

DOI: 10.5846/stxb201712022167

赵晓,周文佐,田罗,何万华,章金城,刘东红,杨帆.土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响.生态学报,2018,38(21): - .
Zhao X, Zhou W Z, Tian L, He W H, Zhang J C, Liu D H, Yang F. Effects of land-use changes on vegetation net primary productivity in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响

赵 晓,周文佐*,田 罗,何万华,章金城,刘东红,杨 帆

西南大学地理科学学院,重庆 400715

摘要:研究土地利用变化对区域植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的影响对于明确区域植被固碳能力与土地利用变化的关系,以及维持生态系统结构稳定具有重要意义。本文以三峡库区重庆段为例,基于 2000—2015 年 MOD17A3 数据和土地利用数据,分析研究区 NPP 时空分布特征并从景观生态学的角度探讨土地利用变化对区域植被 NPP 的影响。研究表明:(1)NPP 年均值 16 年间波动不大,空间分布上从东到西逐渐减少;(2)研究期内林地面积增加,耕地和草地面积减小,而 NPP 总量从 25.6 TgC 增加到了 28.5 TgC,其中耕地 NPP 约占总量的 44%,林地次之(40%),草地最少(14%),2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年土地利用变化对 NPP 变化的贡献率分别为 26.49%、59.76%、17.27%;(3)区域生态景观指数中的香农多样性指数 SHDI、斑块密度 PD 与 NPP 呈正相关,而聚合度 AI 与 NPP 呈负相关,景观格局类型和景观格局变化均影响区域植被 NPP 的增长。要提高区域植被 NPP,需优化土地利用格局,增加景观异质性和斑块密度,重视培育幼龄林,并控制成熟林的数量。

关键词:三峡库区;植被净初级生产力;土地利用变化;景观格局指数

Effects of land-use changes on vegetation net primary productivity in the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing

ZHAO Xiao, ZHOU Wenzuo*, TIAN Luo, HE Wanhua, ZHANG Jincheng, LIU Donghong, YANG Fan

School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: It is significant to study the impact of land-use changes on vegetation net primary productivity (NPP) both for elucidating the relationship between the carbon assimilation ability of vegetation and the land-use changes on a regional scale, and for maintaining stability in ecosystem structures. By using the section of the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) in Chongqing as a study area, we analyzed the spatio-temporal distribution of NPP and the impact of land-use changes on the regional NPP in term of landscape ecology based on the land-use maps and remote sensing data MOD17A3 from 2000 to 2015. The results revealed that the average annual NPP did not change much in over 16 years and it spatially decreased from east to west. During the study period, the areas of woodland increased, whereas the areas of farmland and grassland declined. The total NPP increased from 25.6 TgC to 28.5 TgC, in which comprised 44% in farmland, 40% in woodland, and 14% in grassland. The rates of NPP variations induced by land-use changes in 2000—2005, 2005—2010, and 2010—2015 were 26.49%, 59.76%, and 17.27% respectively. Shannon's diversity index (SHDI) and patch density (PD) were positively correlated with NPP, whereas the aggregation index (AI) was negatively correlated with NPP. Both the types and their changes of landscape patterns increased NPP. To improve the regional vegetation NPP, some measures,

基金项目:科技基础资源调查专项(2017FY100900)第一课题第四专题(2017FY100901-4);国家自然科学基金项目(41571093)

收稿日期:2017-12-02; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouwz@swu.edu.cn

which includes optimizing the land-use pattern, increasing the landscape heterogeneity and patch density, emphasizing the cultivation of young forest, and controlling the number of mature forests, need to be adopted by local governments in the future.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area (TGRA); net primary productivity of vegetation; land-use changes; landscape index

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)指植物在单位时间单位面积上由光合作用所固定的有机物总量减去自养呼吸后的剩余部分^[1]。NPP 反映植被在生态系统中的生产能力,是判定生态系统碳积累和调节生态过程的主要因子,在碳平衡和全球变化中具有重要作用^[2]。土地利用变化将直接影响植被 NPP,而 NPP 的变化反映了植被对土地利用变化的响应。Defries 等^[3]研究发现全球每年因土地利用变化减少的 NPP 约占 5%;Imhoff 等^[4]研究表明美国由城市化引起的土地转换每年造成 0.04 PgC 的碳损失;Milesi 等^[5]研究发现美国东南部由城市化引起的土地利用变化导致 NPP 每年下降 0.4%;孙政国等^[6]研究表明城市化使土地利用和覆盖方式改变,导致 NPP 大量损失;Xu 等^[7]研究表明三峡工程使移民安置区的 NPP 在 2000—2010 年减少了 8%,主要驱动机制为土地利用变化。三峡库区地理位置特殊,自然灾害频发,加之三峡水利工程建设的影响,导致库区土地利用格局和生态环境发生剧烈变化,影响了库区生态系统的结构和功能^[8]。研究库区土地利用变化对植被 NPP 的影响有利于合理优化库区土地利用格局,对探求更多的碳增长空间、调节碳循环具有重要意义^[9]。

