大致在 820—900 mm 之间,与上述研究结论非常吻合。

(2) 根据建立的 4 种森林类型气候生产力,对库区现有森林分布的区域进行森林气候生产力分析。结果表明,在海拔 200—1600 m,温度 10 °C 以上,年均蒸散量 550—900 mm 的区域,常绿阔叶林气候生产力在 4 种森林类型中最高;在海拔 1400—1900 m 区域,温度 8—10 °C,降水量 1500—1700 mm 区域,常绿针叶林和针阔混交林的气候生产力值最高,这一区域的气候生产力大致变动在 8.61—12.55 $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间;在 2000 m 以上的高海拔地段,年实际蒸散量大都在 550 mm 以下,这一区域分布的落叶阔叶林气候生产力最高,其值在 8.54—10.62 $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。不同的水热组合条件决定了对资源利用效率最高的森林类型,根据这一原则建立了库区森林植被的气候生产力模式,库区森林气候生产力与年均实际蒸散量呈指数相关。

(3) 不同区域由于水热环境不同,森林对气候变化的反应存在较大差异^[16,20-21]。假设了 5 种气候变化情景分析库区森林气候生产力的可能响应,常绿阔叶林、落叶阔叶林及针阔混交林对温度或降水变化表现出正向变化,在温度增加 2 °C、降水增加 20% 的情况下,其生产力增幅分别达到 24.34%、22.50% 和 15.98%;常绿针叶林生产力对气候变化的响应方向与此相反,在温度与降水同时增加情景下其生产力减幅达 5.55%。

(4) 对于气候生产力的理解可以有 2 种不同形式,一是指区域或更大尺度上由气候资源决定的植被生产力,一般是通过对区域内自然植被生产力与相匹配的气候数据进行模拟分析^[3],Miami 模型、

Thornthwaite 模型即是这类气候生产力模型的经典代表;二是对于某一种或几种特定的森林类型,在研究区域不同的气候条件下所能达到的生产潜力,也有称之为水热优化模型^[4,19,22]。显然,二者有联系也有区别,在实际应用中如果不加甄别可能会降低模型模拟精度,甚至得出相反的结论^[23]。本文建立的 2 类森林气候生产力模型就分别属于以上 2 种情况,可分别为库区现有植被的恢复与改造及区域生态规划与植被重建提供决策参考。

References:

- [1] Song Y C. Vegetation ecology. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
- [2] Zhou G S, Zhang X S. Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11-19.
- [3] Zhou G S, Zhang X S. A Natural vegetation NPP model. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(3): 193-200.
- [4] Liu S R, Wen Y G. Chinese fir Productivity Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 2005
- [5] He Q T, Baumgartner A. The possible productivity of Chinese plants—The climate yield of forest and agriculture. *Journal of Beijing Forestry University*, 1986, 8(2): 84-98.
- [6] Chen G N. Miami model-based NPP estimate of vegetation in China. *Journal of Natural Resources*, 1987, 2(3): 270-278.
- [7] Hou G L, You S C. Chikugo model-based bioclimatic productivity of vegetation in China. *Journal of Natural Resources*, 1990, 5(1): 60-65.
- [8] Zhang X Z. Estimate and its distribution of net primary production of natural vegetation in China. *Natural Resources*, 1993, 15(1): 15-21.
- [9] Zhu Z H. Estimation model based on net primary production of natural vegetation. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [10] Luo T X, Zhao S D. Patterns and Mathematical Models of Chinese-Fir Productivity in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 403-415.
- [11] Zhao M, Zhou G S. A new methodology for estimating forest NPP based on forest inventory data: a case study of Chinese pine forest. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2): 93-100.
- [12] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, Yang Z Y. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169: 149-157.
- [13] Ke J H, Piao S L, Fang J Y. NPP and its spatio-temporal patterns in the Yangtze River watershed. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(6): 764-770.

