

引用格式:李建国,王欢,王净,等. 基于线性拟合的城市化过程对陆地生态系统生产能力的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 32-43. [Li J G, Wang H, Wang J, et al. Impact of urbanization on terrestrial ecosystem production using Linear Modeling for Jiangsu[J]. Resources Science, 2018, 40(1): 32-43.] DOI: 10.18402/resci.2018.01.04

基于线性拟合的城市化过程对陆地生态系统 生产能力的影响 ——以江苏省为例

李建国^{1,2}, 王欢¹, 王净¹, 李强¹, 张忠启¹, 刘丽丽¹, 濮励杰^{3,4}

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116;

2. 萨塞克斯大学全球研究院地理系, 英国 布莱顿 BN1 9RH;

3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

4. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023)

摘要: 陆地生态系统生产能力是区域生态系统服务的基础。城市化过程已经成为区域陆地生态系统生产能力损失的重要影响因素。借助遥感与地理信息技术估算区域的净初级生产力(NPP)、分析城市化过程对于定量评估城市化过程造成的区域陆地生态系统生产能力损失具有重要意义。本研究以城市化进程较快的江苏省为例, 通过1985—2015年间5期江苏土地利用与覆被(LUCC)数据, 分析近30年来江苏省城市化过程。同时, 利用改进的CASA模型估算对应年份的NPP, 引入分段线性回归拟合的方法精确评估城市化过程对NPP演变的影响。结果表明: 借助线性拟合方法可以有效提高NPP损失评估的精度; 江苏省1985—2015年间城市建设用地扩张呈缓慢的上升趋势, 累计扩张10 452.74 km², 2005—2010年间扩张最快, 苏南快于苏北; 江苏省陆地生态系统生产能力(NPP)为(33.3~40.23) Tg C/a, 呈缓慢上升的趋势, 中南部的盐城与南通最高; 近30年来江苏省城市建设用地扩张累计造成的陆地生态系统生产力损失约为4.43 Tg C~5.99 Tg C, 其中, 耕地被占用损失最大, 湿地次之。研究预示, 苏北未来陆地生态系统生产能力损失将大于苏南。提高未来城市化的质量, 特别是绿地率, 可以缓解城市化带来的未来陆地生态系统生产能力的损失。

关键词: 城市化; 土地利用与覆被; NPP; 陆地生态系统生产能力损失; 线性回归; 江苏省

DOI: 10.18402/resci.2018.01.04

1 引言

陆地生态系统生产能力是关系到区域固碳能力与食物供给能力大小的重要基础^[1-3]。随着人类活动强度与广度的日益增强, 陆地表层生态系统受到人类活动的干扰越来越明显, 其生产能力大小及其未来演变趋势与人类活动之间的互馈耦合关系一直是学术界关注的焦点^[4-6]。目前, 全球范围内城

市化已经进入加速期, 特别是在发展中国家^[7]。城市化作为人类活动最为集中的体现, 城市化的类型、过程、速率与强度会深刻改变陆地表层生态系统的结构与功能, 进而影响其生产供给能力。城市化过程中会将大量的湿地、农田、林地和草地等在短时间内转变为水泥、柏油等硬质界面, 改变区域环境, 增加有机物质分解释放风险, 进而降低生态

收稿日期: 2017-06-09; 修订日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701371); 教育部人文社会科学研究一般项目(17YJCZH085); 江苏师范大学校自然科学基金项目(14XLA03)。

作者简介: 李建国, 男, 江苏泗阳人, 博士, 讲师, 主要研究滩涂开发及其生态环境效应。E-mail: lijianguo531@126.com

通讯作者: 濮励杰, E-mail: ljpu@nju.edu.cn

2018年1月

系统生产供给能力^[8-10]。

净初级生产力是区域陆地生态生产能力的综合体现与基础。借助遥感手段连续快速监测区域陆地表层生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的演变过程已经成为可能,特别是MODIS传感器发射升空以来^[11,12],借助CASA, BEPS, C-FIX, Biome-BGC等模型结合MODIS产品可以快速且有效的估算区域的NPP,这在大量的研究中得到证明^[11,13-15]。而借助陆地卫星(Landsat)、中巴资源卫星、环境星以及众多的商业资源卫星也可以准确地刻画区域城市化过程,这为研究城市化过程下的生态系统响应提供了有效的数据支撑与方法基础。研究表明,中国近年来的快速城市化占用耕地损失的生产力占土地利用变化(LUCC)导致的耕地生产力减少总量的比例在60%以上,且从占补平衡的角度来看,中国新增耕地生产能力在总量上能够弥补城市化带来生产力损失,但是单位面积的生产能力与被占耕地差距较大,是未来中国需要重点关注的风险点^[16]。相关研究在中国主要的快速城市化与都市圈区域也有相关研究的报道^[5,17-21]。已有的研究多运用转移矩阵与多年均值相结合的方法分析城市化影响下的NPP变化。利用多年平均值刻画城市化过程可能会形成较大的误差^[6,17-22],主要是由于城市扩展是动态变化过程,用多年平均的城市扩展量并不能客观反映对应年份的城市扩展带来的NPP损失量,会带来较大的估算误差。本研究拟运用线性回归拟合的方法取代多年平均值以最大限度地降低估算误差,提高估算精度。

江苏作为中国东部重要的经济发达省份,是中国沿海滩涂大开发、长江经济带、长江三角洲都市圈与淮河生态经济走廊等国家重大战略实施的主要区域,已成为中国快速城市化的主要核心区之一^[23]。同时,这一区域也是中国重要的粮食主产区,快速的城市化必然对江苏陆地生态系统的生产能力产生深刻影响。本研究借助NOAA/AVHRR与MODIS数据,结合CASA模型估算1985—2015年间江苏省NPP变化,分析这一时段江苏城市化过程及其对NPP的影响,主要解决以下几个问题:①构建基于线性估算方法的都市圈扩展与NPP损失之间的模

型,以提高精度;②分析1985—2015年间江苏省城市化及其NPP的演变趋势;③揭示1985—2015年间江苏省城市化过程与NPP变化的互馈耦合关系,为江苏绿色经济发展与健康城市化提供科学依据。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