植被 NPP 的估算主要有两种方式:一是实地调查法;二是模型估算法。其中估算模型主要分为 4 类:气候模型、遥感模型、过程模型和遥感—过程耦合模型^[10]。本文使用的 MOD17A3 数据利用改进的 BIOME-BGC 模型^[11]与光能利用率模型进行耦合估算全球陆地生态系统年 NPP,属于遥感—过程耦合模型。该数据已在全球和区域的植被生长状况、生物量估算、全球变化等研究中得到广泛应用和验证^[12-13]。国内学者也在东北地区、陕西省、黄河三角洲、南岭山地等不同地形、不同大小的区域验证了在我国使用 MOD17A3 数据的适用性^[1,14-16]。

已有研究主要从土地利用的面积变化、类型转变、时空特征、驱动因素等方面来分析三峡库区土地利用变化^[17-19],而对库区土地利用变化对 NPP 的影响研究较少。研究土地利用变化对 NPP 的影响多从土地利用面积变化、土地转移、影响因素等角度分析^[9,20],较少从景观格局的角度去探究。因此,本文以三峡库区重庆段为研究区,从景观生态学的角度分析土地利用变化与区域 NPP 变化的关系,量化土地利用变化对区域 NPP 变化的贡献,并从景观格局的角度分析影响区域 NPP 变化的因素,以期优化区域土地利用结构,提高区域固碳能力提供有益参考。

1 研究区概况

三峡库区重庆段(28°28′—31°44′N,105°49′—110°12′E)位于我国西南部,长江上游的下段,海拔高度在 148—2793 m 之间,地形以山地、丘陵为主。研究区西起江津区,东抵巫山县,南起武隆县,北至开县,包括了重庆主城区、涪陵区、长寿区、丰都县等共 22 个区县,面积约 4.6×10⁴ km²,占三峡库区总面积的 86%。研究区处于亚热带季风湿润气候区,年均温 15—18℃,具有春季较短,夏季炎热,秋季多雨,冬季温暖,全年降水丰富,湿度大等气候特征^[21]。主要地带性植被为亚热带常绿阔叶林,主要植被类型包括农作物、林地和草地。地势较为平坦的地区主要为草地和农作物,其中农作物类型主要为水稻、玉米、小麦;海拔较高的地区如巫溪、巫山县则以林地为主,森林植被主要为马尾松和栎类^[22]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本文数据主要包括遥感数据和土地利用数据。遥感数据为 EOS/MODIS 的 MOD17A3 数据,来源于美国

国家地质调查局 MODIS 数据分发中心 (<https://modis.gsfc.nasa.gov>)。该数据是基于 BIOME-BGC 模型计算出全球陆地植被净初级生产力年际变化的资料,像元值即为年 NPP 值,表示全年每日光合作用产生的有机物总量的加和减去全年自养呼吸后剩余的部分^[15],空间分辨率为 1 km。研究区涉及的数据行列号为 h27v05 和 h27v06,2000—2015 年共 32 景。采用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对数据进行投影转换、拼接等预处理,最后将无效值剔除^[23]。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),包括 2000、2005、2010、2015 年共 4 期数据,空间分辨率为 1 km。该土地利用数据的分辨率较低,研究区内较小的绿地无法识别,因此本文主要考虑研究区内的主要植被类型,将非建成区的土地利用类型划分为耕地、林地和草地,不考虑未利用地。

2.2 研究方法

2.2.1 NPP 时空特征分析

简单差值法:利用同一地区不同时相的图像间的差值来表示 NPP 变化,公式^[14]为:

$$D_{ij} = NPP_{ij}^{t_1} - NPP_{ij}^{t_2}$$

式中, D_{ij} 为第 i 行, j 列像元差值; $NPP_{ij}^{t_1}$ 为时相 t_1 第 i 行, j 列像元的 NPP 值; t_1, t_2 为时相; i, j 为第 i 行, j 列像元的位置。

