

中国典型森林生态系统净初级生产力与林龄关系的定量化分析

王绍强¹ 周蕾¹ 陈镜明² 冯险峰¹ 居为民³ 伍卫星¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所

2. 加拿大多伦多大学地理系

3. 南京大学国际地球系统科学研究所



提纲

1

研究背景

2

研究目的

3

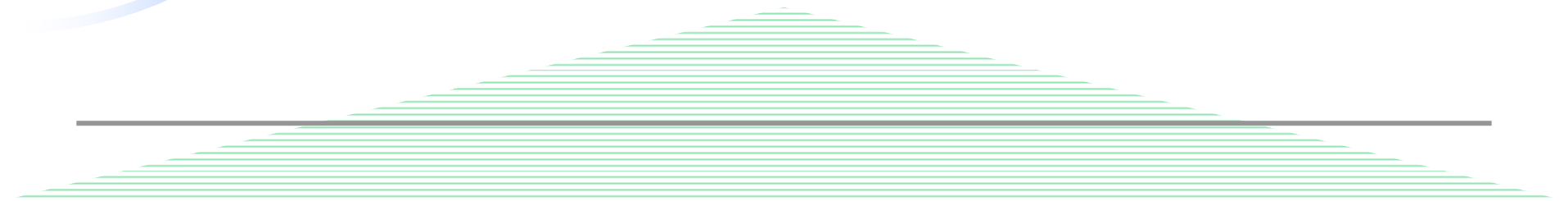
数据与方法

4

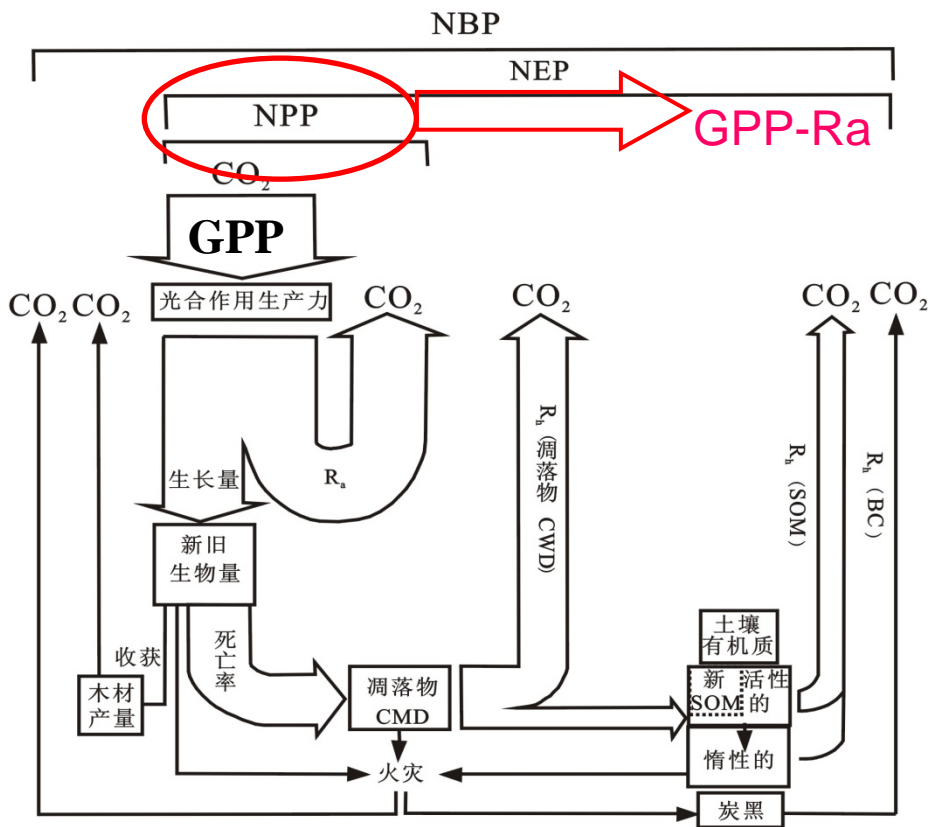
结果与分析

5

讨论



一、研究背景



森林生态系统NPP分别占了全球NPP和陆地生态系统NPP的35%和65% (Waring and Schlesinger, 1985; Gower et al., 1996)

温度

降水量

土壤含水量

CO₂浓度

云覆盖

温度的升高增加了光合作用效率以及提高养分利用效率而使全球NPP增加，也有可能降低土壤水分或者增加植被呼吸导致NPP降低

Melillo et al., 1993

干旱地区，降水量稀少导致土壤水分降低，从而导致NPP下降。

Melillo et al., 1993

土壤水分随着降水的增加而增加，是控制流域NPP增加的最关键因子

Tian et al., 1998

CO₂浓度升高导致全球NPP增加

Mu et al., 2008

云覆盖量的减少使得太阳辐射的增加，从而使得热带雨林森林生态系统NPP增加量占了全球增加量的42%

Nermani et al., 2003

但是

生态系统超过10年尺度净碳累积更多地依赖于干扰的影响而不是气候条件的变化 (Chapin et al., 2002)。各类自然和人为的干扰，例如火灾、病虫害、农林产品收获等都使得森林林龄发生变化。

林龄被认定为森林结构和功能的主要驱动因子 (Bradford et al., 2008), 并且许多研究发现森林林龄是决定生态系统碳储量和碳通量的关键因子 (Song et al., 2003)。

林分林龄或结构对森林碳循环
组分的重要影响

粗木质残体

林分耗水量

土壤碳

活生物量
增量及分解

NPP

NEP
NBP

生物物理
特性

国外NPP与林龄定量化分析

拟合非线性曲线

森林收获表

利用加拿大森林收获表重点研究了在不同立地指数下林龄对北方黑云杉NPP的影响，构建了两者的非线性函数并解释森林组分对于NPP变异的影响 (Chen et al, 2002)

拟合简单曲线

多站点

除净碳平衡随着林龄的增加而降低外所有组分都有不同程度的增加，其中地上部分的NPP呈现先增加后下降的趋势 (Bradford et al., 2008)

划分龄组

多个气候带

研究三个气候带（热带、温带、寒温带）森林生态系统NPP与林龄的关系，发现其中寒温带和温带森林生态系统NPP都随着林龄先增加后下降 (Pregitzer and Euskirchen, 2004)

物种单一


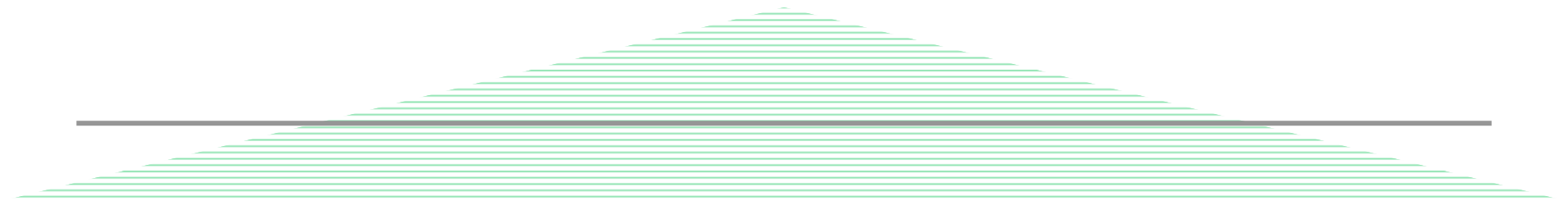
单一同龄林

单一物种的同龄林碳循环组分的林分发育情况，生物量的累积在40~60年达到最高值 (Pearson et al., 1987)

中国森林NPP与林龄的定量化分析

中国碳循环研究更多地侧重于陆地生态系统NPP时空分布以及对气候变化的响应

- ❖ Zhou (1995) 创建了基于生理生态特性和区域蒸散模型的自然植被NPP模型，并考虑了净辐射和降水是决定植被NPP的决定因子。
- ❖ Piao et al.(2005) 利用遥感NDVI数据驱动CASA模型模拟1982-1999年中国植被NPP的时空变异，结果表明研究时期内中国年平均NPP增长率为1.03%
- ❖ 结合过程模型CEVSA在0.5度空间分辨率的基础上模拟了中国陆地生态系统NPP及其对气候变异的响应(Cao and Woodward, 1998)。

- 
- ❖ Pan et al (2004)利用4622个森林测树样地以及793个发表文献收集样地 (Luo,et al., 1996), 计算了中国森林生态系统的固碳能力以及林龄结构变化对于碳汇的影响, 同时拟合了**生物量和林龄的函数关系**。结果表明**林龄结构大大影响了森林生物量, 而且对于不同的森林类型, 其年龄所对应的发育阶段并不相同。**
 - ❖ 森林清查资料提供估算碳库和通量的真实野外实测数据, 是森林碳循环研究重要来源, 并且在中国, 从20世纪70年代以来, 每五年进行一次森林清查, 提供森林面积、立木蓄积量等信息 (FRSC)。
 - ❖ 但是森林清查资料对亚洲国家很难获得, 特别是中国(Pan et al., 2004).
- 

