

三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局

曾立雄^{1,2}, 王鹏程^{1,2,*}, 肖文发², 万 睿^{1,3}, 黄志霖², 潘 磊^{2,3}

(1. 华中农业大学, 武汉 430070; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 3. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075)

摘要:三峡工程对三峡库区的生态环境将会产生巨大影响,对库区生物量和生产力的本底研究具有重要的科学意义和历史价值。以 108 块临时样地及森林资源清查数据为基础,对三峡库区植被生物量和生产力进行估算,结果表明:(1)三峡库区植被总生物量和年生产力分别为 $1.17 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $1.77 \times 10^7 \text{ t}$,占全国森林植被的 0.91% 和 3.62%,均高于全国平均水平;(2)三峡库区马尾松林生物总量最多,达到 $4.14 \times 10^7 \text{ t}$,常绿阔叶林单位面积生物量最高,为 85.60 t hm^{-2} ;(3)竹林的 NPP 最高,为 $10.10 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$,柏木林最低,仅为 $4.21 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$;(4)三峡库区植被平均生物量和 NPP 均呈现“东高西低,北高南低”的分布格局,与经纬度没有明显相关性;(5)森林植被平均生物量随着海拔上升而增加,在海拔为 1500 ~ 1800m 范围内达到最大值 59.05 t hm^{-2} ,随后迅速下降。(6)NPP 随海拔变化呈现“先减后增随后又减”的规律,最大值出现在 900 ~ 1200m 区段,为 $7.07 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$;(7)库区海拔在 300 ~ 1500m 间的森林植被总生物量和总生产力分别为 $8.15 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $10.38 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$,占整个库区的 83.58% 和 83.83%。

关键词:三峡库区;生物量;生产力;分布格局

文章编号:1000-0933(2008)08-3808-09 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Estimating vegetation biomass and productivity and their distribution patterns in the Three Gorges Reservoir region

ZENG Li-Xiong^{1,2}, WANG Peng-Cheng^{1,2,*}, XIAO Wen-Fa², WAN Rui^{1,3}, HUANG Zhi-Lin², PAN Lei^{2,3}

1 *Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

2 *Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*

3 *Forestry Science Institute of Hubei Province, Wuhan 430075, China*

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3808 ~ 3816.

Abstract: The environment of Three Gorges Reservoir region has been greatly influenced by the Three Gorges project. Data of biomass and productivity in Three Gorges Reservoir region has important implications for understanding the environmental effects on vegetation. We estimated the biomass and productivity of vegetation in the Three Gorges Reservoir region using data collected from 108 temporary plots and the sixth forests inventory of China. The total biomass and annual productivity in the region is $1.17 \times 10^8 \text{ t}$ and $1.77 \times 10^7 \text{ t}$, accounting for 0.91% and 3.62% of the whole country data, respectively. Masson's pine forests had the largest biomass ($4.14 \times 10^7 \text{ t}$), and the evergreen broad-leaved forests showed the highest average biomass per unit area (85.60 t hm^{-2}). Bamboo forests presented the greatest NPP ($10.10 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$), and Cypress forests the lowest ($4.21 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$). The average biomass per unit area and NPP decreased from west to east, and

基金项目:国家十一五科技支撑资助项目(2006BAD03A1301, 2006BAD03A0701);长江三峡库区(秭归)森林生态定位站资助项目

收稿日期:2008-04-18; **修订日期:**2008-07-20

作者简介:曾立雄(1982 ~),男,湖北武汉人,博士生,主要从事森林生态和生态系统动态模拟研究. E-mail: zlx82426@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National and Technology of China (No. 2006BAD03A1301; 2006BAD03A0701); Forestry Ecological Station, Zigui, Three Gorges Reservoir Area

Received date: 2008-04-18; **Accepted date:** 2008-07-20

Biography: ZENG Li-Xiong, Ph. D. candidate, mainly engaged in forest ecology and dynamic simulation of ecosystem. E-mail: zlx82426@163.com

from north to south, but did not changed with longitude and latitude. The average biomass of vegetation increased with increasing elevation till up to 1500—1800 m a. s. l., where the average biomass reached the maximum value of 59.05 t hm^{-2} . Thereafter it decreased sharply with increasing elevation. The *NPP* showed a double-hump curve with elevation. It decreased with elevation from 300 to 600 m a. l., then increased till up to 900—1200 m ($7.07 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$), and thereafter decreased again. The total biomass and productivity within 300—1500 m was $8.15 \times 10^7 \text{ t}$ and $10.38 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$, accounted for 83.58% and 83.83% of the whole area data, respectively.