江苏省位于中国东部,面积10.72万km²,介于116°18'E-121°57'E,30°45'N-35°20'N之间,东临黄海,南、西、北部地区分别与山东、河南、安徽、浙江以及上海接壤。2015年GDP达到7.01万亿元,位居全国第二,城镇化率达65.2%,高于全国平均水平约10%。属于温带向亚热带的过渡性气候,四季气候分明,平均气温介于13℃~16℃,由东北向西南逐渐增高。年降雨量在1000mm左右,耕地面积462.17万hm²,人均占有耕地0.058hm²。江苏省行政单元分布见图1。

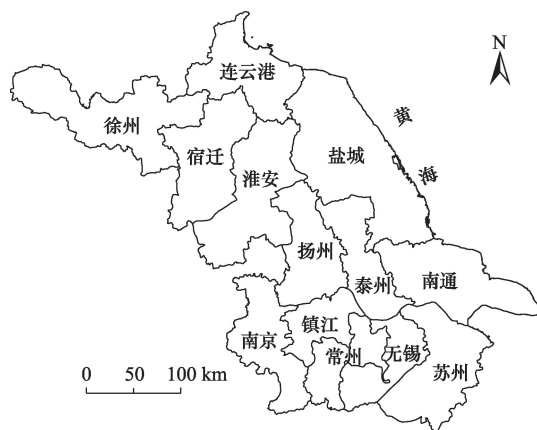


图1 江苏省区位

Figure 1 Location of Jiangsu

2.2 数据来源

本研究NPP估算采用GIMMS-NDVI(Glaobal Inventory Modelling and Mapping Studies-NDVI)数据(1985年、1995年)和MOD13A3数据产品(2005年、2010年与2015年)。GIMMS-NDVI是美国国家航天航空局(NASA)C-J-Tucker等人于2003年11月推出的最新全球植被指数变化数据,时间分辨率为15天,空间分辨率为8km^[24],数据从寒区旱区科学数据中心下载¹⁾。MOD13A3时间分辨率为一个月,空间分辨率为1km,数据从NASA的MODIS数据中心

1)寒区旱区科学数据中心 GIMMS-NDVI数据, <http://westdc.westgis.ac.cn/data/1cad1a63-ca8d-431a-b2b2-45d9916d860d>。

下载¹⁾。气象数据(包括月降水量、月平均气温、月总太阳辐射)来源于中国气象局气象数据中心²⁾。土地利用与覆被数据来源于SPOT-VGT与MCD12Q2数据集,采用IGBP土地覆被分类系统获得。30m土地利用数据来源于长江三角洲科学数据中心³⁾,其中1985年的数据是收集1980s不同年份的TM影像拼接解译而成,2015年的土地利用与覆被数据在2010年数据基础上根据2015年的Landsat 8 ETM⁺影像修改图斑获得。

2.3 研究方法

NPP估算采用朱文泉等构建的改进型光能利用率模型(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)计算获得^[25-26],主要公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中 $NPP(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的净初级生产力($g C / m^2 / (m^2 \cdot a)$); $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射($g C / m^2 / 月$); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率($g C / MJ$)。主要改进在模拟获得了中国主要植被类型的最大光能利用率,而不是CASA模型采用的所有植被类型统一的最大光能利用率参数;其次是根据区域蒸散模型来模拟水分胁迫因子,与CASA模型所采用的土壤水分子模型相比,在保证模拟精度的情况下使模型的实际可操作性得到加强。改进后的模型精度得到很大的提高,并在众多的研究中得到印证^[27, 28]。

不同土地利用与覆被类型向城市建设用地转变,采用空间叠加统计的方法。首先通过不同年份土地利用数据叠加获取该时段转变为建设用地的图斑,然后统计图斑对应时段的总NPP差值,公式如下:

$$L_i = Ni_t - Ni_{t-1} \quad (2)$$

式中 L_i 为陆地生态系统生产能力变化量,这里为 $NPP(t)$; Ni_t 为 t 时点第 i 种地向建设用地转换图斑上的总NPP; Ni_{t-1} 为上一个时点第 i 种地向建设用地转换图斑上的总NPP。

本研究有4个时间区间,分别为1985—1995年、1995—2005年、2005—2010年、2010—2015年,借助线性回归方法拟合每个区间内的城市建设用

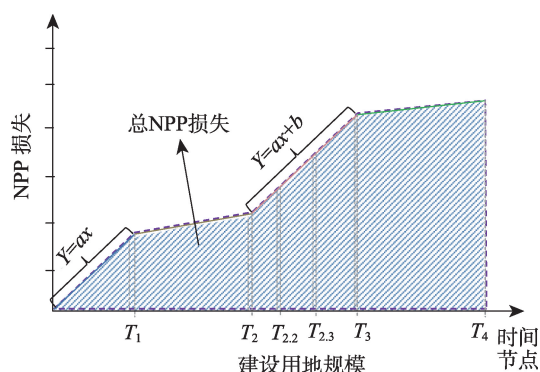


图2 线性拟合损失估算方法

Figure 2 Linear fitting methods for assessing NPP losses

地扩展量与NPP损失量(L_i)之间的关系(图2),拟合公式如下:

$$Y = ax \quad (3)$$

$$Y = ax + b \quad (4)$$

式中 Y 为时段内历年NPP的损失量(Tg C); a 和 b 为线性回归估算参数; x 为时段内历年城市建设用地扩展量。起始时段(1985—1995)年用公式(3)估算,其他时段用公式(4)估算。

3 结果与分析

3.1 江苏省城镇建设用地扩展

从结果可以看出(图3、表1),江苏省不同时段的城市扩张规模与速度有较大的差异。总体来看,江苏省1985—2015年间城镇建设用地扩张呈缓慢的上升趋势,累计扩张10452.74km²,但波动较大。2005—2010年间扩张规模和速度最大,达到5909.53km²,年均增加约1181km²,其次为2010—2015年,规模达到1291.42km²,年均增加约258.2 km²。其他分别是1985—1995年与1995—2005年。可以看出,除1995—2005年外,江苏省城市建设用地扩张基本保持年均增长在200km²以上。从建设用地不同的来源来看,耕地被占用是江苏建设用地扩展的主要方式,贡献接近90%。其次是湿地,包括湖泊、河流、滩涂盐沼等。近30年来因建设用地扩张被占用的湿地面积达到381.14km²。林地和草地占用规模差距不大,分别为174.8km²与189.43km²,其中2005—2010年间占用规模最大。未利用地占用最少,仅为15.43km²,

1)美国国家航空航天局(NASA)MODIS数据产品共享中心, <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>.

2)中国气象局气象数据中心数据, <http://data.cma.cn/>.