二、研究目的

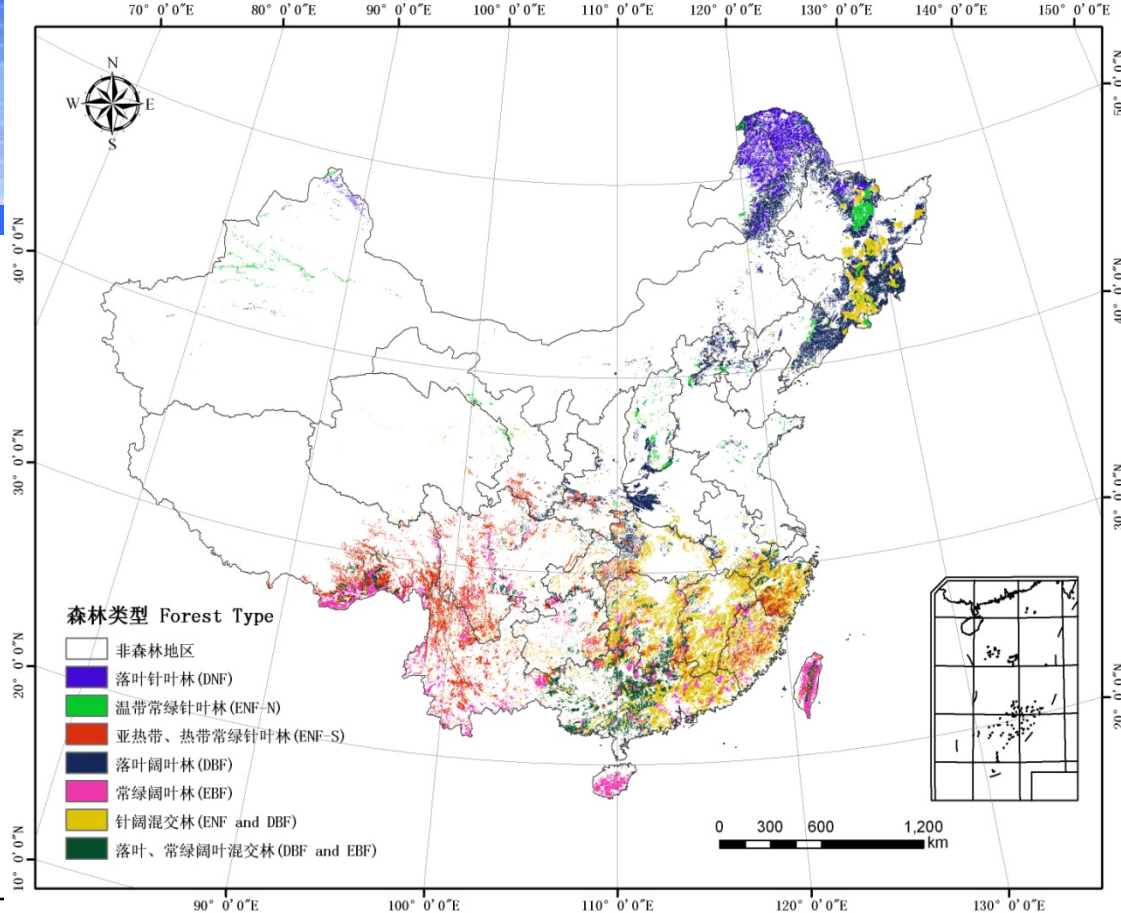
基于森林清查林龄实测资料，结合该年生态系统生产力过程模型BEPS（Boreal Ecosystem Productivity Simulator）模拟生成的森林生态系统NPP，分析森林NPP和林龄的定量化关系，并探讨InTEC模型中的NPP-AGE的函数形式的适用性，为研究中国陆地生态系统长时间尺度的碳源/碳汇格局分布提供服务。

三、数据和方法

- 土地覆盖类型
- BEPS-NPP
- 森林林龄

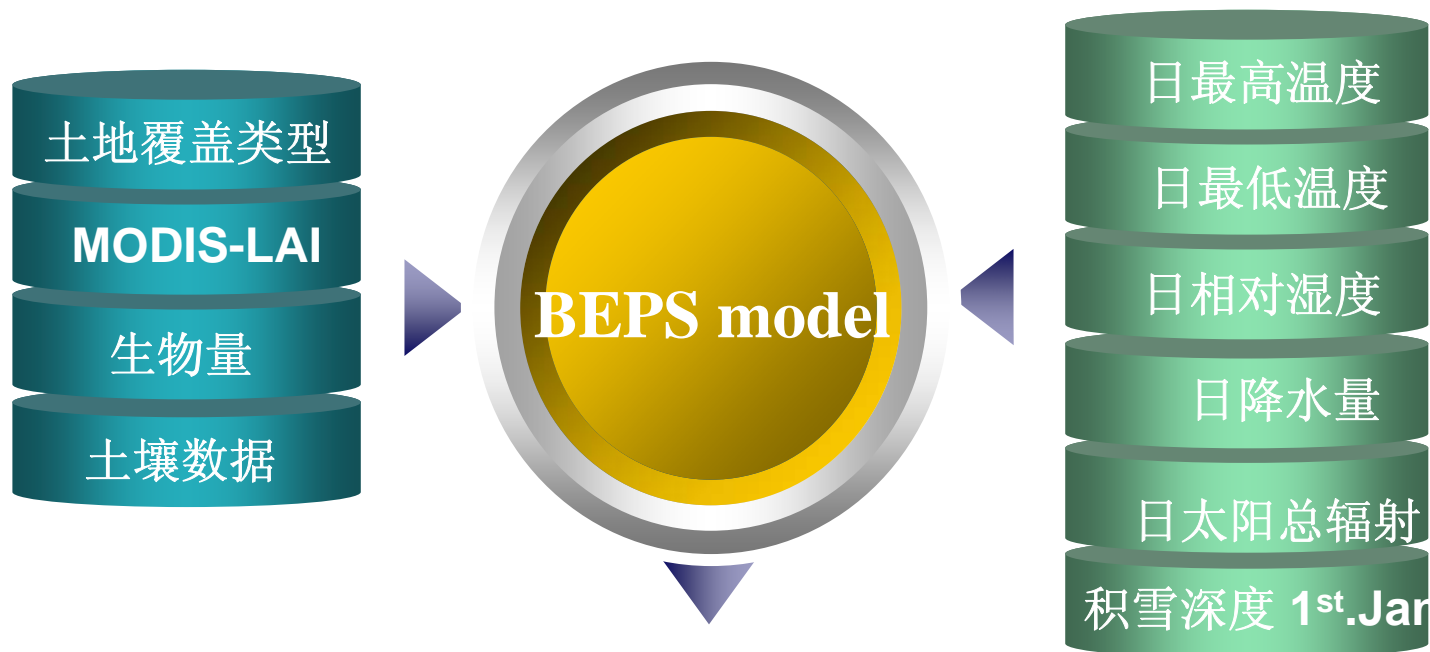
土地覆盖类型

2001年中国土地覆盖类型空间分布是通过TM解译得到的30m分辨率的土地利用数据和1:250万植被类型图融合而成（冯险峰，2007）。



编码 Code	类别 Class name	Pixel Count (1km ²)
1	落叶针叶林 Deciduous needle leaf forest (DNF)	112709
2	温带常绿针叶林 Evergreen needle leaf forest in temperature zone (ENF-N)	51531
3	亚热带热带常绿针叶林 Evergreen needle leaf forest in tropic zone and subtropics zone (ENF-S)	248903
4	落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest (DBF)	287622
5	常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest (EBF)	149728
6	针阔混交林 Mixed forest: ENF and DBF	406401
7	落叶常绿阔叶混交林 Mixed broadleaf forest : DBF and EBF	133904
总和		1390798

BEPS-NPP



2001年中国森林生态系统1-km
分辨率NPP

冯险峰 et al., 2007

森林林龄

- ❖ 2001年中国森林林龄空间分布图是由1989到1993年第四次全国32个省、市、自治区的森林普查数据得到（FRSC, 1994）。
- ❖ 本研究中，平均林龄根据每个省的多次森林调查结果得到。在每个省市中，假定该区域中的所有像元的林龄是正态分布的。
- ❖ 根据森林类型分布图，每一个森林像元的林龄为该像元所处的省市的平均森林林龄与其标准差和集合 $(-1, 1)$ 中的随机数乘积的和。而其中的标准差为每一个省市的样本数据计算得到（Wang et al., 2007）。

Chen (2002) 通过Ontario黑云杉长时间实测数据分析得到了NPP和林龄的定量化关系，并在区域尺度上应用时发展了半经验半机理方程（方程1）：

$$NPP(age) = A \left(1 + \frac{b \left(\frac{age}{c} \right)^d - 1}{e^{\frac{age}{c}}} \right) \quad (1)$$

其中系数A,b,c,d最初是基于立地指数 (Chen et al., 2002)，而后为了提高NPP-AGE函数的准确性，四个回归系数改进为年平均温度的经验函数 (Chen et al., 2003)。

处理流程

- 对**NPP、林龄、森林类型空间数据进行预处理**，去除了森林地区上没有NPP或者林龄数据的像元点，仅保留两者皆有的像元，使得NPP和林龄更好地匹配，
- 根据森林类型分布数据，**提取了每一种森林类型中每个像元的NPP及其对应林龄。**
- 对于不同的森林类型，把每一个林龄的全部NPP值作平均，得到NPP与林龄一一对应关系。
- 利用**Origin7.5统计软件中的非线性拟合工具**对每一种森林类型的NPP和林龄进行拟合，分别采用方程1和适合于实际数据的函数进行拟合和对比，**分析函数的有效性以及拟合曲线中NPP-age的变化特征。**

Luo's 森林数据库

罗天祥（1996）收集了1266个样地信息，计算并整理成统一的数据库，其中包括经纬度、海拔、森林类型、林龄以及森林各组分的生物量及对应的NPP。

分别提取了空间位置落在融合的森林类型图中的样点，并删除了森林类型不符合的点。

对于每一种森林生态系统拟合得到的NPP-AGE函数，提取得到实测样地的Luo-NPP和Luo-age对应数据，然后把Luo-age数据代入函数得到拟合NPP，从而与Luo-NPP进行对比，验证NPP-age函数的可靠性。