Key Words: Three Gorges Reservoir region; biomass; productivity; distribution

森林作为陆地生态系统的主体,其生物量和生产力对全球气候变化和物质循环起着非常重要的作用^[1~3]。我国很多学者用不同的方法和模型对中国的第一性生产力进行了估算,认为我国 *NPP* 的基本分布趋势为东南沿海最高,沿西北方向逐渐递减^[4~9]。随着 3S 技术的发展,更多的学者选择结合卫星影像对区域生产力及其水平分布格局进行研究^[10~12]。这些成果对研究我国陆地生态系统碳循环及植被对气候变化的响应具有重要意义。

三峡库区地处长江中上游,是我国乃至世界生物多样性保护的热点地区,也是我国生态环境保护的重点地区。三峡工程是举世瞩目的水利工程,它将对我国社会、经济发展和生态环境建设产生巨大影响。而森林生态系统如何适应和响应这些变化将会是研究者所非常关心的问题。三峡工程正式启动后,许多科研单位先后对库区的森林资源种类进行了研究,并形成了一定的研究成果^[13~15],而整个库区生物量和生产力的系统研究没有相关的报道。

本文在区域尺度上对三峡库区主要森林类型现实生物量和生产力做出估计,对整个库区的碳储量和碳循环有一个初步的了解。分析其地理分布格局,为整个库区生态功能评价和生态建设提供依据,对区域内与周边区域的经济发展和生态安全具有重大意义。随着水位的上升,库区内局部环境将会发生巨大改变,本文作为三峡工程前期的本底研究,为将来库区森林生态系统对气候变化的适应和响应机制研究提供重要参考。在这种特定的时间和空间条件下,本文的研究无疑具有极重的科学意义和历史价值。

1 研究区域概况

长江三峡库区总面积为 5.8 万 km^2 ,地处亚热带的北缘,具亚热带湿润性气候特征。区内热量充足,年均气温 17~19℃,极端最高温可达 44℃,极端最低气温 -2.5~5.6℃,无霜期 300~340d。年降水量 1000~1250mm,相对湿度较大,可达 60%~80%。局地气候明显,年均温和年降雨量高于同纬度的中国东部地区。

库区横跨鄂西、渝东山地,西段主要为平行岭谷和盆周山地,东段主要鄂西山。库区地貌包括平原、丘陵、低山和中山四大类型,高程在 400m 以上的区域面积占总面积的 70% 以上,最高海拔 3032m,最低约 40m。库区植被垂直分布显著,在海拔 500 m 以下以农田和经济林为主,散生马尾松 (*Pinus massoniana*)、柏木 (*Cupressus funebris*) 与乌桕 (*Sapium sesiferum*);500~1300 m 为常绿阔叶林,1300~1700 m 为常绿落叶阔叶混交林,1700~2200 m 为含针叶的阔叶林;2200~3105 m 为亚高山常绿针叶林带^[16]。

2 研究方法

肖文发等^[16]和程瑞梅等^[17]曾对库区内植被做过系统整理和分类。三峡库区面积最大的 9 种主要森林植被类型为:暖温性常绿针叶林、典型落叶阔叶林、一般落叶阔叶林、典型常绿阔叶林、暖温性针阔混交林、温性常绿针叶林、竹林、灌木林和柑桔人工林等类型^[16,17]。本文结合临时样地林分特征,将库区植被分为:马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林、柏木 (*Cupressus funebris*) 林、温性松林 (华山松 (*Pinus armandii*) 林、巴山松 (*Cupressus torulosa*))、针叶混交林 (马尾松杉木混交林、马尾松柏木混交林)、针阔混交林 (马尾松栎类混交、柏木栎类混交)、落叶阔叶林 (栎类)、常绿阔叶林 (栲树 (*Castanopsis fargesii*))、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*))、竹林、灌木林和经济林等 11 种森林类型。

在所选择森林类型的主要分布区内按经度、纬度、海拔等因子差异设置 108 个临时样地。用常规方法进行了生物量和生产力的调查,建立各树种关于胸径和树高的生物量生长模型以及枯落物的分布模型。收集三峡库区各县(区、市)1999 年森林资源连续清查的小班数据。用 GIS 建立以森林资源连续清查小班为基础单位的数据库,包括地理位置(纬度、经度、海拔)、面积、年龄、树种组成、郁闭度、平均胸径、平均树高等字段。

每个小班的生物量和生产力根据小班记录数据进行计算统计。其中乔木层的生物量用所建立的生物量生长模型计算,灌木层生物量用各类型植被临时样地均值以面积换算,枯落物生物量用分布模型计算:

$$W = \sum (W_{it} + W_{is} + W_{il})$$

依据所收集的数据,生产力采用总平均生长量来计算:

$$NPP = \sum (W_{it}/A_{it} + W_{is}/A_{is} + W_{il}/A_{il})$$

式中, W 为总生物量(t); NPP 为净第一性生产力($t \cdot a^{-1} \cdot hm^{-2}$); W_{it} 和 A_{it} 为第 i 个小班乔木层总生物量和年龄, W_{is} 和 A_{is} 代表第 i 个小班灌木层的总生物量和年龄, W_{il} 和 A_{il} 代表第 i 个小班枯落物的生物量和存留时间。乔木层的生产力根据小班记录的年龄计算,灌木层生产力以各森林类型临时样地的平均值替代^[18],分层统计时枯落物算作乔木层的生产力。文中所有数据都是以小班为基本单位进行统计^[19]。