3)长江三角洲科学数据中心网址, <http://nnu.geodata.cn:8008/>.

2018年1月

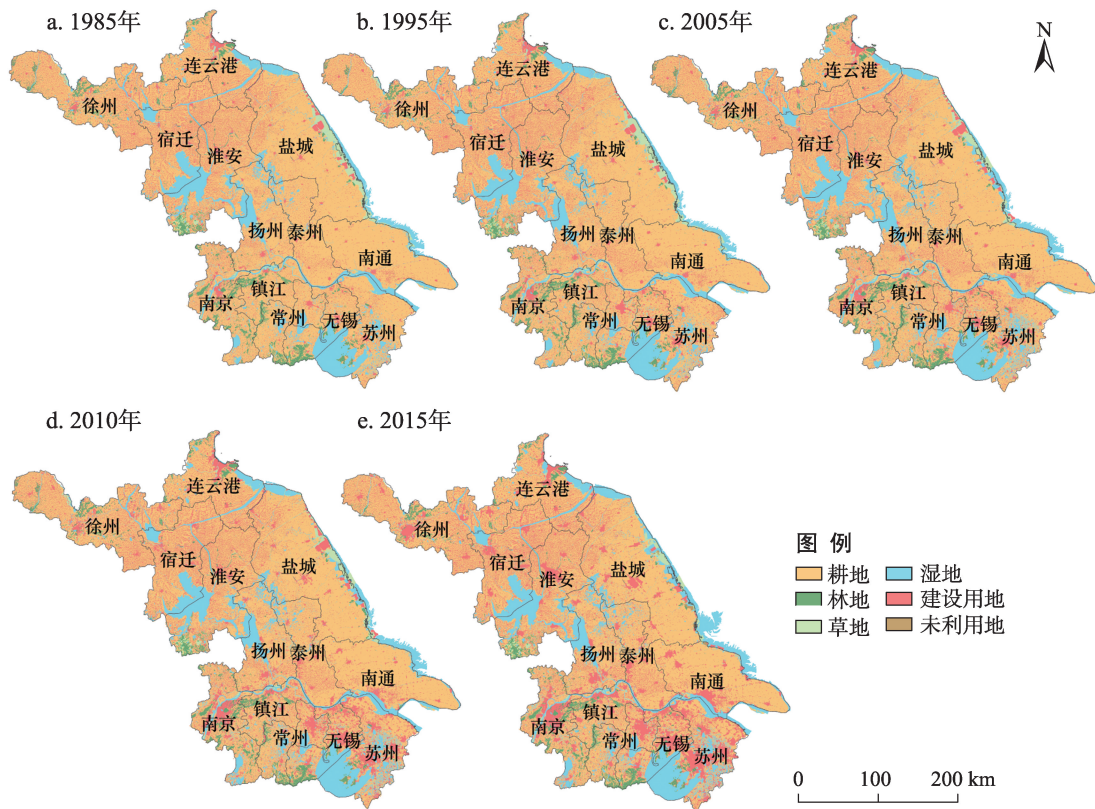


图3 1985—2015年江苏省土地利用/覆被

Figure 3 Land use change/cover map of Jiangsu from 1985 to 2015

表1 江苏省不同时段建设用地扩张规模和速度

Table 1 The size and ratio of Jiangsu's urban construction lands expansion in different periods

(km²)

	1985—1995年	年均	1995—2005年	年均	2005—2010年	年均	2010—2015年	年均	合计
耕地→建设用地	2 190.92	219.09	908.59	90.86	5 443.48	1 088.70	1 148.95	229.79	9 691.94
林地→建设用地	2.60	0.26	43.59	4.36	111.93	22.39	16.67	3.33	174.80
草地→建设用地	0.86	0.09	76.88	7.69	103.49	20.70	8.21	1.64	189.43
湿地→建设用地	13.40	1.34	14.96	1.50	248.97	49.79	103.81	20.76	381.14
未利用地→建设用地	—	—	—	—	1.66	0.33	13.77	2.75	15.43
合计	2 207.78	220.80	1 044.02	104.40	5 909.53	1 181.00	1 291.42	258.20	10 452.74

但近年来呈逐渐增加的趋势,从1985—2005年间的0km²已经增加到2010—2015年的13.77km²。

3.2 江苏省NPP变化

从江苏1985—2015年间的NPP变化来看(图4),总体呈缓慢上升的趋势。从不同的区位来看,江苏省的西部NPP总体要低于东部。从南北方向上看,呈中间高两头低的趋势。徐州、淮安以及长江以南区域NPP都较低,而高值区主要集中于江苏省的中南部。特别是盐城和南通两个沿海城市。

3.3 城市建设用地扩张对NPP的影响

根据公式(2)分别计算四个时段江苏省不同土

地利用类型转向建设用地后的NPP变化量(表2)。由于遥感影像只记录每个时段的一头一尾两个时间节点的NPP变化量,要估算整个时段的NPP损失总量则需要将历年的NPP变化量进行加和。本研究假设城市建设用地扩展呈线性增长的趋势,运用线性拟合方程对不同时段内的NPP历年变化量进行拟合并加和(图4、表2)。可以看出,总体来看,除2005—2010年较低外,1985—2015年间江苏省因建设用地造成的NPP损失呈显著的上升趋势。1985—1995年、1995—2005年、2005—2010年和2010—2015年四个时段NPP损失分别达到