四、结果与分析

◆ BEPS-NPP 统计分析

◆ 森林林龄统计分析

◆ 几类典型森林生态系统NPP与林龄的拟合函数

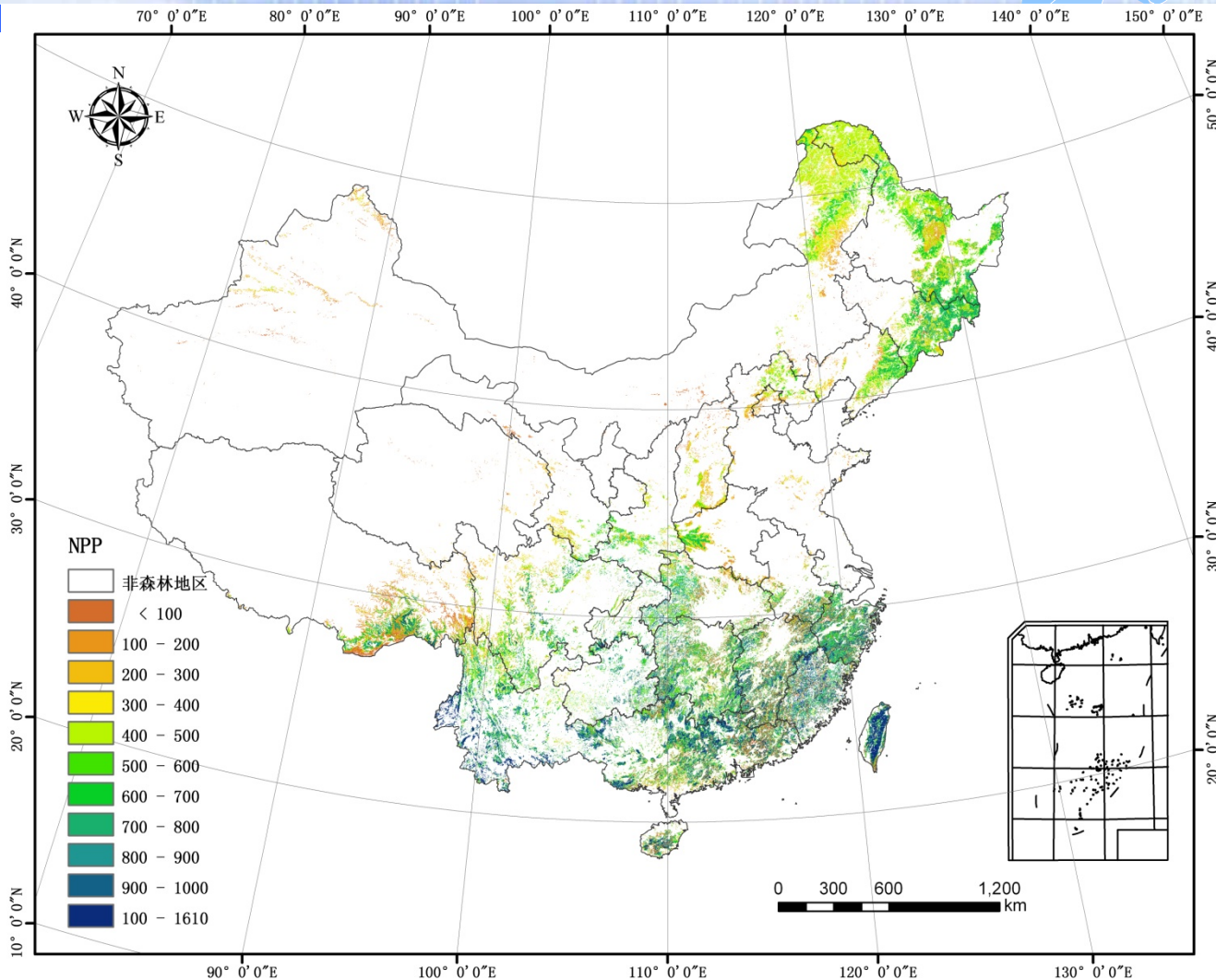
(落叶针叶林、亚热带热带常绿针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶常绿针阔混交林)

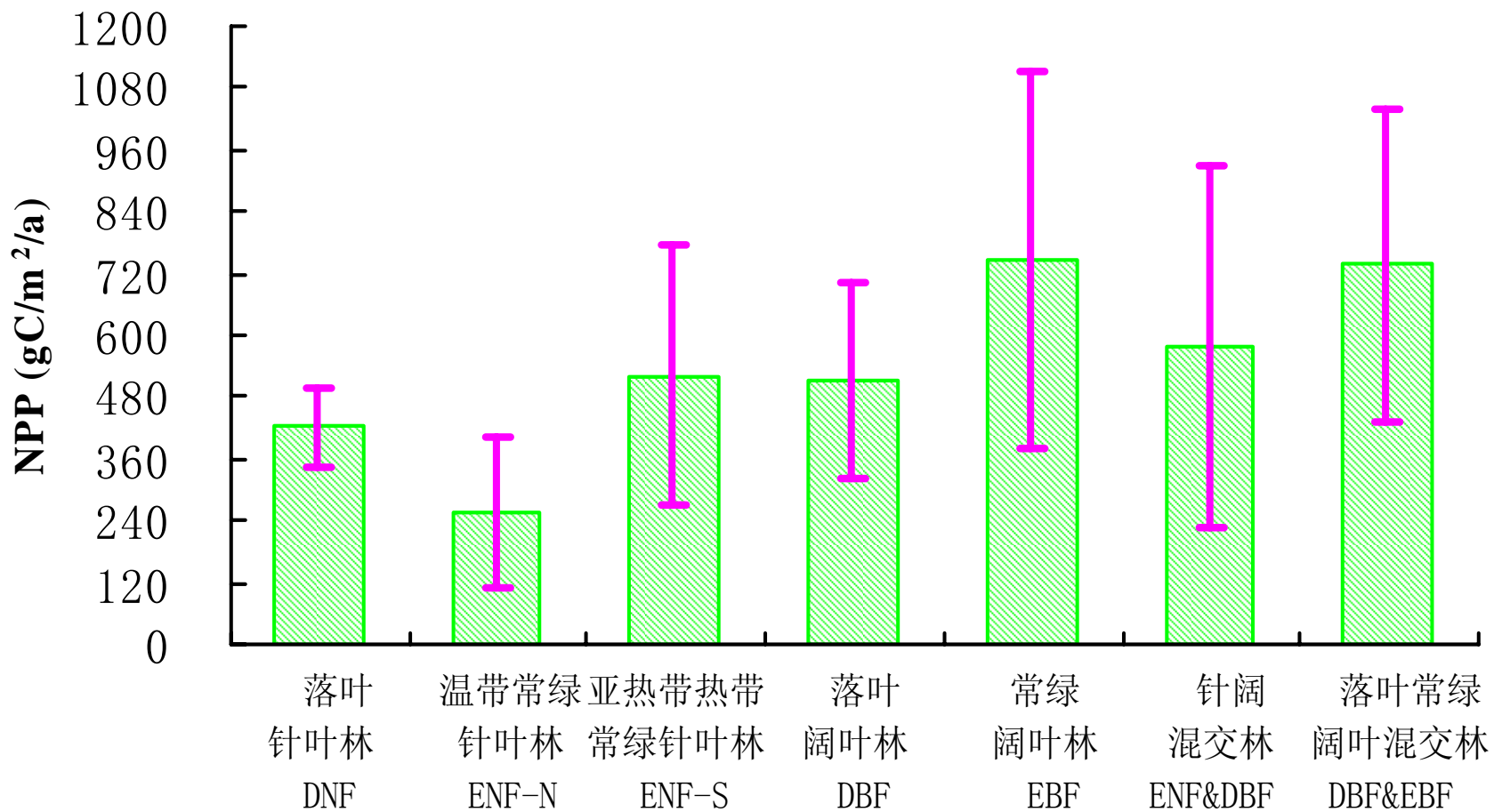
BEPS-NPP分析

◆ 2001年研究区域中森林生态系统年均NPP为 $561.70 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ，**年总NPP为 0.78 PgC/a** ，占整个陆地生态系统NPP总量的34.90%。

◆ 最大值为 $1610 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ，出现在海南岛的常绿阔叶林。较高NPP值 ($>1000 \text{ gC/m}^2/\text{a}$) 主要分布在云南、江西、海南岛以及台湾省；

◆ 而低于 $200 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 的NPP主要位于西藏东南地区以及东部分针叶林地区。