一元线性回归法:分别对 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2000—2015 年进行 NPP 年际变化趋势分析,其变化趋势用多年栅格数值回归方程的斜率(slope)^[24]来反映,斜率使用最小二乘法获得,公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times V_{\text{NPP},i}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n V_{\text{NPP},i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中, n 为研究时段年数, i 为年序号, $V_{\text{NPP},i}$ 为第 i 年的 NPP 值。slope>0 表示 NPP 年际变化趋势增加;反之则降低。目前对 slope 的划分没有统一标准^[25],本文采用等间距划分法,将 NPP 变化分为 5 个等级:明显增长(slope ≥ 15)、轻度增长(5 ≤ slope < 15)、稳定不变(-5 ≤ slope < 5)、轻度降低(-15 ≤ slope < -5)和明显降低(slope ≤ -15)。

2.2.2 景观格局变化对 NPP 的影响

景观格局变化采用土地利用转移矩阵^[26]来描述。本文通过构建 2000—2015 年三峡库区重庆段的土地利用转移矩阵,分析 16 年来研究区景观格局的变化。

景观格局变化对区域 NPP 的影响可以通过计算土地利用变化的面积对 NPP 总量变化的贡献率(R)来表示^[27]:

$$R = \frac{|\Delta S \times \text{NPP}_1|}{|S_1 \times \Delta \text{NPP}| + |\Delta S \times \text{NPP}_1| + |\Delta \text{NPP} \times \Delta S|} \times 100\%$$

式中, ΔS 和 ΔNPP 分别表示土地利用面积变化量和 NPP 变化量, S_1 和 NPP_1 分别表示某一时段初始时间的土地利用面积和单位面积 NPP 值; $\Delta S \times \text{NPP}_1$ 表示土地利用面积变化对 NPP 总量的影响量; $S_1 \times \Delta \text{NPP}$ 表示气候变化对 NPP 总量的影响量; $\Delta \text{NPP} \times \Delta S$ 表示气候变化和土地利用共同作用对 NPP 总量的影响。因本文只探讨土地利用对 NPP 变化的影响,故只计算土地利用变化对 NPP 的贡献量。

本文基于以往的研究^[18,28-29],从景观水平上选取了 3 个景观格局指数来表征景观格局的变化:表征景观异质性的香农多样性指数(SHannon's Diversity Index, SHDI)、表征景观破碎度的斑块密度指数(Patch Density, PD)以及表征景观聚集度的聚合度指数(Aggregation Index, AI)。本文采用移动窗口法(20 km)通过 Fragstats 4.2 软件计算 2000、2005、2010、2015 年的景观格局指数,再通过 SPSS 计算各年份各景观格局指数与 NPP 的相关系数,并利用主成分分析法提取 3 个景观格局指数的主成分,分析主成分与 NPP 间的关系。

3 结果

3.1 MOD17A3 数据验证

因实测数据缺乏,本文采用与文献值对比的方式对 MOD17A3 数据进行验证。本文数据模拟值为 $590.94 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,略高于其他模型模拟值,但仍处于文献值 $324\text{—}626 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内(表 1)。该数据模拟值偏高可能与不同模型参数不同以及数据分辨率高低有关^[35]。陈雅如等^[36]使用 BIOME-BGC 模型模拟三峡库区 1981—2014 年植被 NPP,其平均值范围: $270.83\text{—}552.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,通过 3 种方式验证表明该模型能够真实反映三峡库区的情况。考虑到地形因素,刘玉安等^[37]对太阳总辐射和气温进行地形校正,构建改进的 CASABTC(CASA based on topographical correction)模型模拟了大别山区植被 NPP,并与 MOD17A3 数据、实测值和文献值比较,验证了模型在山区的适用性。CASABTC 模拟值、MOD17A3 数据和实测值三者较为一致,从侧面说明了 MOD17A3 数据与实测值误差较小,表明 MOD17A3 数据在山区应用的可行性。基于以上几点认为 MOD17A3 数据在本研究区应用具有可行性。

表 1 MOD17A3 数据与其他模型模拟值对比

Table 1 MOD17A3 data compared with other model simulation values

模型 Model	NPP 均值 Average annual NPP/($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	研究时段 Study period	研究区 Study area
CASA ^[30]	626.51	2000—2011	重庆市
CASA * ^[21]	324.02	1998—2007	三峡库区重庆段
CASA * ^[31]	487.21	2000—2009	三峡库区
CASA * ^[32]	402.34	2000—2003	西南喀斯特地区
GLOPEM-CEVSA ^[33]	534.55	2000—2011	重庆市
MOD17A3 ^[34]	585.15	2000—2010	重庆市
MOD17A3 **	590.94	2000—2015	三峡库区重庆段