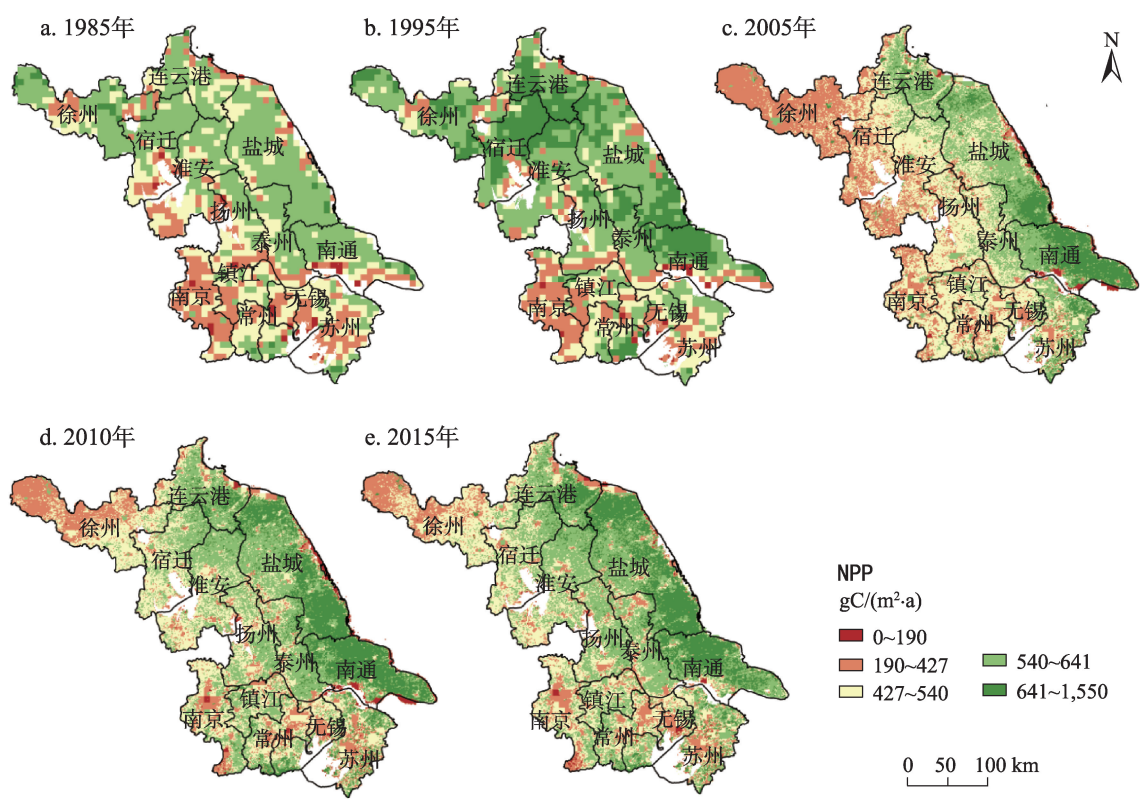


图4 1985—2015年江苏省不同时间点的NPP

Figure 4 NPP of Jiangsu in the five time points from 1985 to 2015

表2 江苏省不同时段不同地类向建设用地转换导致的NPP损失

	Table 2 Total NPP losses of Jiangsu caused by urban construction lands expansion in different periods				(Tg C)
	1985—1995年变化量	1995—2005年变化量	2005—2010年变化量	2010—2015年变化量	累计变化量
耕地→建设用地	-0.102 340	-0.203 170	-0.013 480	-0.359 080	-3.690 000
线性拉伸	$Y=-0.010\ 234x$	$Y=-0.010\ 080x-0.102\ 300$	$Y=0.037\ 940x-0.203\ 200$	$Y=-0.069\ 120x-0.013\ 500$	
林地→建设用地	-0.000 021	-0.014 170	-0.002 436	-0.013 400	-0.140 000
线性拉伸	$Y=-0.000\ 002x$	$Y=-0.001\ 415x-0.000\ 020$	$Y=0.002\ 347x-0.014\ 200$	$Y=-0.002\ 192x-0.002\ 400$	
草地→建设用地	0	-0.004 220	-0.000 223	-0.001 430	-0.030 000
线性拉伸	0	$Y=-0.000\ 420x$	$Y=0.000\ 800x-0.004\ 200$	$Y=-0.000\ 24x-0.000\ 200$	
湿地→建设用地	-0.000 244	-0.005 060	-0.003 123	-0.312 750	-0.920 000
线性拉伸	$Y=-0.000\ 024x$	$Y=0.000\ 48x-0.000\ 240$	$Y=0.000\ 390x-0.005\ 060$	$Y=-0.061\ 920x-0.003\ 120$	
未利用地→建设用地	0	0	0.000 091	-0.001 150	-0.010 000
线性拉伸	0	0	$Y=0.000\ 018x$	$Y=-0.000\ 250x-0.000\ 090$	
累计变化量	-0.560	-1.590	-0.330	-1.950	-4.430

0.56TgC、1.59TgC、0.33TgC 和 1.95TgC, 30 年间累计损失约为 4.43TgC,其中 2010—2015 年间损失最多。从不同土地利用/覆被类型向建设用地流转的损失来看,依然是耕地损失最多,累计达到 3.69Tg C,占到总损失量的 83.11%。从不同时段来看, 2010—2015 年间损失最大,达到 0.36Tg C, 2005—

2010 年间损失最小(表 2)。这与该时段巨大的耕地损失不符。主要是由于该时段的建设用地扩张主要集中在长江以南区域 NPP 低值区。苏南地区由于湖泊河网以及丘陵的存在,耕地较为破碎,在 1km 甚至是 8km 空间分辨率的遥感影像上象元混合较为严重,不能反映这一时段的真实损失^[29]。湿地被

2018年1月

占用造成的NPP损失也较大,累计达到0.92Tg C, 2010—2015年间损失最多。第三是林地,因为林地相较于草地具有较高的净初级生产力,因此虽然林地与草地的损失面积接近,但是造成的区域陆地生态系统生产能力的损失差异很大,接近4倍的差距。30年间研究区林地占用损失了0.14Tg C的NPP,而草地仅为0.03TgC。未利用地向建设用地转变累计损失0.01Tg C NPP,其中2005—2010年因建设用地的扩展占用未利用地引起NPP增加0.000 27 Tg C, 2010—2015年又降低0.010 27 Tg C。这主要是由于未利用地开发利用初期由于绿化建设的需要,会增加林草的布置,从而有可能会增加NPP^[30]。但这一趋势并不稳定,主要是由城市建设用地具体用地类型和未利用地原生植被覆盖状况决定。

3.4 NPP变化的城市差异

通过将研究时段(1985—2015年)30年中后一年减去前一年的NPP差值进行累加,进而获得各个城市总NPP年际变化累积量(表3)。总的来看,江苏城市扩展虽然显著降低区域陆地生态系统生产能力(-4.43 Tg C),但是区域总的陆地生态系统生产能力还是呈上升的趋势(0.22 Tg C)。主要的原因是城镇扩展引致的NPP降值区主要位于城镇周边,面积有限。而NPP较高的森林、草地与耕地面积较大且其NPP总体呈上升趋势,可以有效地弥补