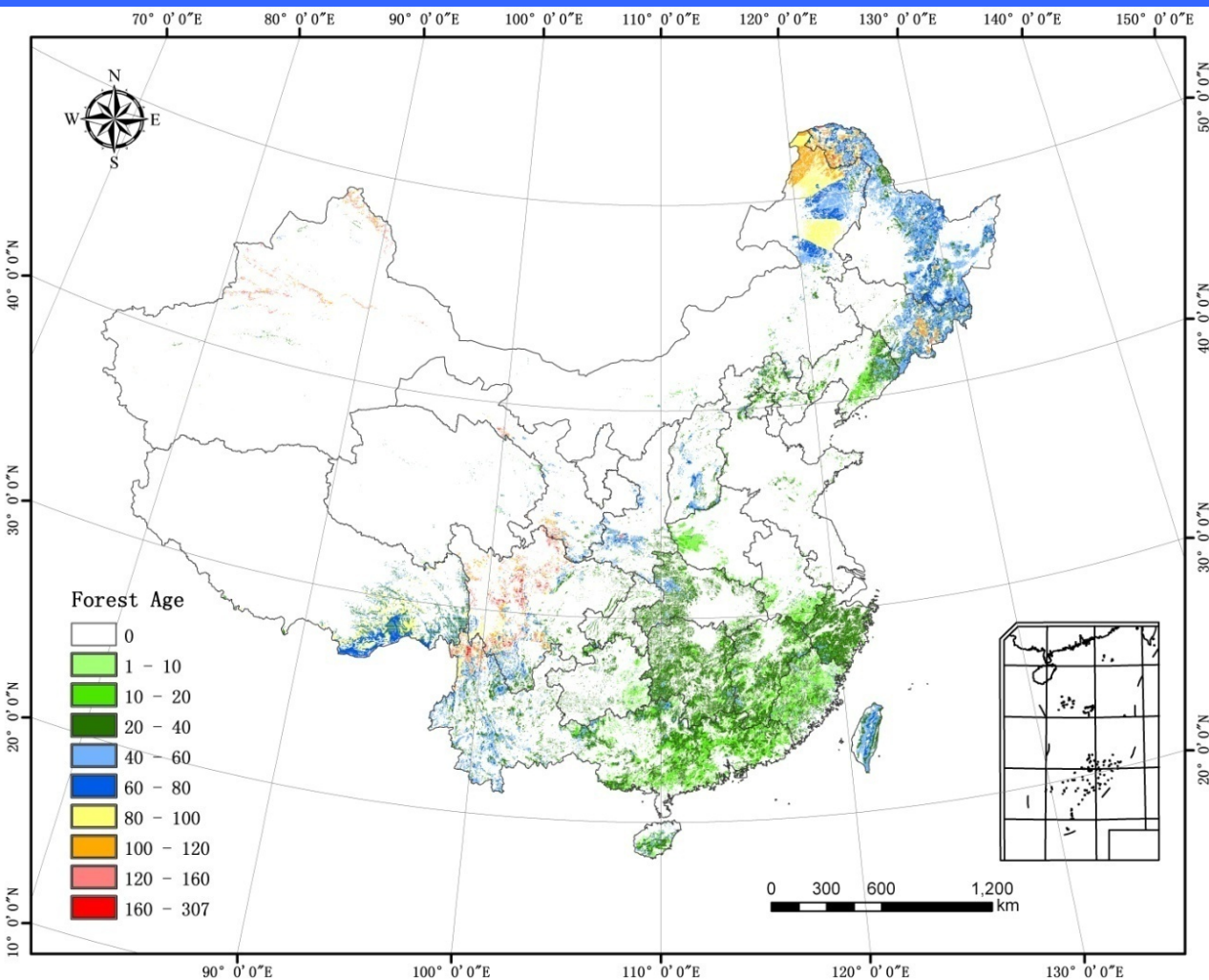


■ 各类阔叶林的生产力普遍优于针叶林。其中，常绿阔叶林的NPP是所有森林类型中最高的，达到747.29 gC/m²/a，接近于温带常绿针叶林的3倍；

■ 亚热带热带常绿针叶林的NPP远远高于温带常绿针叶林，而与落叶阔叶林非常接近。针阔混交林平均NPP为575.49 gC/m²/a，位于针叶林与阔叶林之间。

■ 落叶常绿阔叶混交林也是各类森林中生产力最丰富的类型之一。

森林林龄分析



东南地区的森林林龄比较小，多为1~40年之间，同时也是整个森林生态系统生产力最高的地区。

大于120年的森林主要分布在四川地区。

东北森林地区的林龄介于上述两者之间，主要集中在40~120年，从其西部的100~120年过渡到东部的40~60年

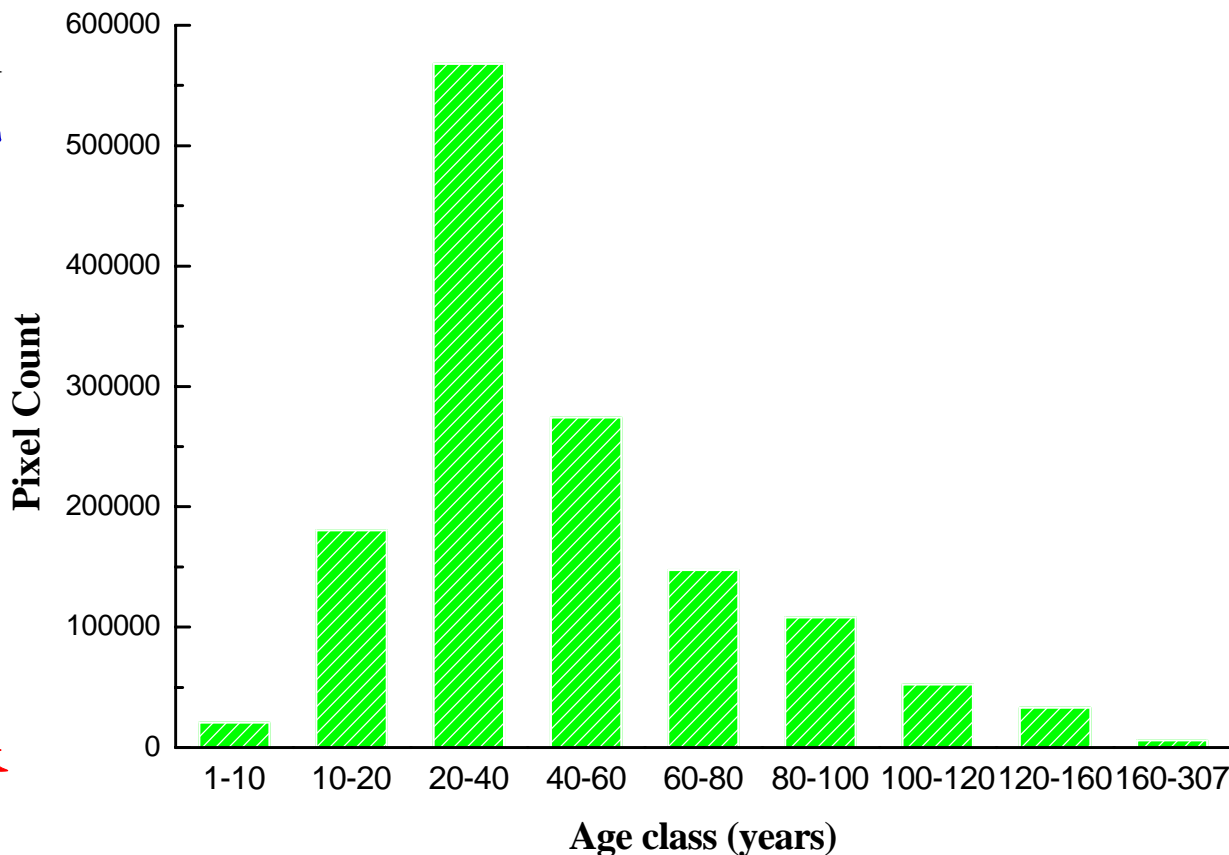


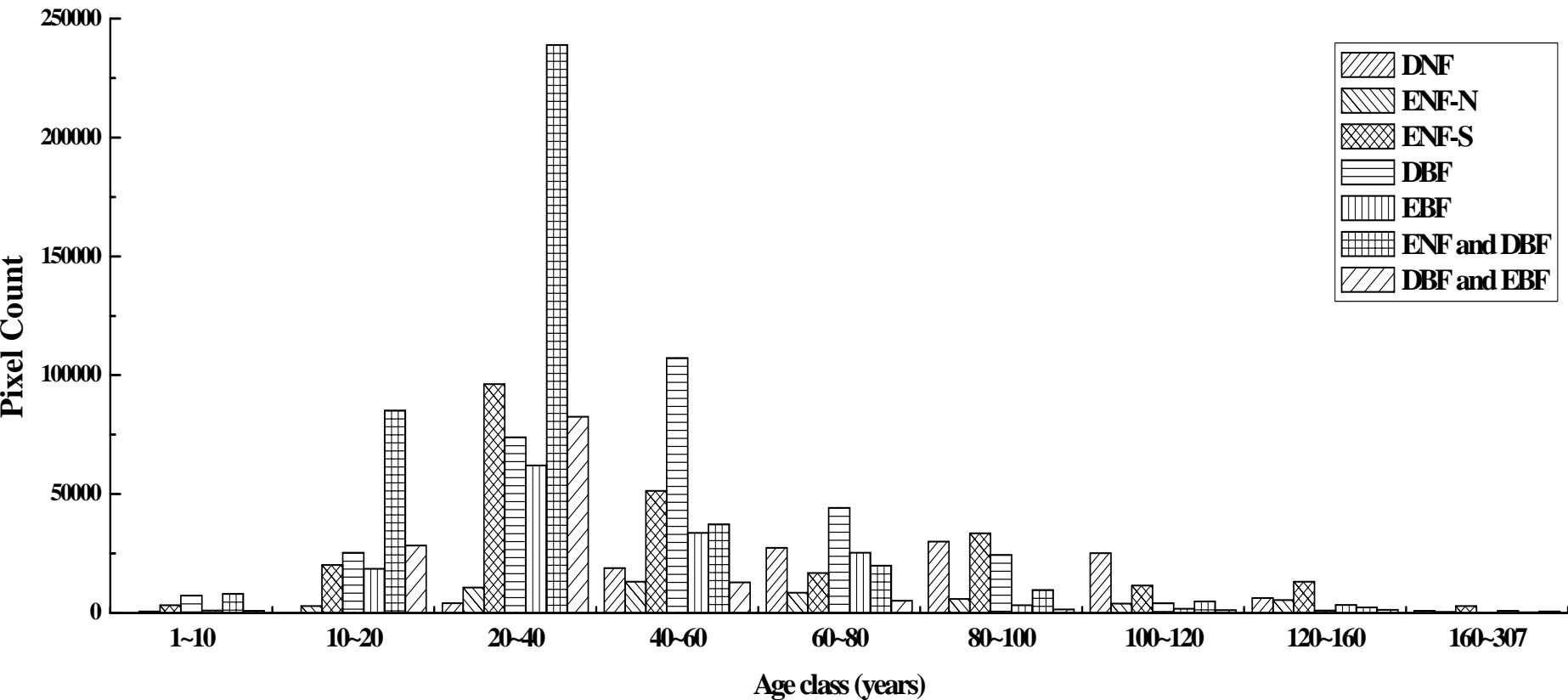
◆ 从所有森林生态系统年龄组柱状图可以看出各类森林龄级各自所占面积有很大的差异，**呈现单峰非正态分布**。