CASA:光能利用率模型 Carnegie-Ames-Stanford Approach;GLOPEM-CEVSA:遥感—过程耦合模型 AVHRR Global Production Efficiency Model-Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere; * 表示修正后的模型, ** 为本文数据结果

3.2 NPP 时空变化特征

利用 ArcGIS 10.3 计算得到 2000—2015 年 NPP 均值的空间分布(图 1)。研究区多年 NPP 均值主要集中在 $400\text{—}600$ 、 $600\text{—}800$ (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,下同)两个范围区间。 $400\text{—}600$ 范围主要分布在长江以北的忠县、长寿等耕地地区; $600\text{—}800$ 范围主要分布在东北部的巫溪、巫山、奉节以及长江以南的石柱、武隆,江津区的四面山等海拔较高的林地地区;低值区($\text{NPP} < 200$ 和 $200\text{—}400$)主要分布在重庆主城区附近以及长江沿岸两侧的生态消落地带;高值区($800\text{—}1000$ 、 $1000\text{—}1200$ 以及 $\text{NPP} > 1200$)分布较为零散。16 年来 NPP 均值总体变化范围为 $76\text{—}1282 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,空间特征表现为从东到西逐渐减少。

采用简单差值法利用 ArcGIS 10.3 计算得到 16 年来研究区 NPP 的空间变化(图 2)。2015 年与 2000 年相比,大多数地区的 NPP 值增加,只有少数地区的 NPP 值减少。其中,NPP 值增加的区域约占研究区面积的 86.85%。增加幅度主要在 $0\text{—}100$ 间,约占研究区面积的 57.44%,包括武隆、丰都、石柱等区县;增加幅度在 $100\text{—}200$ 的区域约占 29.16%,主要有开县、云阳、奉节、巫山;NPP 值减少的区域主要集中在主城区,其中 NPP 减少差值大于 200 的区域仅占总面积的 0.38%。

2000—2015 年,研究区 NPP 多年均值为 590.94 (单位: $\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,下同)。2000、2005、2010、2015 年 NPP 均值分别为 580.51 、 590.96 、 588.76 、 619.58 。16 年来 NPP 均值变化趋势表现为:2001 年发生伏旱^[22],NPP 值开始减少,到 2002 年增加到峰值 668.02 ,2003 年库区开始蓄水,研究区生态环境得到改善^[35],植被生长良好,NPP 值趋于稳定水平(NPP 值在 590.94 上下波动),到 2011 年发生极端高温事件,导致 NPP 达到最低值 464.64 ,2012 年后又开始增加,至 2014 年后恢复至稳定水平(图 3)。从整体来看,16 年间 NPP 均值变化有增

有减,其总体趋势基本保持不变。2000—2005年,NPP变化呈轻度增长,面积约占45%,稳定不变的区域约占29%,明显增长的地区(9%)主要分布在研究区的中部(忠县、丰都);2005—2010年,NPP变化表现为稳定不变的区域面积占比最大,约为40%,其次为轻度降低(26%),明显降低的区域(5%)主要集中在研究区的中部沿河流地段和主城区;2010—2015年,NPP变化表现为明显增长,约占65%,轻度增长面积占28%,主要分布在东北部地区;2000—2015年,绝大部分地区NPP值保持稳定,增长区主要集中在研究区东北部,减少区主要集中在主城区附近(图3、图4)。

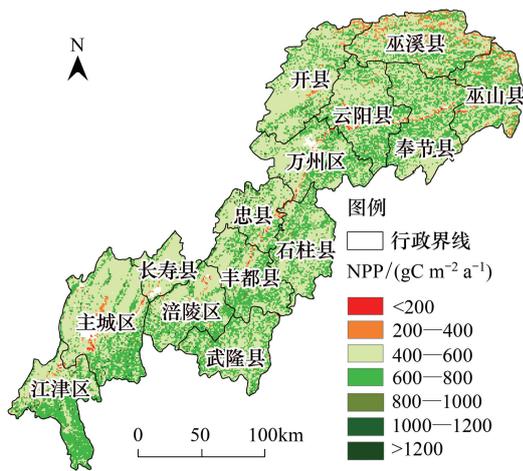


图1 2000—2015年三峡库区重庆段NPP均值分布图

Fig.1 Distribution of the average annual NPP from 2000 to 2015 in the Chongqing TGRA