3 结果与分析

3.1 三峡库区生物总量和第一性生产力估算

利用所建立的库区植被地理信息系统空间数据,统计整个三峡库区主要植被的生物量和生产力,如表 1 所示。三峡库区林地面积(不包括四旁树的有林地面积)为 $269.10 \times 10^4 hm^2$,占整个库区面积的 50.37%,其中乔木林地占整个库区面积的 33.25%。三峡库区植被的总生物量为 $1.17 \times 10^8 t$,年生产力 $1.77 \times 10^7 t$,其中乔木林、灌木林和经济林的总生物量分别为 97.52×10^6 、 15.20×10^6 和 $4.69 \times 10^6 t$,年生产力总量分别为 1205.44×10^4 、 $457.22 \times 10^4 t a^{-1}$ 和 $72.12 \times 10^4 t a^{-1}$, NPP 则是乔木林 > 经济林 > 灌木林。肖兴威根据我国第六次全国森林资源清查数据计算得到全国森林总生物量为 $1.0666 \times 10^{10} t$,年生产力为 $3.33 \times 10^8 t^{[20]}$,三峡库区森林的总生物量为全国森林的 0.91%,年生产力为全国的 3.62%,而库区的面积仅占国土面积的 0.57%,由此可见,三峡库区无论是生物总量还是年生物产量都高于全国平均水平。

表 1 三峡库区总体生物量和生产力

Table 1 Total biomass and productivity of Three Gorges Reservoir Region

林分类型 Stand type	面积 Area ($\times 10^4 hm^2$)	乔木层生物量 Tree biomass ($\times 10^6 t$)	林分生物量 Stand biomass ($\times 10^6 t$)	乔木层生产力 Tree productivity ($\times 10^4 t a^{-1}$)	林分生产力 Stand productivity ($\times 10^4 t a^{-1}$)	乔木层平均生物量 Tree average biomass ($t hm^{-2}$)	林分平均生物量 Stand average biomass ($t hm^{-2}$)	乔木层平均生产力 Tree NPP ($t a^{-1} hm^{-2}$)	林分平均生产力 Stand NPP ($t a^{-1} hm^{-2}$)
乔木林 Arboreal forest	179.57	76.31	97.52	913.61	1205.44	42.50	54.31	5.09	6.71
灌木林 Shrubbery	81.39		15.20		457.22		18.68		5.62
经济林 Economic forest	11.43		4.69		72.12		41.01		6.31
总计 Total	272.39		117.41		1768.02		43.10		6.49

3.2 不同类型森林生物量与生产力比较

三峡库区植被丰富,分布面广,植被间由于自身的生理特性以及地理位置的差异其生长状况各有不同。根据所建立的库区植被数据库,统计各森林类型的生物量和生产力数据(表 2),统计中包括了所有龄级的植被。

各林分总体生物量的大小顺序为:马尾松林 $41.4 \times 10^6 t$ > 落叶阔叶林 $16.64 \times 10^6 t$ > 灌木林 $15.2 \times 10^6 t$ > 针阔混交林 $12.24 \times 10^6 t$ > 针叶混交林 $11.23 \times 10^6 t$ > 常绿阔叶林 $5.85 \times 10^6 t$ > 经济林 $4.69 \times 10^6 t$ > 柏木林

4. $17 \times 10^6 \text{t} > \text{杉木林 } 2.95 \times 10^6 \text{t} > \text{温性松林 } 1.76 \times 10^6 \text{t} > \text{竹林 } 1.26 \times 10^6 \text{t}$ 。在三峡库区灌木林面积最大,为 $81.396 \times 10^4 \text{hm}^2$, 占整个库区植被面积 29.88%。马尾松林分布的面积紧次于灌木林,达到了 $75.34 \times 10^4 \text{hm}^2$, 其生物总量占整个库区总生物量的 35.27%, 远高于其它林分, 竹林最少, 只有 1.08%。而单位面积生物量最高的则是常绿阔叶林, 达到了 85.60t hm^{-2} 。

表 2 三峡库区各类型植被生物量和生产力

Table 2 Biomass and productivity of different vegetation types of Three Gorges Reservoir Region