◆ 其中**20~40年森林面积最大**，达到56.82万平方公里，是40~60年森林面积的两倍左右，占有森林面积的40.86%；

◆ 大于160年的森林面积仅占0.44%。

◆ 总体来说，**10~80年之间的森林面积占了总面积的84.15%**，说明中国绝大多数森林都比较年轻，主要为幼龄林、中龄林、近熟林。





- ❖ 各类森林生态系统的林龄结构有很大差异, **针阔混交林中20~40年森林面积最大**, 大大超过了其他森林类型。
- ❖ **落叶阔叶林中40~60年的森林占据其主要的部分**, 有别于亚热带热带常绿针叶林、常绿阔叶林以及落叶常绿阔叶林等面积最大的龄组为20~40年的森林。
- ❖ 温带常绿针叶林各龄级所占的比重都较小, 多数都在1万平方公里以下。
- ❖ **落叶针叶林林龄**分布与上述几类有所不同, 年龄结构偏向成熟林, 森林林龄主要集中在80~100年。

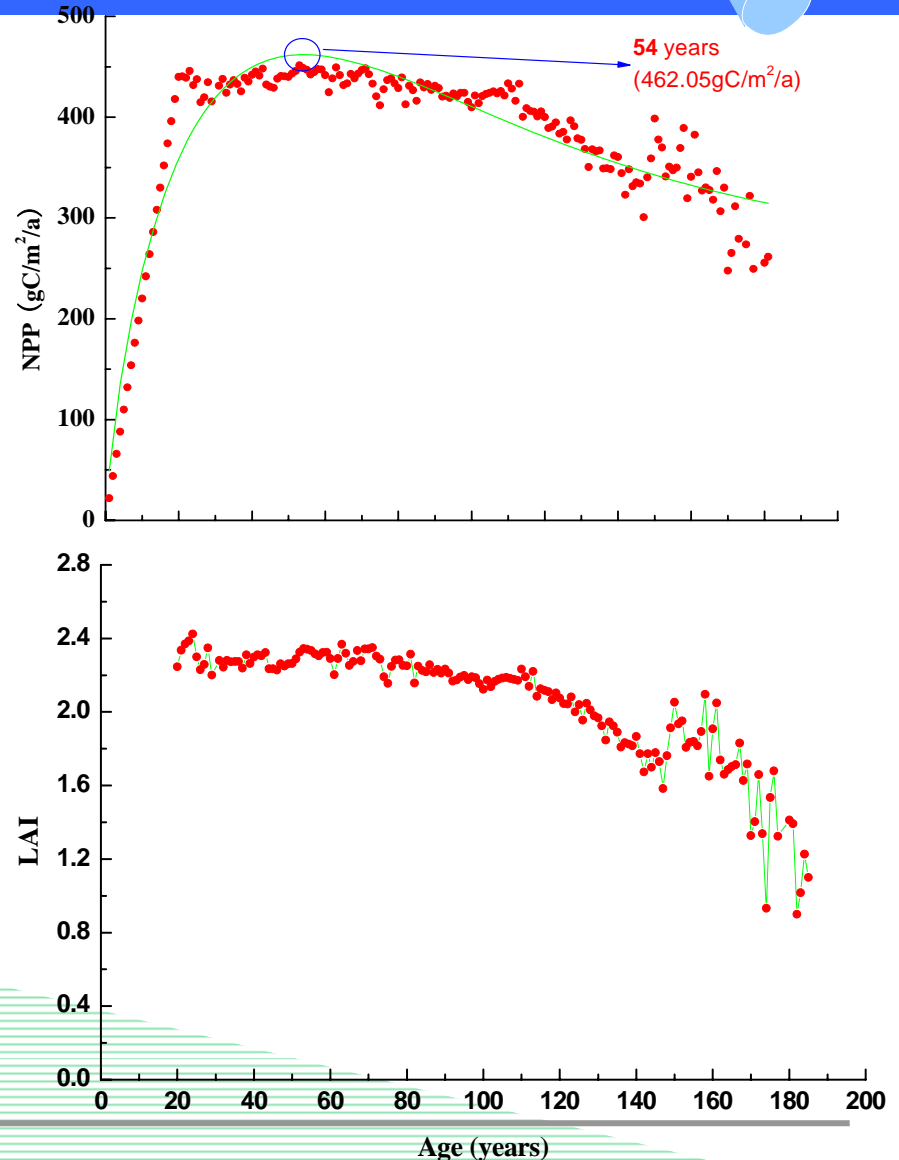
几类典型森林类型NPP与林龄的拟合函数

落叶针叶林

落叶针叶林实测年龄有效值为20~181年。1~19年森林植被NPP采用简单的线性插值得到，当林龄等于0时，该项也设为零。

$$NPP(age) = 265.72 \left(1 + \frac{3.00 \left(\frac{age}{50.32} \right)^{0.74} - 1}{e^{\frac{age}{50.32}}} \right)$$

$$(R^2 = 0.90)$$

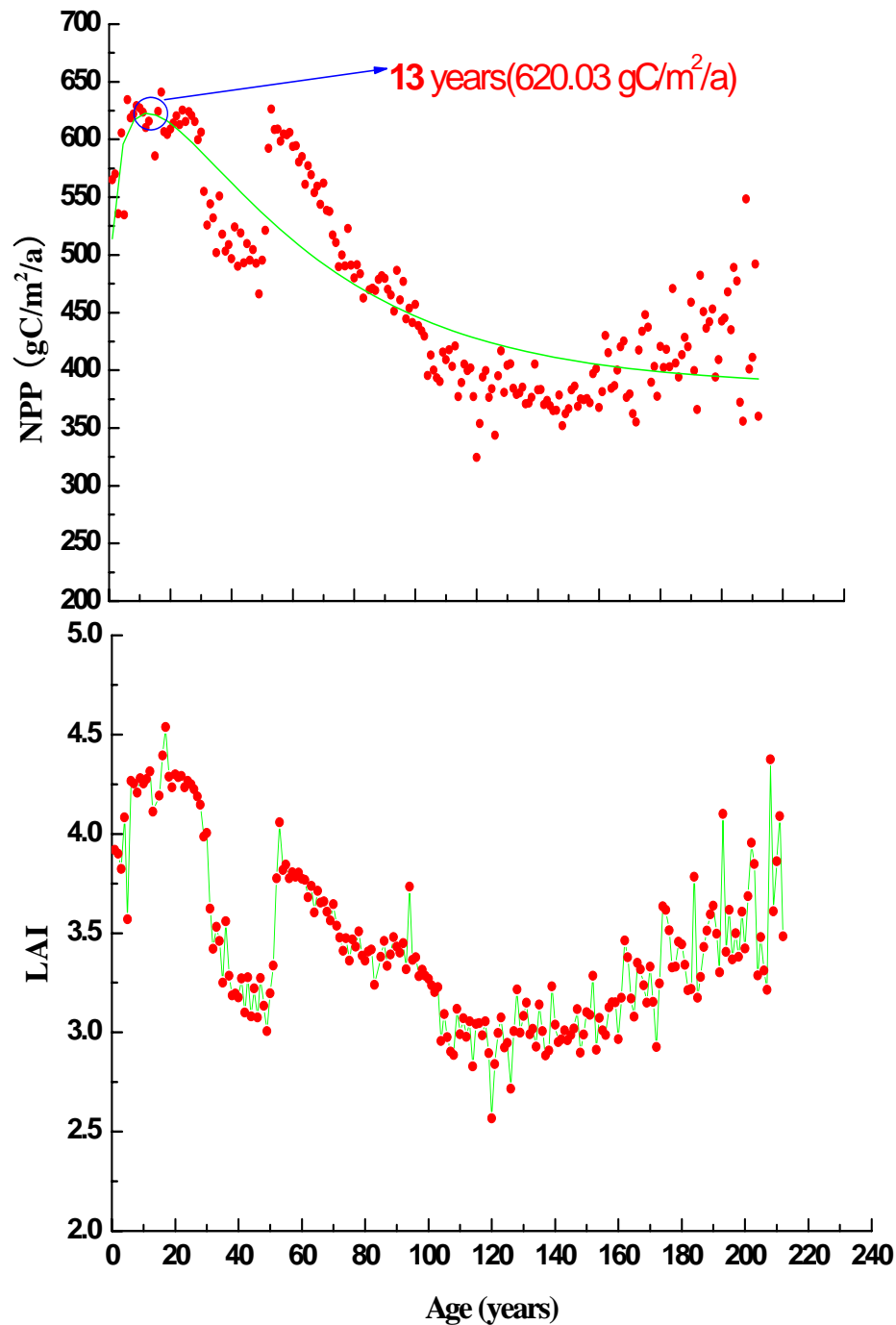


亚热带热带常绿针叶林

亚热带、热带常绿针叶林林龄的有效值主要集中在1~212年。

$$NPP(age) = 385.92 \left(1 + \frac{2.10 \left(\frac{age}{47.58} \right)^{0.12} - 1}{e^{\frac{age}{47.58}}} \right)$$