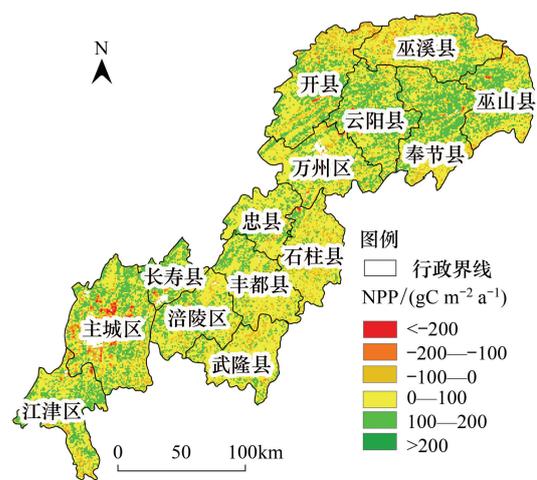


图2 三峡库区重庆段2000—2015年NPP差值分布图

Fig.2 Difference of NPP from 2000 to 2015 in the Chongqing TGRA

TGRA: 三峡库区 Three Gorges Reservoir Area

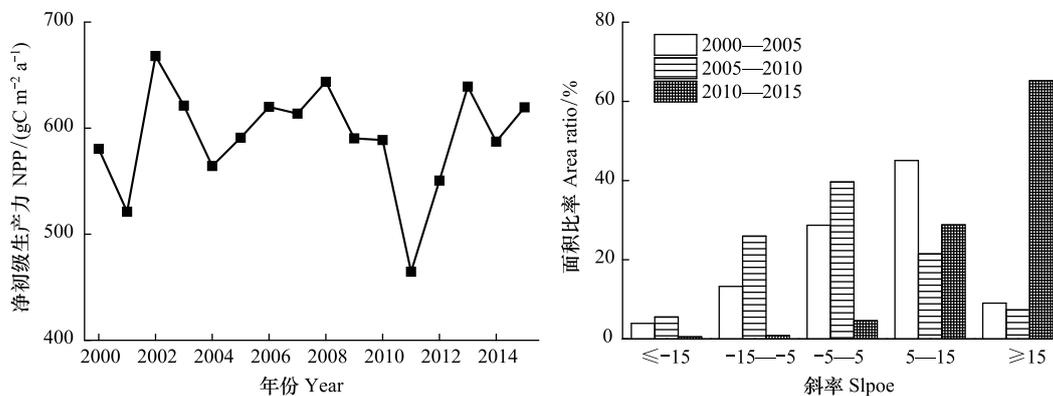


图3 2000—2015年三峡库区重庆段NPP变化趋势

Fig.3 NPP variation trend in the Chongqing TGRA from 2000 to 2015

利用分辨率为1 km的4期土地利用数据,使用ArcGIS 10.3中的分区统计模块(Zonal Statistics as Table)分别统计2000、2005、2010、2015年研究区NPP总量,得到NPP总量分别约为25.6 TgC(1 TgC=10¹² gC)、26.2 TgC、26.6 TgC、28.5 TgC,呈总体增长趋势。其中耕地对NPP总量的贡献最大,约为11.8 TgC,占NPP总量的44%;其次是林地,NPP总量约为10.7 TgC,占NPP总量的40%;草地约占NPP总量的14%;其他用地约占NPP总量的2%(图5)。

3.3 区域景观格局变化

研究区景观类型以耕地和林地为主,耕地主要分布在低海拔的西南部,林地主要分布在高海拔的东北部。2000—2015年,其他用地面积增加826 km²,3个时段变化率分别为:12.6%、30.1%、45.6%,增速不断加快;耕