- [14] Xiao W F, Li J W, Yu C Q, Ma J, Cheng R M, Liu S Y, Wang J X, Ge J W. Terrestrial animal and plant ecology of the Three Gorges of Yangtze River. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2000.
- [15] Cheng R M, Xiao W F, Li J W, Ma J, Han J J, Ren M B. The preliminary research of forest vegetation classified system in the Three Gorge Researvior Area. Environment and Exploitation, 1999, 14(2): 4-7.
- [16] Zhao J F, Yan X D, Jia G S. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 92-102.
- [17] Chen X Y, Zhang Q, Ye D X, Liao Y M, Zhu C H, Zou X K. Regional climate change over Three Gorges Reservoir Area. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(1): 47-51.
- [18] Zhang H T, Zhu C H, Zhang Q. Numerical modeling of microclimate effects produced by the formation of the Three Gorges Reservoir. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(2): 133-137.
- [19] Luo T X. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and their mathematical models. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [20] Fang J Y. Forest productivity in China and its response to global climate change. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5): 513-517.
- [21] Liu S R, Guo Q S, Wang B. Prediction of net primary productivity of forests in China in response to climate change. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(5): 478-483.
- [22] Wen Y G, Yuan C A, Liu S R. Study on climatic productivity model for Chinese fir plantation and their distribution in Guangxi. Natural Resources, 1994, 16(6): 63-70.
- [23] Liu S R, Xu D Y, Wang B. Impacts of climate change on productivity of forests in China II. Geographic distribution of actual productivity of forest in China. Forest Research, 1994, 7(4): 425-430.
- [3] 周广胜,张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.
- [4] 刘世荣,温远光,肖文发. 杉木生产力生态学. 北京:气象出版社, 2005.
- [5] 贺庆棠, Baumgartner A. 中国植物的可能生产力: 农业和林业的气候产量. 北京林业大学学报, 1986, 8(2): 84-98.
- [6] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试. 自然资源学报, 1987, 2(3): 270-278.
- [7] 侯光良,游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60-65.
- [8] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. 自然资源, 1993, 15(1): 15-21.
- [9] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [10] 罗天祥,赵士洞. 中国杉木林生物生产力格局及其数学模型. 植物生态学报, 1997, 21(5): 403-415.
- [13] 柯金虎,朴世龙,方精云. 长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究. 植物生态学报, 2003, 27(6): 764-770.
- [14] 肖文发,李建文,于长青,马娟,程瑞梅,刘少英,王金锡. 长江三峡库区陆生动植物生态. 重庆: 西南师范大学出版社, 2000.
- [15] 程瑞梅,肖文发,李建文,马娟,韩景军,任明波. 三峡库区森林植被分类系统初探. 环境与开发, 1999, 14(2): 4-7.
- [16] 赵俊芳,延晓冬,贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 92-102.
- [17] 陈鲜艳,张强,叶殿秀,廖要明,祝昌汉,邹旭凯. 三峡库区局地气候变化. 长江流域资源与环境, 2009, 18(1): 47-51.
- [18] 张洪涛,祝昌汉,张强. 长江三峡水库气候效应数值模拟. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 133-137.
- [19] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京:中国科学研究院, 1996.
- [20] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的响应. 植物生态学报, 2000, 24(5): 513-517.
- [21] 刘世荣,郭泉水,王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, 18(5): 478-483.
- [22] 温远光,元昌安,刘世荣. 广西杉木林气候生产力模型及分布的研究. 自然资源, 1994, 16(6): 63-70.
- [23] 刘世荣,徐德应,王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响: II 中国森林第一性生产力的模拟. 林业科学研究, 1994, 7(4): 425-430.

参考文献:

- [1] 宋永昌. 植被生态学. 上海:华东师范大学出版社, 2001.
- [2] 周广胜,张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol
League, Inner Mongolia WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia; a case study of Heidaigou
open pit coal mining KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus*
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus*
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO₂ emissions transfer embedded in inter-regional trade in China LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

《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

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 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 11 (June, 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