$$(R^2 = 0.75)$$

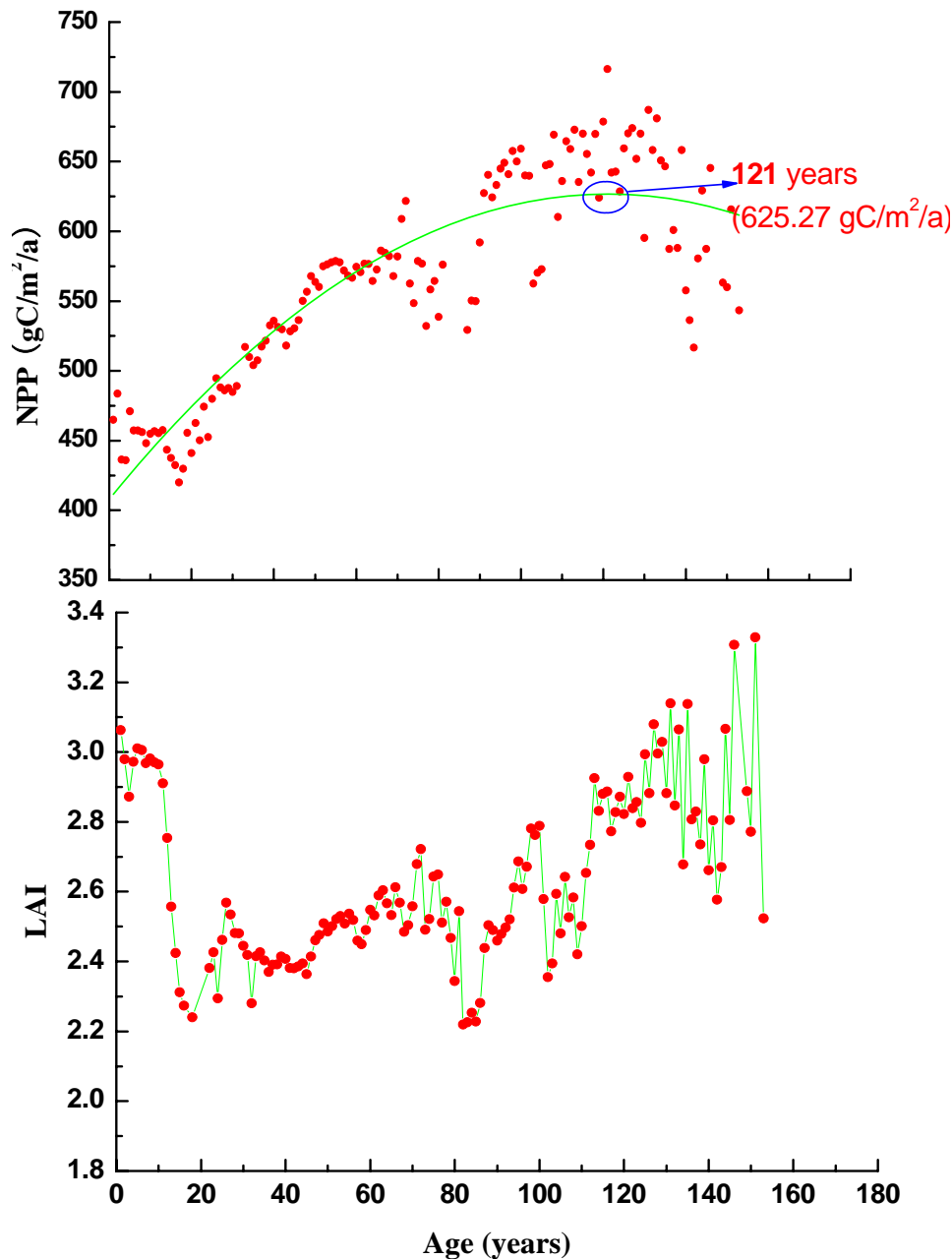


落叶阔叶林

落叶阔叶林的林龄有效值集中在1~153年。从NPP随林龄变化趋势可以发现，落叶阔叶林的NPP与林龄的关系并不符合方程1，而更加倾向于一元二次函数。

$$NPP(\text{age}) = 408.07 + 3.61\text{age} - 0.015\text{age}^2$$

$$(R^2 = 0.79)$$

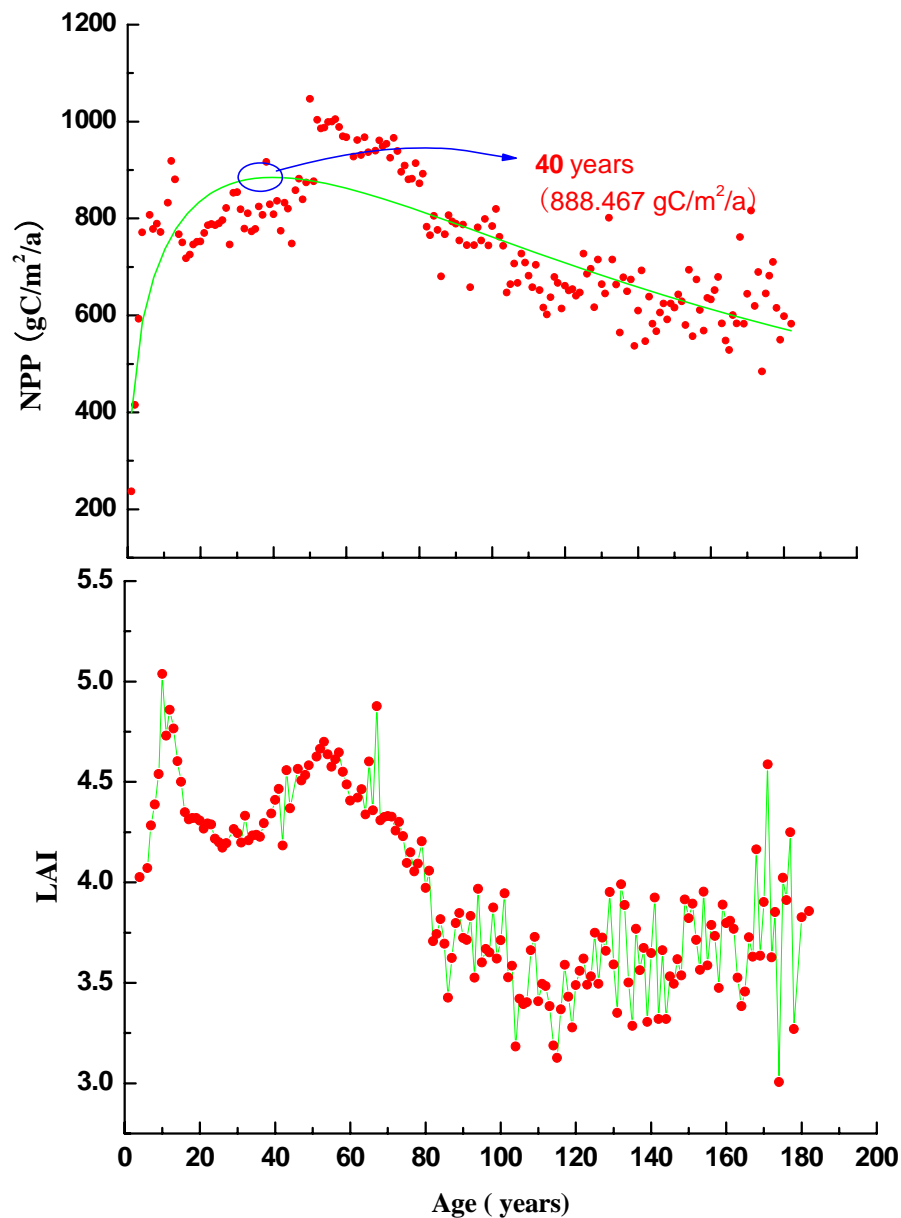


常绿阔叶林

常绿阔叶林实测林龄数据的范围是4~182年，其中空缺的1~3年的NPP由线性插值的NPP填补。

$$NPP(age) = 365.60 \left(1 + \frac{4.12 \left(\frac{age}{91.57} \right)^{0.30} - 1}{e^{\frac{age}{91.57}}} \right)$$

$$(R^2 = 0.66)$$

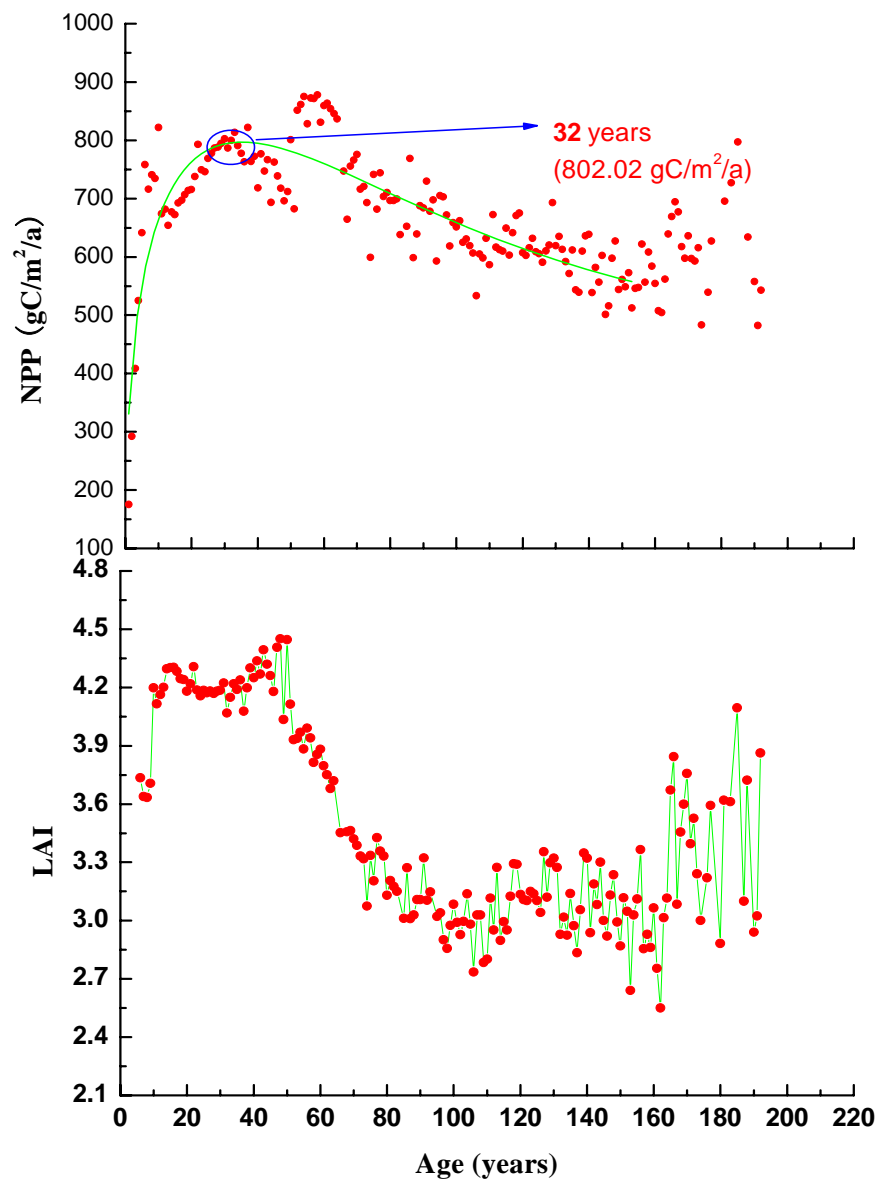


落叶常绿针阔混交林

落叶、常绿针阔混交林林龄范围是6~192年，其中空缺的1~5年的NPP由线性插值的NPP填补。

$$NPP(age) = 561.65 \left(1 + \frac{2.13 \left(\frac{age}{40.23} \right)^{0.39} - 1}{e^{\left(\frac{age}{40.23} \right)}} \right)$$