森林类型 Forestry type	面积 Area ($\times 10^4 \text{hm}^2$)	乔木层生物量 Tree biomass ($\times 10^6 \text{t}$)	林分生物量 Stand biomass ($\times 10^6 \text{t}$)	乔木层生产力 Tree productivity ($\times 10^4 \text{t a}^{-1}$)	林分生产力 Stand productivity ($\times 10^4 \text{t a}^{-1}$)	乔木层平均生物量 Tree average biomass (t hm^{-2})	林分平均生物量 Stand average biomass (t hm^{-2})	乔木层 NPP Tree NPP ($\text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2}$)	林分 NPP Stand NPP ($\text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2}$)
A	75.34	31.99	41.40	462.19	541.89	42.46	54.96	6.13	7.19
B	12.23	3.21	4.17	39.43	51.50	26.25	34.12	3.22	4.21
C	5.56	2.18	2.95	42.11	45.45	39.26	52.98	7.57	8.17
D	4.88	1.14	1.76	29.55	31.73	23.28	36.05	6.05	6.50
E	21.15	8.76	11.23	129.15	145.69	41.42	53.09	6.11	6.89
F	20.80	10.02	12.24	115.90	133.83	48.17	58.85	5.58	6.43
G	6.84	4.59	5.85	50.88	62.29	67.11	85.60	7.44	9.11
H	29.47	13.37	16.64	177.64	193.07	45.38	56.48	6.03	6.55
I	81.39		15.20	305.79	457.22	0.00	18.68	3.76	5.62
J	11.43		4.69		72.12	0.00	41.01		6.31
K	3.29	1.04	1.26	33.23	33.23	31.72	38.38	10.10	10.10
总计 Total	272.39	76.31	117.40	1385.87	1768.02	28.02	43.10	5.09	6.49

A: 马尾松林 Masson's pine forests, B: 柏木林 Cypress forests, C: 杉木林 Chinese-fir forests, D: 温性松林 Temperate pine forests, E: 针叶混交林 Coniferous mixed forests, F: 针阔混交林 Coniferous-deciduous mixed forests, G: 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests, H: 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forests, I: 竹林 Bamboo forests, J: 灌木林 Shrubbery, K: 经济林 Economic forests

各林分的 NPP 以竹林最高,常绿阔叶林次之,柏木林最低。具体大小顺序为:竹林 $10.10 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{常绿阔叶林 } 9.11 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{杉木林 } 8.17 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{马尾松林 } 7.19 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{针叶混交林 } 6.89 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{落叶阔叶林 } 6.55 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{温性松林 } 6.50 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{针阔混交林 } 6.43 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{经济林 } 6.31 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{灌木林 } 5.62 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2} > \text{柏木林 } 4.21 \text{t a}^{-1} \text{hm}^{-2}$ 。与生物量一样,马尾松林的年生产力也是库区最高,为 $541.89 \times 10^4 \text{t}$, 占整个库区乔木林年生产力的 32.59%, 其次是灌木林, $457.22 \times 10^4 \text{t}$, 温性松林最低, 只有 $31.73 \times 10^4 \text{t}$ 。

3.3 三峡库区植被生物量与生产力分布格局

3.3.1 水平分布格局

三峡库区东西横跨 7 个经度,南北相差 4 个纬度,区域内局部小气候显著,因此植被生物量和 NPP 分布差异较大。从整个区域来看(图 1,图 2),三峡库区植被平均生物量和 NPP 的分布格局都是东高西低,北高南低。特别是长江万州到重庆市区段北岸、整个重庆市区上游的库区范围内,植被的生物量和 NPP 都显著低于库区其它地方,这些地区将会给库区的生态安全造成很大的压力,对这些地区应加大改造力度。

从地理位置分析,植被的生物量分布和 NPP 数值较高的小班主要是分布以下 4 个区域:巫溪和兴山北部,特别是与神农架自然保护区接壤区域,其生物量和 NPP 都明显高于库区其它地方,应该成为库区以后的重点保护对象;秭归磨坪—巴东绿葱坡—巫山南部和武隆北部—涪陵南部—丰都—石柱南部这两个区域的生物量也非常高,NPP 仅次于巫溪和兴山北部,但其总体面积较大,是整个库区植被资源的重要储存地;另外,虽然江津南部四面山区域面积小,但其是库区上游少有的生物量分布相对集中、NPP 也比较高的区域,这可能与当地长期的森林保护有着密切的关系。