区域总NPP的损失,甚至还有所增加。从区域上看,苏北的盐城、扬州陆地生态系统生产能力增加最为明显,累计分别增加0.90 Tg C与0.47 Tg C。而区域陆地生态系统生产能力下降明显的区域也位于苏北,分别为徐州和宿迁,累计达到-1.31 Tg C和-0.49 Tg C。除徐州外,其他城市的总NPP年际变化累积量都要大于因城镇建设用地扩张带来的NPP损失(NPP累计变化量),这也反映出城市其他区域(林地、草地和耕地)NPP增加对区域总体陆地生态系统生产能力损失具有较为明显的补偿效应。而徐州的快速下降主要是由于江苏省作为唯一的煤炭资源型城市,近30年大规模的煤炭开采已经导致地表植被的严重退化与耕地资源的快速流失,形成大量的煤矸石堆放区,荒山区以及大面积的采煤塌陷区,加之城市的快速扩展导致徐州陆地生态系统生产能力下降较快。而从城镇扩展引起的区域陆地生态系统生产能力损失(NPP累计变化量)来看,苏北的泰州最大,达到-0.74 Tg C,其次为连云港与宿迁。而苏南的无锡和苏州区域生产能力损失也较大,分别达到-0.49 Tg C和-0.42 Tg C。

4 讨论

4.1 江苏建设用地扩展影响因素与区域差异

江苏主要位于长江流域和淮河流域下游,属于典型的冲积平原,地形平坦,经济发展较快,2015年

表3 区域总NPP年际变化累积量与城市扩展致NPP累计变化量

Table 3 Total NPP cumulative increase and losses induced by urban expansion

(Tg C)

	城市	1985—1995年	1995—2005年	2005—2010年	2010—2015年	城市扩展导致的 NPP累计变化量	总NPP年际变化累积量
苏北	扬州	-0.05	-0.09	-0.01	-0.02	-0.17	0.47
	淮安	-0.08	-0.10	0.01	0.08	-0.09	0.17
	连云港	0.00	-0.03	-0.03	-0.60	-0.67	-0.31
	南通	-0.04	-0.23	0.00	0.26	0.00	0.19
	宿迁	-0.04	-0.12	-0.04	-0.35	-0.55	-0.49
	泰州	-0.06	-0.42	-0.09	-0.17	-0.74	0.18
	徐州	-0.01	-0.02	-0.02	-0.27	-0.32	-1.31
	盐城	-0.08	-0.07	-0.02	-0.24	-0.41	0.90
苏南	常州	-0.07	-0.08	-0.02	-0.07	-0.23	-0.05
	南京	-0.01	-0.15	-0.04	-0.08	-0.27	0.21
	无锡	-0.07	-0.03	-0.04	-0.36	-0.49	-0.03
	苏州	-0.05	-0.23	-0.04	-0.10	-0.42	0.08
	镇江	0.00	-0.03	0.00	-0.03	-0.06	0.22
NPP累计变化量		-0.56	-1.59	-0.33	-1.95	-4.43	0.22

GDP增速为8.5%,远高于全国平均水平(6.7%)。建设用地扩展受地形、自然灾害等自然因素的影响较小,多呈边缘式与填充式发展^[31],这与飞地式扩展方式相比具有较高的扩张效率与较低的成本障碍。因此,江苏与全国相比具有较高的城市用地扩张速率^[32]。从驱动因素来看,江苏省城镇建设用地扩展主要的驱动因素为GDP增长、城镇人口增加和固定资产投资等^[33],其中人口城市化的加速是导致目前江苏土地城市化的主要因素。而且江苏正处于人口城市化快速推进阶段,为满足日益庞大的就业与居住需求,建设用地的急剧扩张不可避免。但是未来江苏省城镇建设用地扩张的速度可能减缓,主要是随着近10年城市化的快速推进,导致区域环境问题日益突出(空气污染、水污染、固体废弃物等),同时也引发出较多的社会问题(如失地农民、社会保障等)。因此,政府出台了大量的土地管控措施,如江苏近年来提出的《江苏省推进节约集约用地工作方案》(简称“双提升”计划)^[34],力图使建设用地GDP产出提高50%,进而起到提高开发效益与质量,降低低效开发的风险。同时,“占补平衡”与“生态红线”等政策的实施,也极大的降低了建设用地扩张中增量土地的总体规模,约束城市建设用地过快增长。

江苏省近30年来累计建设用地扩展面积达到10 452.74km²,年均扩张261.32km²,城市建设用地扩

张大部分来源于耕地(表4)。由于江苏省经济呈现较为明显的南高北低的趋势,苏南经济的快速发展促使苏南地区这一时段城镇建设用地面积快速增加,年均每个城市扩张34.26 km²,远高于同期的苏北建设用地扩展的年平均水平(22.14 km²)。苏南的苏州、南京和南通三个城市扩张最快,规模累计分别达到2072.97km²、1019.65km²和972.26km²,年均速度分别为69.1km²、33.99 km²、32.41 km²。从目前的情况来看,苏南城镇建设用地虽然需求量很大,但是受到政策与区域土地资源保有量的约束,未来的扩张速率可能会呈现下降的趋势。而苏北城市化进程还处于加速推进的阶段,城镇建设用地扩展的约束条件较少,未来可能还会持续。因此,未来苏北陆地生态系统生产能力损失相较于苏南可能会更大。

4.2 线性模型在区域陆地生态系统生产能力损失估算中的应用以及其他影响因素

城镇建设用地的扩张规模在不同区域具有不同的表现形式,主要表现有线性、对数甚至非线性指数关系^[35,36],而每年对应的NPP变化更为复杂。因此,完全真实的评估城市化带来的NPP损失具有很大的困难,本研究主要是基于城镇建设用地线性扩展的前提假设进行的提高估算精度的尝试。表5结果显示,运用线性拟合方法的结果多低于运用均值化处理的结果,近30年的NPP损失累计误差在

表4 1985—2015年江苏省建设用地扩张来源

Table 4 The sources of urban construction lands expansion from 1985 to 2015

(km²)

	城市	耕地→建设用地	林地→建设用地	草地→建设用地	湿地→建设用地	未利用地→建设用地	总计
苏北	扬州	509.13	2.09	4.22	6.22	—	521.66
	淮安	529.00	17.66	0.84	16.54	—	564.04
	连云港	355.02	15.83	8.66	34.08	—	413.59
	南通	844.81	1.03	46.81	79.61	—	972.26
	宿迁	552.15	5.75	0.72	11.85	—	570.47
	泰州	590.48	0.52	—	14.70	—	605.69
	徐州	697.13	32.44	8.48	26.85	0.44	765.33
	盐城	839.32	1.11	43.97	15.43	0.17	900.01
苏南	常州	603.81	3.75	0.12	18.07	—	625.75
	南京	926.75	55.88	6.07	30.44	0.52	1 019.65
	无锡	859.56	27.49	1.21	32.61	—	920.88
	苏州	1 931.28	22.28	3.63	114.70	1.07	2 072.97
	镇江	450.60	30.95	3.47	15.40	—	500.43
总计		9 689.04	216.82	128.18	416.50	2.20	10 452.74