$$(R^2 = 0.67)$$



五、讨论

1) 与其他研究成果的比较

每一种森林生态系统拟合NPP与Luo-NPP的回归分析以及相差百分比

Forest type	Plot Number	Linear regressive equation	R ²	Probability	Difference percentage
DNF	11	$NPP_{mod} = 0.365NPP_{obs} + 253.967$	0.371	0.047*	8.5%
ENF-S	82	$NPP_{mod} = 0.189NPP_{obs} + 376.608$	0.331	0*	-4.07%
DBF	100	$NPP_{mod} = -0.036NPP_{obs} + 566.819$		0.067	-12.04%
EBF	25	$NPP_{mod} = -0.019NPP_{obs} + 883.987$		0.292	-4.96%
Mixed broadleaf forest	55	$NPP_{mod} = 0.011NPP_{obs} + 756.650$		0.496	3.69%

* P<0.05, significantly

Difference percentage = (NPP_{mod} - NPP_{obs}) / NPP_{obs} * 100%

Wang (2007) 研究中国1901~2001年森林碳源/碳汇情况时，因为缺乏森林NPP以及立地指数的长时间观测资料，在InTEC模型应用NPP-age的定量化函数时采用了加拿大实测资料模拟的回归函数，并把不同的森林生态系统采用了相同的回归系数，如下方程所示：

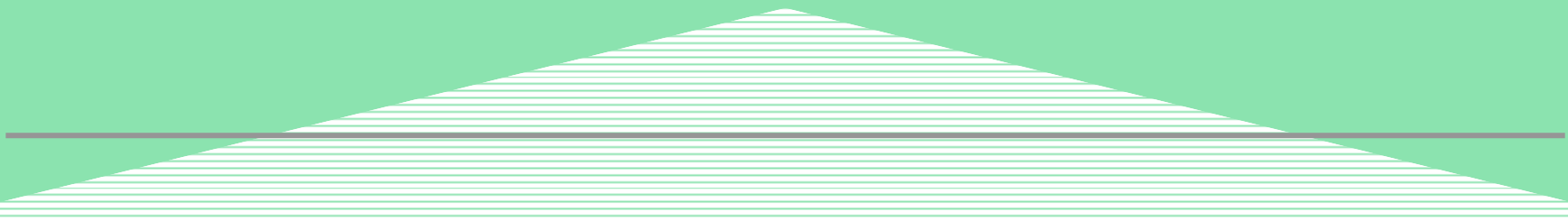
$$NPP(age) = 156 \left(1 + \frac{2.0 \left(\frac{age}{25} \right)^{1.9} - 1}{e^{\left(\frac{age}{25} \right)}} \right) \quad (2)$$

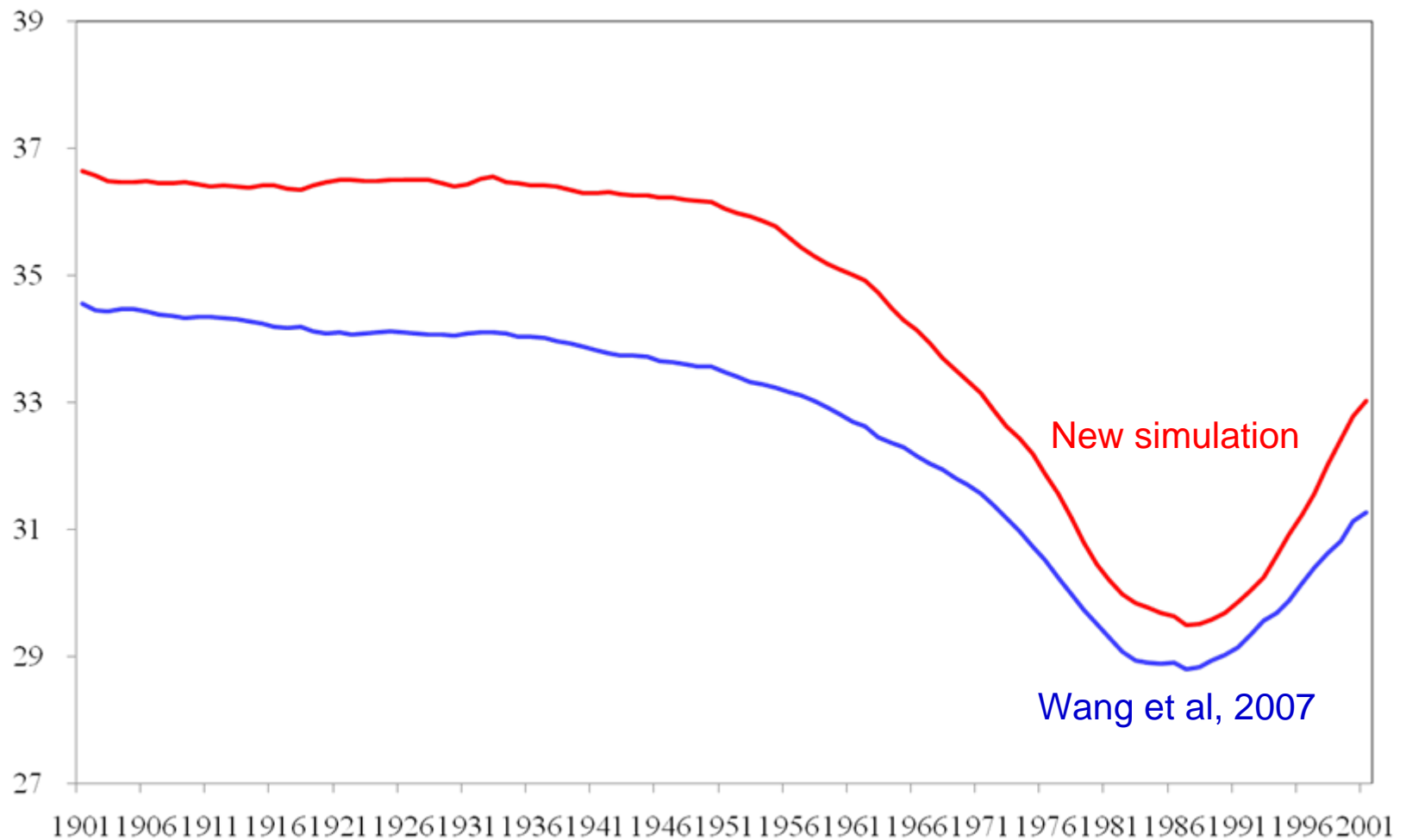
本研究中，所有的森林生态系统的平均NPP与树龄的拟合方程：

$$NPP(age) = 324.02 \left(1 + \frac{3.12 \left(\frac{age}{101.35} \right)^{0.25} - 1}{e^{\left(\frac{age}{101.35} \right)}} \right) \quad (R^2 = 0.82) \quad (3)$$