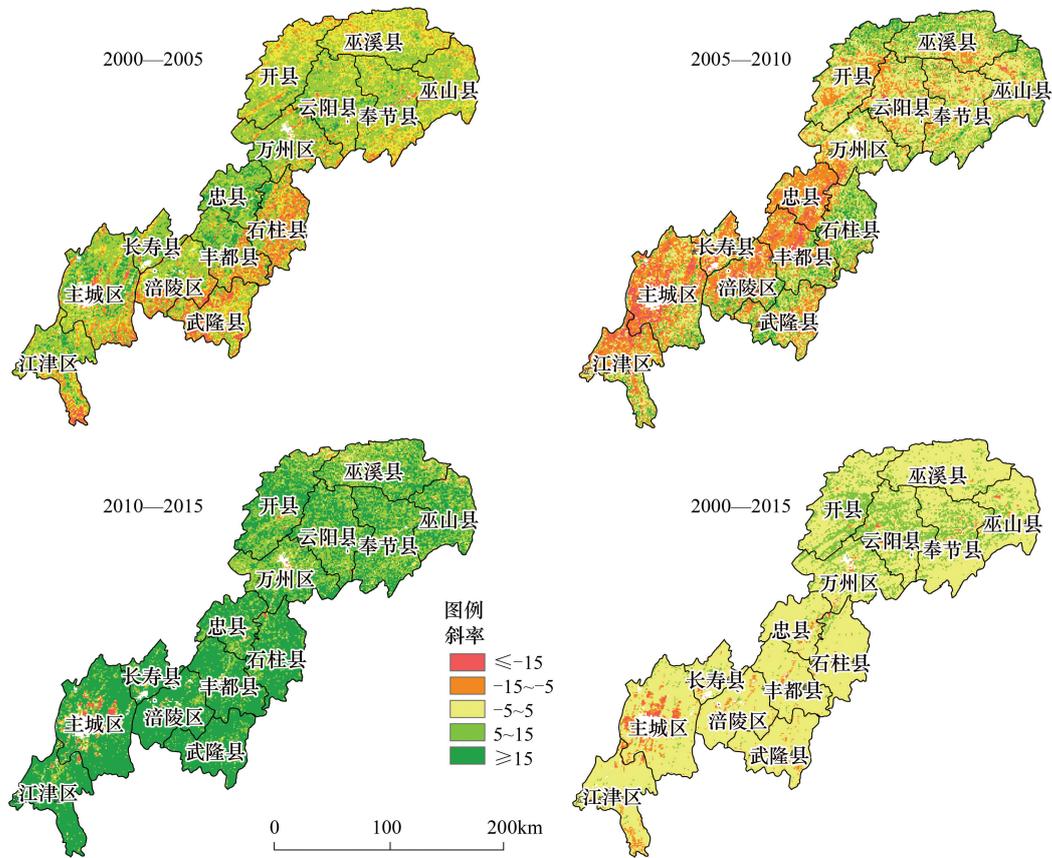


图4 2000—2015年三峡库区重庆段 NPP 变化斜率空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of NPP variation slope in Chongqing TGRA from 2000 to 2015

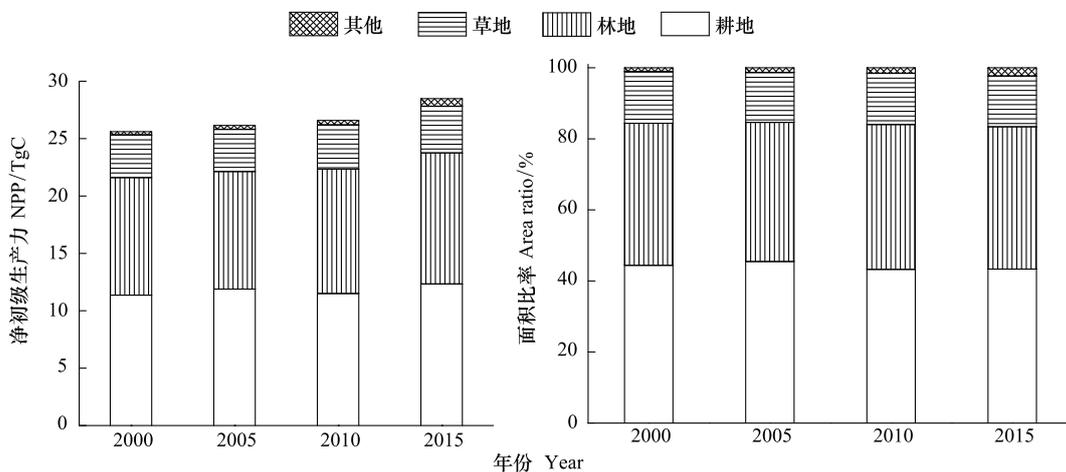


图5 2000、2005、2010、2015年三峡库区重庆段 NPP 总量变化

Fig.5 Total NPP variation of the Chongqing TGRA in 2000, 2005, 2010, 2015

地不断减小,减小面积约 970 km²,变化率分别约为: -1.2%、-1.5%、-2.4%,减速逐渐加快;林地表现为先增长后减少,总体呈增长趋势,增长面积约 681 km²,变化率分别为 3.8%、0.4%、-0.2%,增势逐渐减缓;草地面积也在不断减少,16 年减少了 156 km²,但其变化率(-2.0%、-0.2%、-0.3%)在逐渐降低。