表5 线性模型与均值处理对区域陆地生态系统生产能力损失结果的影响

Table 5 The results difference of terrestrial ecosystem production losses between the methods of linear fitting and equalization

	1985—1995年	1995—2005年	2005—2010年	2010—2015年	(Tg C) 累计损失量
线性拟合处理结果	0.56	1.59	0.33	1.95	4.43
均值处理结果	1.03	2.27	0.10	3.44	6.83

50%左右。这反映出均值化处理对于长期观测结果存在不可避免的放大效应。这主要是因为均值化处理明显忽视了研究时段内城市建设用地扩张的动态过程。城市建设用地的扩张过程具有较大的不确定性。不同城市在不同时期其建设用地扩展都具有鲜明的差异。因此,构建基于不同城市扩展特色下的模型估算方法也是未来需要进一步深入的方向。在此基础上,引入模糊数学、系统动力学、神经网络等非线性因素,将可能使城市扩张导致的NPP损失估算达到更高的精度。长时间序列的研究难免会遇到由于遥感数据源不同带来的尺度与精度差异,进而影响结果的准确性。本研究运用8km的GIMMS-NDVI和1km的MODIS数据作为数据源,处理方法是将估算出的8km的NPP数据重采样成1km的栅格,以增加数据可比性。若运用带约束线性分解或者非线性分解方法对估算前低分辨率数据进行像元分解(GIMMS-NDVI),对于进一步提高研究结果精度会有帮助,这也是改进未来研究的方向之一^[37]。

本研究采用朱文泉等改进的CASA光学模型,该模型估算精度主要受制于植被类型和水分胁迫因子^[26],受植被分类图空间分辨率的限制(1:400万),本文NPP的估算误差在所难免。气候因子,特别是气温与降水是影响区域NPP变化的主要因素^[12, 38-40]。从图5可以看出,江苏省近10年来总NPP呈缓慢上升的趋势。但研究区近10年来气温波动不大,没有明显变化。但温度总体呈缓慢上升的趋势,极端降雨事件概率增加。研究区也是中国氮沉降最高的区域^[41-43],氮沉降的贡献也不容忽视。另外,农作物品种的更新,新育种技术的进步都会在一定程度上部分抵消由于城市建设用地占用耕地而造成的NPP损失^[4]。肥料添加、农艺措施革新、水利工程措施等技术进步以及正在实施的“生态红线”与“高标准基本农田”措施都可以显著提高区域

的NPP,从而降低由于城镇建设用地扩张带来的短期NPP下降的风险。这些都可能是促使研究时段内江苏省NPP缓慢升高的影响因素。2000年江苏省总NPP为33.3Tg C,2015年上升到37.65Tg C,15年间上升了4.35Tg C,上升了13.06%。按照此速率,近30年间江苏城镇建设用地扩展造成的潜在NPP损失可能达到5.99 Tg C。也有的研究发现,城市化快速推进在短期内会造成区域陆地生态系统生产能力损失,但是城市生态系统在城市化后会逐渐弥补这一损失,期限大概在70~100年左右^[44]。这一认识主要是基于城市区域热岛效应、CO₂浓度与氮沉降增加使城市生态系统个体生物量要比周边高很多。在台州的实测研究表明,城市乔木生物量是野外同种乔木的2倍^[21]。因此,适当提高城市化区域的植被覆盖率可以有效地弥补城市化造成的陆地生态系统生产能力损失,提高固碳能力。

5 结论

(1)江苏省1985—2015年间城市建设用地扩张呈缓慢的上升趋势,累计扩张10 452.74km²,但波动较大。2005—2010年间扩张规模和速度最大,达到5909.53km²,年均增加约1181km²,其次为2010—2015年,规模达到1291.42km²,年均增加约258.20 km²。其次分别是1985—1995年与1995—2005年。耕地贡献最大,湿地次之。研究时段,苏南城市建设用地扩张速度快于苏北。

(2)江苏省NPP呈西低东高,南北两端低中间高的趋势,最高值位于中南部,盐城与南通最高。江苏陆地生态系统年均生产能力在(33.3~40.23)Tg C/a,研究时段呈波动上升的趋势。

(3)借助线性拟合方法可以有效提高NPP损失评估的精度。江苏省30年间因建设用地扩张累计损失4.43TgC的陆地生态系统生产能力,约占生产力总量的10%左右,其中2010—2015年间损失最多,其中耕地的损失最大,其次是湿地。氮沉降、农