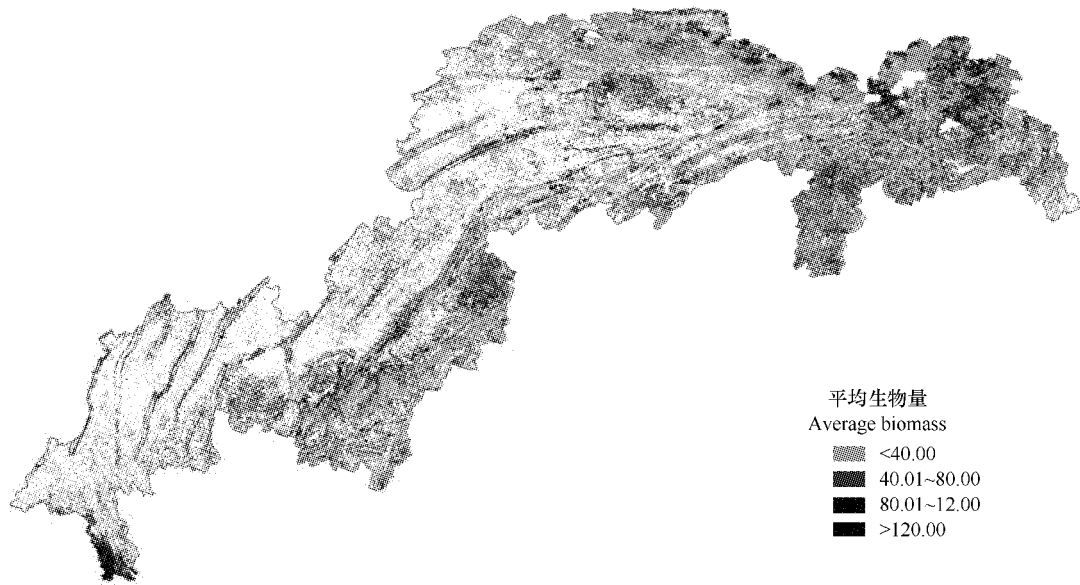


图1 三峡库区植被平均生物量分布图(t hm^{-2})

Fig. 1 Vegetation average biomass distribution of Three Gorges Reservoir Region (t hm^{-2})

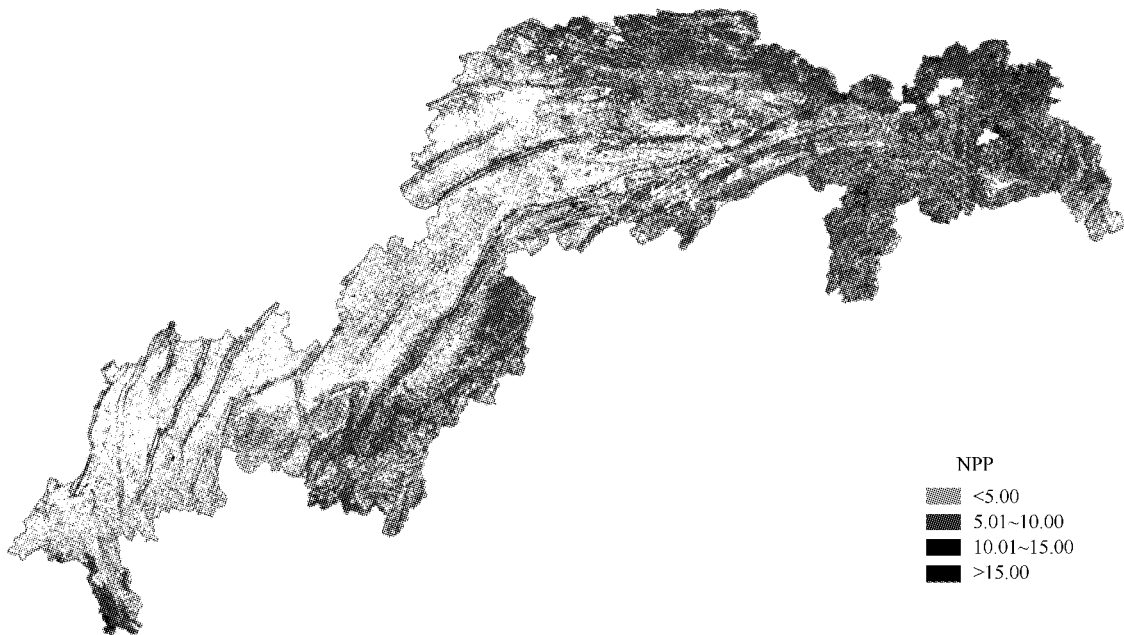


图2 三峡库区植被 NPP 分布图($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

Fig. 2 Vegetation NPP distribution of Three Gorges Reservoir Region ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

3.3.2 海拔分布格局

以海拔 300m 为界,往上每隔 300m 划分为一个等级,直到 2700m,而 2700m 以上区域由于面积太小,不做统计,所有 300m 以下区域算作一个等级,将整个库区植被(不包括灌木林和经济林)的生物量和生产力划分为 9 个海拔等级进行统计,结果见图 3。

随着海拔上升,库区森林植被的分布面积先增加后减少,在 900 ~ 1200m 海拔范围内达分布最广,达到 $4.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 2400 ~ 2700m 最少,只有 2106 hm^2 。低海拔区域植被分布面积不高主要是由于受库区居民的生活和生产活动影响较大。