16 年来耕地面积不断减小,主要转换为其他用地(777 km²)、林地(289 km²)和草地(118 km²);林地面积

增加,主要来源于耕地和草地(207 km²)的转换;草地面积减少,除了转换为林地外,还转换为耕地(83 km²)和其他用地(53 km²)(表2)。

表2 2000—2015年三峡库区重庆段土地利用转移矩阵/km²

Table 2 Land-use transfer matrix of Chongqing TGRA from 2000 to 2015

2000\2015	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	其他 Other land
耕地 Farmland	19437.98	288.50	117.92	777.48
林地 Woodland	101.62	17564.16	51.019	85.11
草地 Grassland	83.03	207.50	6266.52	52.58
其他 Other land	6.23	1.20	1.12	1056.20

TGRA:三峡库区 Three Gorges Reservoir Area

2000—2015年,研究区景观格局指数总体变化不大。SHDI各年份平均值为2.28,总体呈上升趋势,表明斑块类型增加;PD均值为0.32,基本保持稳定不变,表明景观破碎化程度变化不大;AI平均值约为66.66,AI减小,表明同一土地利用类型集中分布度降低(表3)。3个指数反映了研究区景观格局的变化:景观多样性增加,土地利用类型集中度降低,景观破碎化程度较低且维持稳定状态。

表3 2000、2005、2010、2015年三峡库区重庆段景观格局指数

Table 3 Landscape indexes of Chongqing TGRA in 2000, 2005, 2010, 2015

年份 Year	景观格局指数 Landscape indexes			年份 Year	景观格局指数 Landscape indexes		
	SHDI	PD	AI		SHDI	PD	AI
2000	2.28	0.32	67.23	2010	2.29	0.32	66.08
2005	2.27	0.32	67.23	2015	2.31	0.32	66.08

SHDI:香农多样性指数 SHannon's Diversity Index; PD:斑块密度 Patch Density; AI:聚合度 Aggregation Index

3.4 景观格局变化对 NPP 变化的影响分析

3.4.1 土地利用变化对 NPP 的影响

由于其他用地(主要为城市建成区)中的植被较少,尽管该类型面积变化较大,但对 NPP 的影响较小(图5),因此本文只探讨耕地、林地和草地对 NPP 变化的影响。2000—2005年,林地变化最大,增长面积约650 km²,NPP 相应增长了约0.02 TgC,增长幅度(0.02%)不大;草地面积减小,NPP 相应也减少;2005—2010年,林地持续增长,NPP 相应增加,增幅(5.77%)较大;草地面积继续减少,但 NPP 总量增加;2010—2015年,林地面积开始减少,减少幅度较小,NPP 仍然保持增加(5.32%)趋势;草地面积持续减少,其 NPP 总量继续增加。2000—2015年,耕地面积持续减小,其 NPP 表现为先增加后减少再增加(图6)。

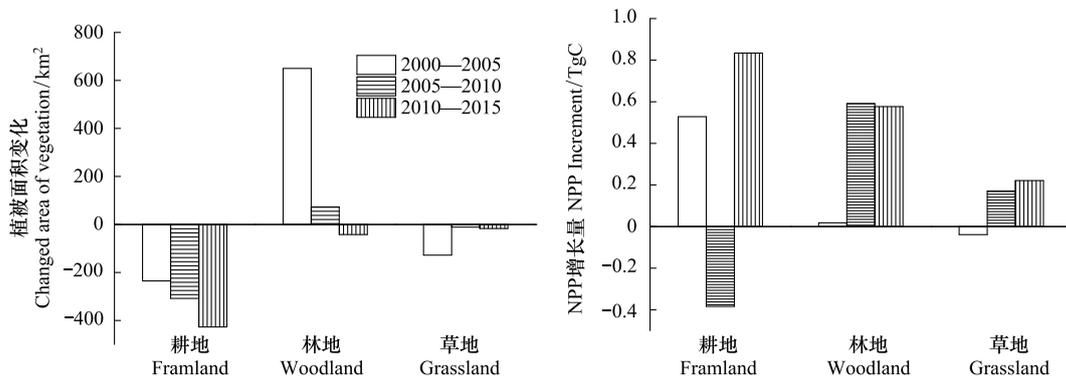


图6 土地利用面积变化对 NPP 的影响

Fig.6 Effect of land-use changes on NPP

根据贡献率(R)计算出3个时段土地利用面积变化对 NPP 的影响量和贡献率(表4)。2000—2005年,

土地利用变化对 NPP 的增长表现为促进作用,面积变化使 NPP 增加了 0.17 TgC,贡献率为 26.49%;2005—2010 年,土地利用变化抑制了 NPP 增长,使 NPP 减少了 0.15 TgC,贡献率为 59.76%;2010—2015 年,土地利用变化对 NPP 也表现为抑制作用,NPP 总量减少了 0.29 TgC,贡献率为 17.27%。