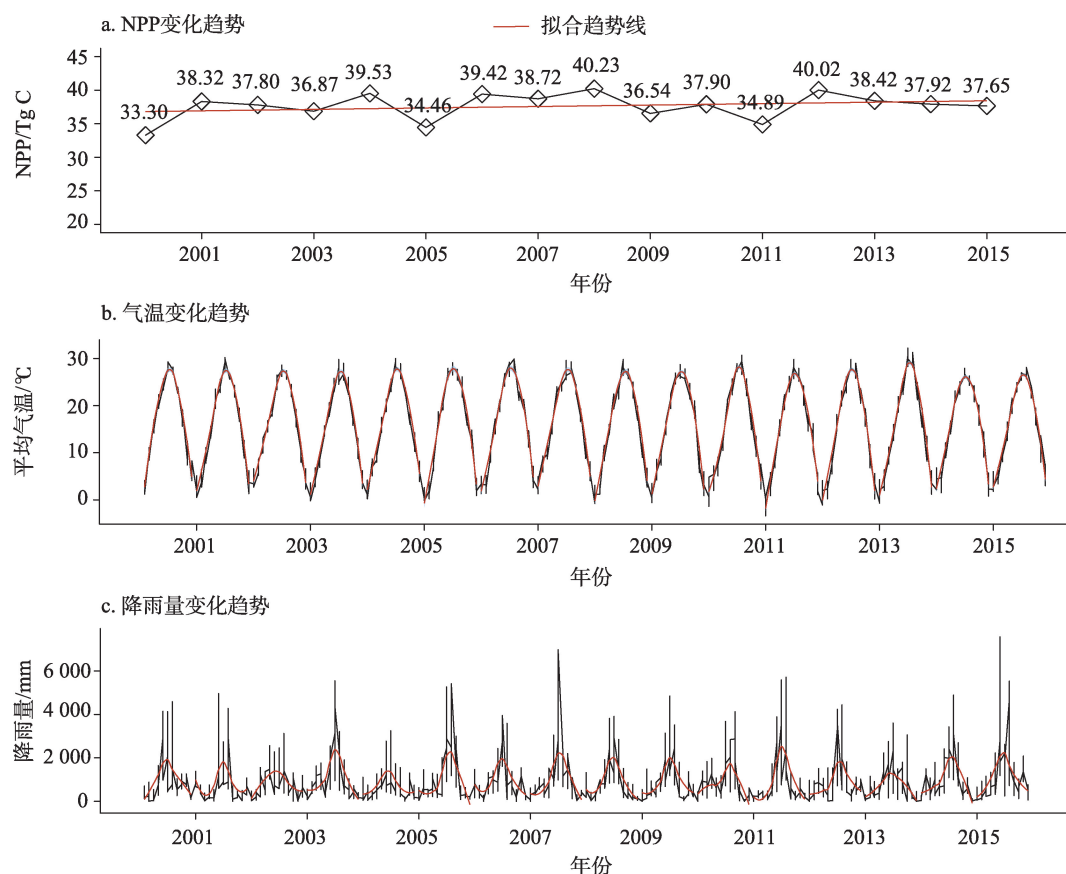


图5 江苏省总NPP、气温与降水变化趋势

Figure 5 Total NPP, temperature, and precipitation changes in Jiangsu

业管理与农作物品种的改良可能是研究区陆地生态系统生产能力上升的主要因素。如果考虑到技术进步与管理等因素的影响,潜在损失预计达到5.99Tg C。提升研究区城市化的质量,特别是绿化水平,可以有效降低城市化带来的区域陆地生态系统生产能力的损失。

参考文献(References):

- [1] Goulden M L, Mcmillan A M S, Winston G C, et al. Patterns of Npp, Gpp, respiration, and Nep during boreal forest succession [J]. *Global Change Biology*, 2010, 17(2): 855–871.
- [2] 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[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603–608. [Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of casa model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603–608.]
- [3] 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 579–588. [Yan H M, Liu J Y, Huang H Q, et al. Impacts of cropland transformation on agricultural production under urbanization and grain for green project in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 579–588.]
- [4] Lu Q S, Gao Z Q, Ning J C, et al. Impact of progressive urbanization and changing cropping systems on soil erosion and net primary production[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 75(87): 187–194.
- [5] Lu D S, Xu X F, Tian H Q, et al. The effects of urbanization on net primary productivity in southeastern China[J]. *Environmental Management*, 2010, 46(3): 404–410.
- [6] Peng J, Shen H, Wu W H, et al. Net primary productivity (NPP) dynamics and associated urbanization driving forces in metropolitan areas: A case study in Beijing city, China[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1077–1092.
- [7] 沈建国. 世界城市化的基本规律[J]. *城市发展研究*, 2000, 7(1): 6–11. [Shen J G. The fundamental laws governing world urbanization[J]. *Urban Development Research*, 2000, 7(1): 6–11.]
- [8] 陈浩, 吴绍华, 陈东湘, 等. 城市土壤封闭对有机碳库影响的时空变化模拟[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2600–2610. [Chen H, Wu S H, Chen D X, et al. Simulating effects of urban soil sealing on the soil organic carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37

2018年1月

- (8): 2600–2610.]
- [9] Houghton R A, Hackler J L. Emissions of carbon from forestry and land– use change in tropical Asia[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(4): 481–492.
- [10] Pei F S, Li X, Liu X P, *et al.* Exploring the response of net primary productivity variations to urban expansion and climate change: A scenario analysis for Guangdong Province in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 150: 92–102.
- [11] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811–841.
- [12] Li S S, Lu S H, Zhang Y J, *et al.* The change of global terrestrial ecosystem net primary productivity (NPP) and its response to climate change in CMIP5[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 121(1–2): 319–335.
- [13] Chen J M, Liu J, Leblanc S G, *et al.* Multi–angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 516–525.
- [14] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和CO₂浓度升高的响应–基于Biome–BGC模型和树木年轮的模拟[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1733–1742. [Peng J J, He X Y, Chen Z D, *et al.* Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: A simulation based on BIOME– BGC model and tree– ring data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1733–1742.]
- [15] Peng J, Wang A, Liu Y X, *et al.* Assessing the atmospheric oxygen balance in a region of rapid urbanization: A case study in the pearl river delta, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(10): 13055–13072.
- [16] Yan H M, Liu J Y, Huang H Q, *et al.* Assessing the consequence of land use change on agricultural productivity in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1–2): 13–19.
- [17] Tan K, Zhou S Y, Li E Z, *et al.* Assessing the impact of urbanization on net primary productivity using multi–scale remote sensing data: A case study of xuzhou, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(2): 319–329.
- [18] Zhang C, Tian H Q, Pan S F, *et al.* Effects of forest regrowth and urbanization on ecosystem carbon storage in a rural–urban gradient in the southeastern United States[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(8): 1211–1222.
- [19] 姜春, 吴志峰, 程炯, 等. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 961–972. [Jiang C, Wu Z F, Cheng J, *et al.* Analyzing the effects of land cover change on vegetation net primary productivity in Guangdong Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 961–972.]
- [20] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1940–1947 [Xu X B, Yang G S, Li H P. Impacts of land use change on net primary productivity in the Taihu Basin, China[J]. *Resources Science*, 2011, 33(10): 1940–1947.]
- [21] 温家石, 葛滢, 焦荔, 等. 城市土地利用是否会降低区域碳吸收能力? 台州市案例研究[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 651–660. [Wen J S, Ge Y, Jiao L, *et al.* Does urban land use decrease carbon sequestration? A case study in Taizhou, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 651–660.]
- [22] Xu C, Liu M, An S, *et al.* Assessing the impact of urbanization on regional net primary productivity in Jiangyin County, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 597–606.
- [23] Bai X, Shi P, Liu Y. Realizing China’s urban dream[J]. *Nature*, 2014, 509(1799): 158–160.
- [24] 廖建华, 李丹勋, 王兴奎, 等. 长江上游植被覆盖的时空分异季节变化及其驱动因子研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(5): 1103–1112. [Liao J H, Li D X, Wang X K, *et al.* The spatial–temporal distribution of seasonal vegetation changes and their driving forces in the upper reaches of the yangtze river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(5): 1103–1112.]
- [25] Zhu W, Pan Y, Hao H E, *et al.* Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 457–463.
- [26] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413–424. [Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413–424.]
- [27] 张兴榆, 黄贤金, 赵小凤, 等. 环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1343–1353. [Zhang X Y, Huang X J, Zhao X F, *et al.* Impacts of land use ochange on vegetation carbon storage in the region around Taihu Lake[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8): 1343–1353.]
- [28] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于CASA模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786–797. [Zhang F, Zhou G S, Wang Y H. Dynamics simulation of net primary productivity by a satellite data–driven casa model in inner mongolian typicalsteppe, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4): 786–797.]
- [29] 郑有飞, 范旻昊, 张雪芬, 等. 基于MODIS遥感数据的混合像元分解技术研究和应用[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(2): 145–150. [Zheng Y F, Fan M H, Zhang X F, *et al.* Pixel unmixing technology of MODIS remote sensing data[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(2): 145–150.]
- [30] Xu X B, Yang G S, Tan Y, *et al.* Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 554: 7–16.
- [31] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析