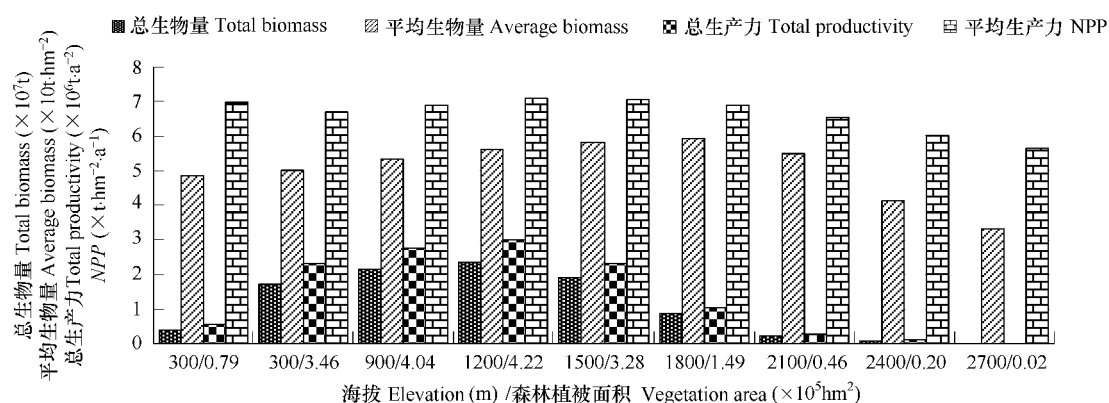


图3 三峡库区植被生物量和 NPP 的海拔等级分布

Fig. 3 Vegetation biomass and NPP distribution of Three Gorges Reservoir Region base on altitude

库区森林植被的总生物量和总生产力的海拔分布规律与面积相同,也都是先增加后减少。并都在 900 ~ 1200m 海拔范围内达到最大值 $2.37 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $2.98 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$,而在 2400 ~ 2700m 区段最低,分别仅为 $0.07 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $0.01 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ 。库区范围内,300 ~ 1500m 间森林植被的总生物量和总生产力分别为 $8.15 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $10.38 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$,占整个库区的 83.58% 和 83.83%,是库区森林植被分布最主要的区域。

森林植被平均生物量也是随着海拔的上升而先增加后减小,与总生物量不同,它是在 1500 ~ 1800m 范围内达到最大值 59.05 t hm^{-2} ,尽管这个区域植被的生长速度没有低海拔的快,但由于随着海拔升高,温度降低,这个区域植被枯落物的分解比低海拔地区更慢,这可能是形成这种分布的原因之一。

森林植被 NPP 的变化趋势与其它不同,随着海拔的上升先降低后增加最后又降低,最大值出现在 900 ~ 1200m,为 $7.07 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ 。而罗天祥对青藏高原的植被海拔分布研究认为,由于受热量条件随海拔升高而递减的限制作用,植被的生产量随海拔升高一般呈递减趋势^[12]。三峡库区这种与青藏高原不同的分布格局可能是由两个方面的原因造成:一方面可能是影响植被垂直分布的除了热量外还有其它生态因子;另一方面,低海拔地区虽然立地条件好,但在库区其人口密度同样非常高,这种强烈的人为活动也可能对植被的生产力造成一定的干扰。

4 结论与讨论

4.1 影响三峡库区植被生产力分布的因子

环境因子如气温、土壤状况、光照强度和大气组成等会通过影响植物的光合作用来调节植被 NPP。现在很多学者正是利用各种生态因子为参数来建立 NPP 预测模型,但这种以一个或者几个生态因子来预测整个区域范围内 NPP 的精度往往并不是非常高^[21~23]。如何准确的判断区域范围内影响 NPP 分布的主要因子还有待进一步的研究。周广胜等的研究认为,限制我国植被净第一性生产力的主要原因在于水分供应不足^[24~26]。罗天祥等认为,青藏高原植被的生产量随着海拔的升高一般呈递减趋势是对热量条件变化的具体体现^[27]。本文分析发现,三峡库区植被 NPP 没有出现全国那样明显的水平分布规律,在垂直分布上也与青藏高原有所差别。通过比较三峡库区年平均降雨量的分布格局发现,三峡库区植被 NPP 的分布与年降雨量分布格局比较相似(图 4),年平均降雨量是否为影响三峡库区植被 NPP 的分布具的主要因素还有待进一步论证。

另外,每个森林类型在海拔上都有独自的分布范围,不同植被在相同或相似的生境条件下其生产力也会有较大的差异,还有不同龄级植被在海拔上的分布规律等等因素,都会对三峡库区植被生物量和生产力的垂直分布产生一定的影响。因此,要想真正寻找出影响植被海拔生物量和生产力分布的原因,还需对以上因素进行更加深入的研究。