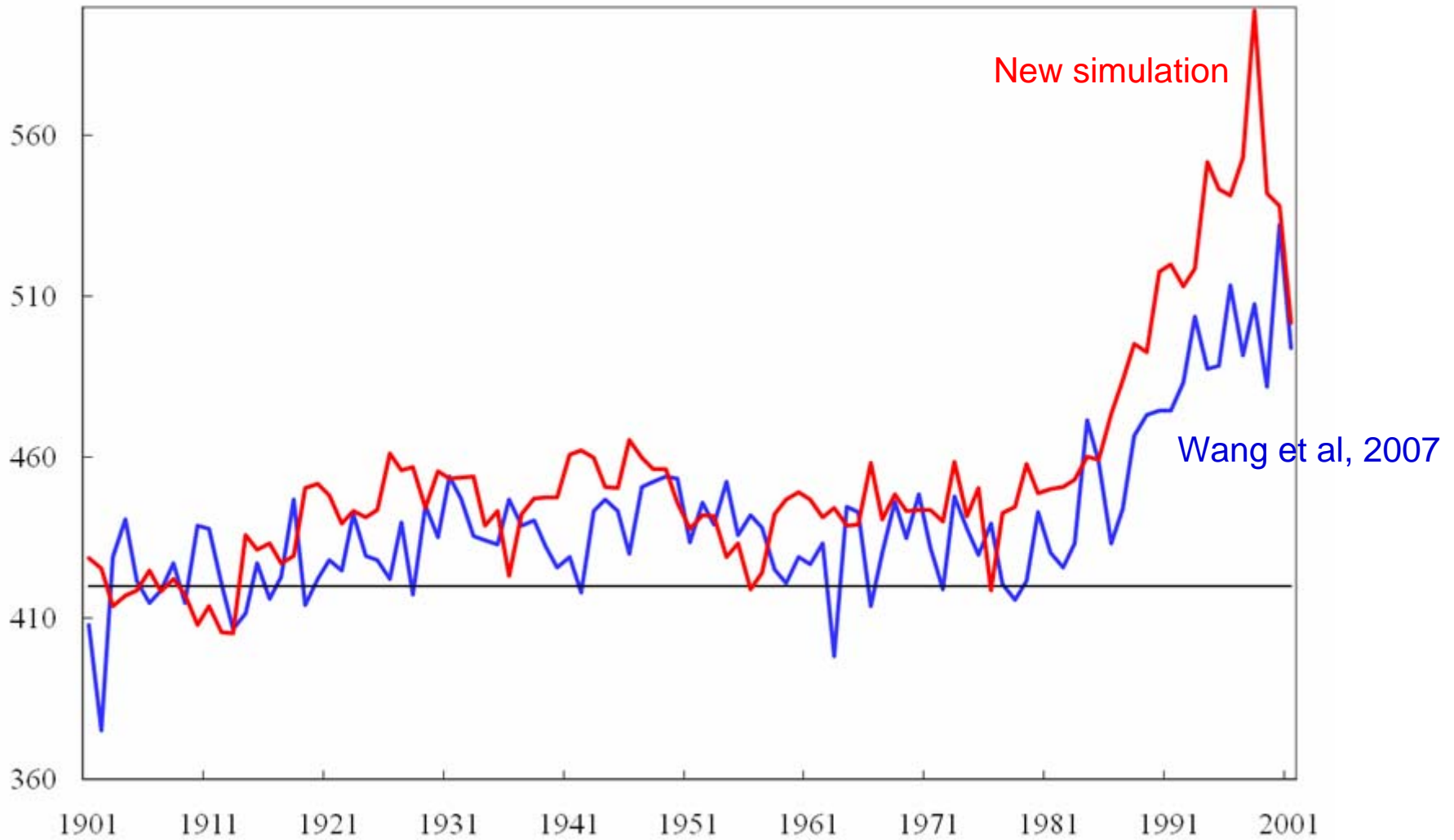


中国森林生态系统碳源/碳汇时空分布对比





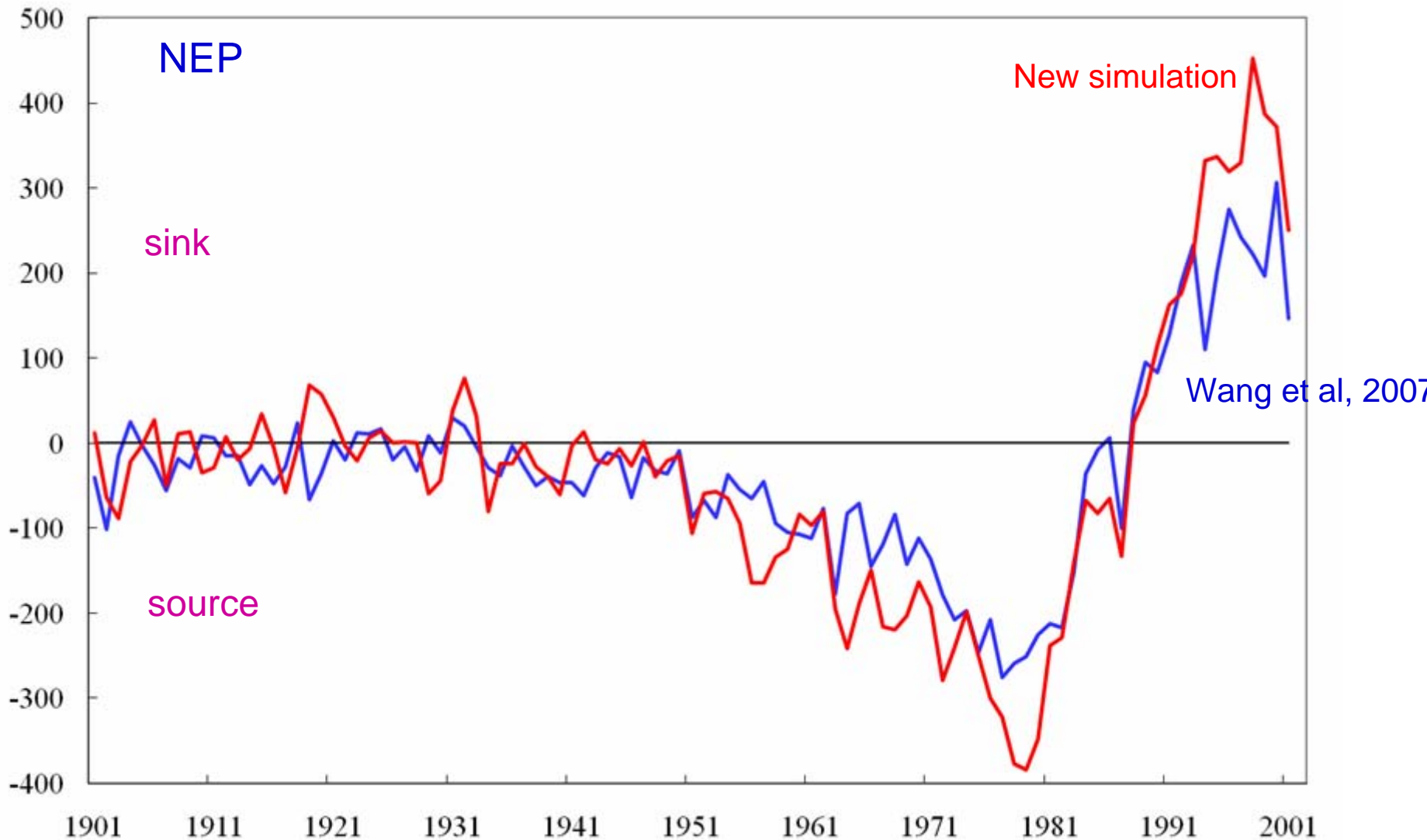
	Wang et al.(2007)		C pool	This study	
1901-1949	34.10	0.07 (S.D.)	Pg	36.41	0.03(S.D.)
1950-1987	31.48	0.53		33.21	0.74
1988-2001	29.92	0.48		30.96	0.70
1901-2001	32.53	0.41		34.45	0.53



	Wang et al., 2007		NPP	This study	
			$\text{g/m}^2\text{yr}^{-1}$		
1901-1949	420.94	4.24		430.31	4.90
1950-1987	435.46	4.62		444.91	3.67
1988-2001	487.32	12.60		529.26	17.15
1901-2001	440.49	4.97		454.49	6.96

中国三个时期内（1901-1949，1950-1987 和1988-2001）
的森林地上生物量、土壤有机碳、凋落物以及根总碳库

	Wang et al.,2007				New simulation			
	1901-1949 (PgC)	1950-1987 (PgC)	1988-2001 (PgC)	Total (PgC)	1901-1949 (PgC)	1950-1987 (PgC)	1988-2001 (PgC)	Total (PgC)
SOC	-0.11	0.29	-0.80	-0.61	0.10	0.46	-0.90	-0.34
Aboveground	-0.70	-4.22	2.48	-2.44	-0.50	-5.36	3.31	-2.54
Litter	-0.10	-0.27	-0.19	-0.56	0.05	-0.38	-0.25	-0.58
Roots	-0.12	-0.57	0.98	0.29	-0.11	-1.39	1.37	-0.14
Total	-1.02	-4.77	2.47	-3.32	-0.46	-6.67	3.53	-3.60



	Total	Tg/yr		NEP	Total	Tg/yr	
1901-1949	-1029.32	-21.01	± 7.83	Tg	-462.77	-9.44	± 10.18
1950-1987	-4767.97	-125.47	± 25.32		-6672.34	-171.09	± 31.28
1988-2001	2474.31	176.74	± 44.79		3535.97	252.57	± 74.69
1901-2001	-3322.99	-32.90	± 22.28		-3599.14	-35.64	± 31.47

2) NPP随林龄变化的特征

- 所有森林平均NPP与林龄的拟合方程得到的 R^2 要优于单一森林生态系统的拟合效果（除了落叶针叶林）。
- 四种森林类型的NPP-age的拟合方程符合方程1，但回归系数各有不同。因此，如果用相同回归系数应用到所有的森林生态系统来研究区域碳循环必然会产生很大的误差。
- 选用单一的函数形式也是不可取的。落叶阔叶林NPP与林龄的关系并不符合方程1，而在一元二次方程更为接近。
- 在森林生长发育过程中，NPP随林龄的变化与MODIS-LAI的趋势很好地吻合，而大多数森林类型的NPP出现最大值的时期也是LAI出现最大值，这表明LAI是表征NPP随林龄变化的关键森林结构因子。

3) 不确定性

- 研究表明BEPS模型模拟的森林NPP要高于实测NPP，相对误差8.6%，两者的相关系数达到0.90 (Sun, 2004)。虽然BEPS-NPP被高估了，但这并不影响NPP和林龄的函数形式，仅导致回归系数有一定的差异。
- **森林林龄定义为树龄的平均**。本研究中，实测树龄数据被认为是1km像元的平均林龄，也就是林分林龄。因此，林龄的不确定性主要来源于数据获取的困难。而研究表明由最大树龄或者平均树龄得到的林龄都将会高估幼龄林或者低估老龄林的林龄 (Broadford, et al., 2008)。
- **所有的森林生态系统100年后NPP的波动非常大**。森林NPP一般300年后将会达到比较稳定的状态 (Song, et al., 2003)。而本研究中实测林龄的最大值为212年，因此无法得知200年以后的NPP变动。特别，对于落叶阔叶林NPP最大值出现在140年，一方面原因在于140年以后的样点非常少，仅占全部该森林的3.1%，另一方面缺少老龄林的野外调查数据

谢谢!