- 中的应用[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1430–1438. [Liu X P, Li X, Chen Y M, *et al.* Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1430–1438.]
- [32] Xu J, Zhang Z, Wang C, *et al.* Urban Expansion Monitoring and Driving Forces Analysis: A Case Study of Jiangsu Province[R]. Shanghai: Urban Remote Sensing Event, 2009.
- [33] Chuai X, Huang X, Qi X, *et al.* A preliminary study of the carbon emissions reduction effects of land use control[J]. *Scientific Reports*, 2016, doi: 10. 1038/srep36901.
- [34] 江苏国土资源. 中共江苏省委 江苏省人民政府关于全面推进节约集约用地的意见[EB/OL]. (2016–06–17)[2017–06–09]. <http://www.jsmlr.gov.cn/xwzx/ztjc/delggqtdr/stsxd/2016/06/17171736108824.html>. [Land and Resources of Jiangsu Province. Opinions of the People's Government of Jiangsu Province, Jiangsu Provincial People's Government on Promoting the Intensive Collective Land[EB/OL]. (2016–06–17) [2017–06–09]. <http://www.jsmlr.gov.cn/xwzx/ztjc/delggqtdr/stsxd/2016/06/17171736108824.html>.]
- [35] 陈彦光, 周一星. 中国城市化过程的非线性动力学模型探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 542–548. [Chen Y G, Zhou Y X. Modeling the urbanization process of China by using nonlinear dynamic equations [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(4): 542–548.]
- [36] 刘云刚, 王丰龙. 快速城市化过程中的城市建设用地规模预测方法[J]. 地理研究, 2011, 30(7): 1187–1197. [Liu Y G, Wang F L. Holistic forecast method of land use in leap-forward of urbanization[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(7): 1187–1197.]
- [37] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 基于MODIS混合像元分解的湖南省森林碳密度反演[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3433–3442. [Yan E P, Lin H, Wang G X, *et al.* Estimation of hunan forest carbon density based on spectral mixture analysis of MODIS data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3433–3442.]
- [38] Liu Y B, Ju W M, He H L, *et al.* Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(1): 112–127.
- [39] Zhao X, Zhou D J, Fang J Y. Satellite-based studies on large-scale vegetation changes in China[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2012, 54(10): 713–728.
- [40] Li Z S, Liu G H, Fu B J, *et al.* The potential influence of seasonal climate variables on the net primary production of forests in Eastern China[J]. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1173–1181.
- [41] Zhan X, Yu G, He N, *et al.* Inorganic nitrogen wet deposition: Evidence from the north–south transect of Eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 204: 1–8.
- [42] Zhu J, He N, Wang Q, *et al.* The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511(4): 777–785.
- [43] Jia Y, Yu G, Gao Y, *et al.* Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements[J]. *Scientific Reports*, 2016, doi: 10. 1038/srep19810.
- [44] Zhang C, Tian H Q, Chen G S, *et al.* Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 164(1): 89–101.

Impact of urbanization on terrestrial ecosystem production using Linear Modeling for Jiangsu

LI Jianguo^{1,2}, WANG Huan¹, WANG Jing¹, LI Qiang¹, ZHANG Zhongqi¹, LIU Lili¹, PU Lijie^{3,4}

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Department of Geography and School of Global Studies, University of Sussex, Falmer, Brighton, BN1 9RH, UK;

3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

4. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210023, China)

Abstract: Terrestrial ecosystem production capacity is fundamental to regional ecosystem service functioning. Urbanization processes have been the main influencing factor to reduce terrestrial ecosystem production. Here we use net primary productivity (NPP) and urbanization determined using remote sensing and GIS to study the impact of urbanization on terrestrial ecosystem production losses. Remote sensing images from Jiangsu in 1985, 1995, 2005, 2010 and 2015 were collected to record land use and cover change (LUCC) processes from 1985 to 2015. NPP of corresponding times were determined using the Carnegie-Ames-Stanford Approach. We found that urban construction lands of Jiangsu rose slowly from 1985 to 2015, and reached 10452.74 km². During this period, the expansion rate peaked from 2005 to 2010. The urban construction land expansion rate in southern Jiangsu is significantly higher than that of northern Jiangsu. Jiangsu's NPP varied from 33.3 to 40.23 Tg C/yr and had a rising tendency from 1985 to 2015 and the south-central part of which is highest including Yancheng City and Nantong City. The precision of NPP loss estimation rises significantly under linear modeling comprised using the traditional equalization method. Urban construction land expansion of Jiangsu triggered a significantly decrease in terrestrial ecosystem production losses of 4.43-5.99 Tg C over the past 30 years, of which the decreasing NPP in croplands caused by urbanization was the major reason, followed by wetlands. This study reveals that the rate of terrestrial ecosystem production loss in northern Jiangsu will be faster than that of southern Jiangsu in the future. Promoting urbanization quality, especially increasing the greening rate, will effectively mitigate the risk of terrestrial ecosystem production loss.

Key words: urbanization; LUCC; NPP; terrestrial ecosystem production loss; Linear Model; Jiangsu