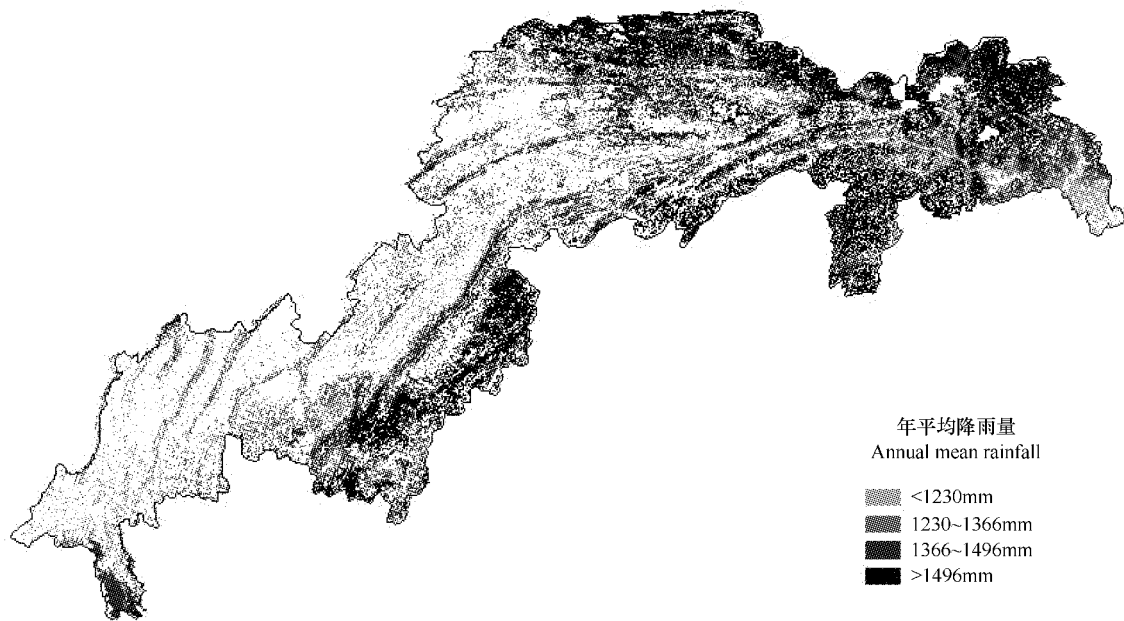


图4 三峡库区年平均降雨量分布图

Fig. 4 Annual mean rainfall distribution of Three Gorges Reservoir Area

4.2 结论

(1) 三峡库区森林面积 $1.82 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占整个库区面积的 33.25%。库区植被的总生物量为 $1.17 \times 10^8 \text{ t}$, 年生产力 $1.77 \times 10^7 \text{ t}$, 分别为全国森林的 0.91%, 年生产力为全国的 3.62%, 都高于全国平均水平。

(2) 在三峡库区灌木林面积最大, 为 $81.396 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占库区植被总面积的 29.88%。马尾松林其次, $75.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 但其生物总量最多, 占整个库区总生物量的 35.27%。常绿阔叶林单位面积生物量最高, 为 85.60 t hm^{-2} 。库区不同森林类型 NPP 的大小顺序为: 竹林 $10.10 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 常绿阔叶林 $9.11 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 杉木林 $8.17 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 马尾松林 $7.19 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 针叶混交林 $6.89 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 落叶阔叶林 $6.55 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 温性松林 $6.50 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 针阔混交林 $6.43 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 经济林 $6.31 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 灌木林 $5.62 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ > 柏木林 $4.21 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ 。

(3) 三峡库区植被平均生物量和 NPP 的分布格局都是东高西低, 北高南低, 与经纬度没有明显相关性。具体表现为, 巫溪和兴山北部的数值最高, 其次为秭归磨坪—巴东绿葱坡—巫山南部、武隆北部—涪陵南部—丰都—石柱南部和江津南部四面山等 3 个区域, 长江万州到重庆市区段北岸、整个重庆市区上游的库区范围内, 植被的生物量分布和 NPP 都显著低于库区其它地方。

(4) 随着海拔上升, 库区森林植被总生物量和总生产力都是先增加后减少, 并都在 900 ~ 1200m 达到最大值 $2.37 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $2.98 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$, 300 ~ 1500m 间的森林植被总生物量和总生产力分别为 $8.15 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $10.38 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$, 占整个库区的 83.58% 和 83.83%, 是库区森林植被分布最广和生长最好的区域。

森林植被平均生物量也是随着海拔的上升而先增加后减小, 在 1500 ~ 1800m 范围内达到最大值 59.05 t hm^{-2} ; 森林植被 NPP 则是先减少后增加最后又减少, 在 900 ~ 1200m 区段达到最大的 $7.07 \text{ t a}^{-1} \text{ hm}^{-2}$ 。

References:

- [1] Ciais P, Tans P P, Troler M J, *et al.* A large northern hemisphere terrestrial CO_2 sink indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 . *Science*, 1995, 269:1089—1102.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5:1—15.

- [3] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:74—88.
- [4] Xiao Q G, Chen W Y, Cheng Y W, *et al.* Estimating the net primary productivity in China using meteorological satellite data. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1):35—39.
- [5] Zhang X Z. Estimating and distribution of the vegetation net primary productivity in China. *Resources Science*, 1993, 1:15—21.
- [6] Zheng Y R, Zhou G S. A forest vegetation NPP model based on NDVI. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1):9—12.
- [7] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5):497—508.
- [8] Sun R, Zhu Q J. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1):36—45.
- [9] 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.
- [10] Peng S L, Guo Z H, Wang B S. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6):903—909.
- [11] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of casa model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5):603—608.
- [12] Luo T X, Li W H, Luo J, *et al.* A comparative study on biological production of major vegetation types on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6):823—831.
- [13] Chen L Z, Xie B Y, Xiao W F, *et al.* Organic carbon storage in soil under the major forest vegetation types in the Three Gorges Reservoir Area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 16(5):640—643.
- [14] Wang P C, Xiao W F, Zhang S G, *et al.* Study on soil infiltration in some main vegetation types in Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6):51—57.
- [15] Xiao W F, Lei J P. Studied on sustainable management and vegetation recovery in Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(2):138—144.
- [16] Xiao W F, Li J W, Yu C Q, *et al.* Terrestrial flora and fauna ecology in the Yangtze Three Gorges Reservoir. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2000, 5—11.
- [17] Cheng R M, Xiao W F, Li J W, *et al.* The preliminary research of forest vegetation classified system in the Three Gorges Reservoir Area. *Environment and Exploitation*, 1999, 14(2):4—8.
- [18] He J S, Wang Q B, Hu D. Studies on the biomass of typical shrubland and their regeneration capacity after cutting. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(6):512—520.
- [19] Zeng L X. Study on different vegetation types biomass and productivity in Three Gorges Reservoir Area. Master's degree dissertation. Huazhong Agricultural University, 2007.
- [20] Xiao X W. Study on forest biomass and productivity in China. Doctor's degree dissertation. Northeast Forestry University, 2005.
- [21] Myneni R, Williams D. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote sensing of Environment*, 1994, 49:200—211.
- [22] Prince C S, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. *J. Biogeogr*, 1995, 22:815—835.
- [23] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 1972, 9:747—766.
- [24] Sun R, Zhu Q J. Net primary productivity of terrestrial vegetation review on related researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6):757—760.
- [25] Zheng Y R, Zhou G S, Zhang X S. Sensitivity of terrestrial ecosystem to global change in China. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9):837—840.
- [26] Zhou G S, Zhang X S, Gao S H. Experiment and modeling on the responses of Chinese terrestrial ecosystems to global change. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9):879—888.
- [27] Luo T X, Li W H, Luo J, *et al.* Estimation of total biomass and potential distribution of net primary productivity in the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 1998, 17(4):337—344.

参考文献:

- [4] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的第一性生产力. *植物学报*, 1996, 38(1):35—39.

- [5] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. 资源科学, 1993, 1: 15 ~ 21.
- [6] 郑元润, 周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型. 植物生态学报, 2000, 24(1): 9 ~ 12.
- [7] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497 ~ 508.
- [8] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. 地理学报, 2000, 55(1): 36 ~ 45.
- [9] 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.
- [10] 彭少麟, 等. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. 生态学报, 2000, 20(6): 903 ~ 909.
- [11] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603 ~ 608.
- [12] 罗天祥, 李文华, 罗辑, 等. 青藏高原主要植被类型生物生产量的比较研究. 生态学报, 1999, 19(6): 823 ~ 831.
- [13] 陈亮中, 谢宝元, 肖文发, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤有机碳储量研究. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5): 640 ~ 643.
- [14] 王鹏程, 肖文发, 张守攻, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究. 水土保持学报, 2007, 21(6): 51 ~ 57.
- [15] 肖文发, 雷静品. 三峡库区森林植被恢复与可持续经营研究. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 138 ~ 144.
- [16] 肖文发, 李建文, 于长青, 等. 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. 5 ~ 11.
- [17] 程瑞梅, 肖文发, 李建文, 等. 三峡库区森林植被分类系统初探. 环境与开发, 1999, 14(2): 4 ~ 8.
- [18] 贺金生, 王其兵, 胡东. 长江三峡地区典型灌丛的生物量及其再生能力. 植物生态学报, 1997, 21(6): 512 ~ 520.
- [19] 曾立雄. 三峡库区不同植被类型生物量与生产力研究. 华中农业大学, 硕士论文, 2007.
- [20] 肖兴威. 中国森林生物量与生产力的研究. 东北林业大学, 博士论文, 2005.
- [24] 孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究. 应用生态学报, 1999, 10(6): 757 ~ 760.
- [25] 郑元润, 周广胜, 张新时. 中国陆地生态系统对全球变化的敏感性研究. 植物学报, 1997, 39(9): 837 ~ 840.
- [26] 周广胜, 张新时, 高素华. 中国植被对全球变化反应的研究. 植物学报, 1997, 39(9): 879 ~ 888.
- [27] 罗天祥, 李文华, 罗辑, 等. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布. 地理研究, 1998, 17(4): 337 ~ 344.