3.4.2 景观格局指数变化与 NPP 的相关性分析

将景观格局指数分布图和 NPP 分布图按 20 km×20 km 的大小划分成连续的格网作为样方^[38],以该尺度分析景观格局指数与 NPP 的相关性。剔除无效值和不对应的值后共计 102 个格网。2000—2015 年,SHDI、PD 与 NPP 呈正相关,SHDI 各年份相关系数为 0.228、0.216、0.205、0.198,PD 各年份相关系数分别为 0.367、0.210、0.231、0.198。而 AI 与 NPP 呈负相关,各年份相关系数分别为-0.386、-0.343、-0.370、-0.321(图 7)。

分别对 4 个年份的 3 个景观格局指数进行主成分分析,方差大于 1 的成分只有一个,提取该主成分。第一主成分中各年份的特征值分别约为 2.368、2.332、2.375、2.282,累积载荷分别约为 76%、79%、78%、79%。4 个年份中第一主成分与 NPP 均呈显著正相关(显著性水平为 0.01)。将各年份的第一主成分与 NPP 值进行线性拟合(图 8),可以看到四个年份中的 NPP 值均随第一主成分的增大而增大。

4 讨论

4.1 不同景观类型与 NPP 变化的关系

景观格局变化是土地利用变化的直接反映。不同时期、不同景观类型,土地利用变化对 NPP 的影响不同(图 6)。2000—2005 年,城市扩张、退耕还林等因素导致耕地减少,林地大量增加。耕地虽减少,但其 NPP 总量增长,这可能与耕地的产量提高有关。造林带的形成增加了林地面积,但该时段处于退耕还林初期,人造林多为幼苗,林地虽增加,但其 NPP 产量不高。2005—2010 年,耕地持续减少,其 NPP 总量减少。查阅该时段重庆市统计年鉴发现耕地产量下降。该时期发生的旱灾(2006 年)、雪灾(2008 年)等导致耕地产量下降,间接导致 NPP 的减少。该时段林地增长减缓,但幼龄林随着林龄的增加,NPP 产量增加,故林地 NPP 总量增加。2010—2015 年,耕地继续减少,林地也开始减少,但两者的 NPP 总量继续增加,这与林龄增长和耕地产量提高有关。成方妍等^[39]虽指出幼龄林成长为中龄林,NPP 产量会有所下降,但黄从德等^[40]研究表明重庆地区幼龄林和中龄林碳储量呈增长趋势,成熟林的碳储量呈下降趋势。草地由于水体淹没、城镇重建等因素导致 16 年来数量减少,但受到近年来生态系统保护政策的影响,草地 NPP 总量也表现为增长。土地利用面积变化影响 NPP 的增长,但不同景观类型受不同因素的影响,导致 NPP 变化存在差异。因此,合理规划景观类型比例对于提高区域 NPP 增长具有重要意义。

土地利用变化对 NPP 的贡献率在 3 个时段上存在差异。2000—2005 年土地利用变化对 NPP 变化表现为促进作用,能够解释 NPP 增长区域,而对 NPP 减小区域影响小;后两个时段土地利用变化对 NPP 的影响表现为抑制作用,但 NPP 总量仍持续增加,可能与这两个时段气候变化对 NPP 的影响占主导地位有关,且影响 NPP 变化的还有如林龄、地形等因素,也可能使 NPP 总量增加^[41]。

表 4 土地利用变化对 NPP 总量变化的贡献率

Table 4 Contribution rate of land-use changes to total NPP variation

时间段 Period	影响量 Influence amount/(TgC)	贡献率(R) Contribution rate
2000—2005	0.17	26.49
2005—2010	-0.15	59.76
2010—2015	-0.29	17.27

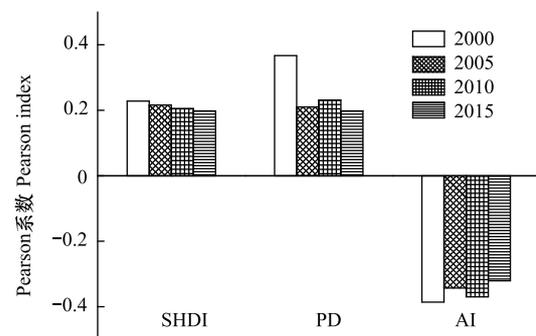


图 7 景观格局指数与 NPP 相关性分析

Fig.7 Correlation between Landscape indexes and NPP

SHDI: 香农多样性指数 SHannon's Diversity Index; PD: 斑块密度 Patch Density; AI: 聚合度 Aggregation Index

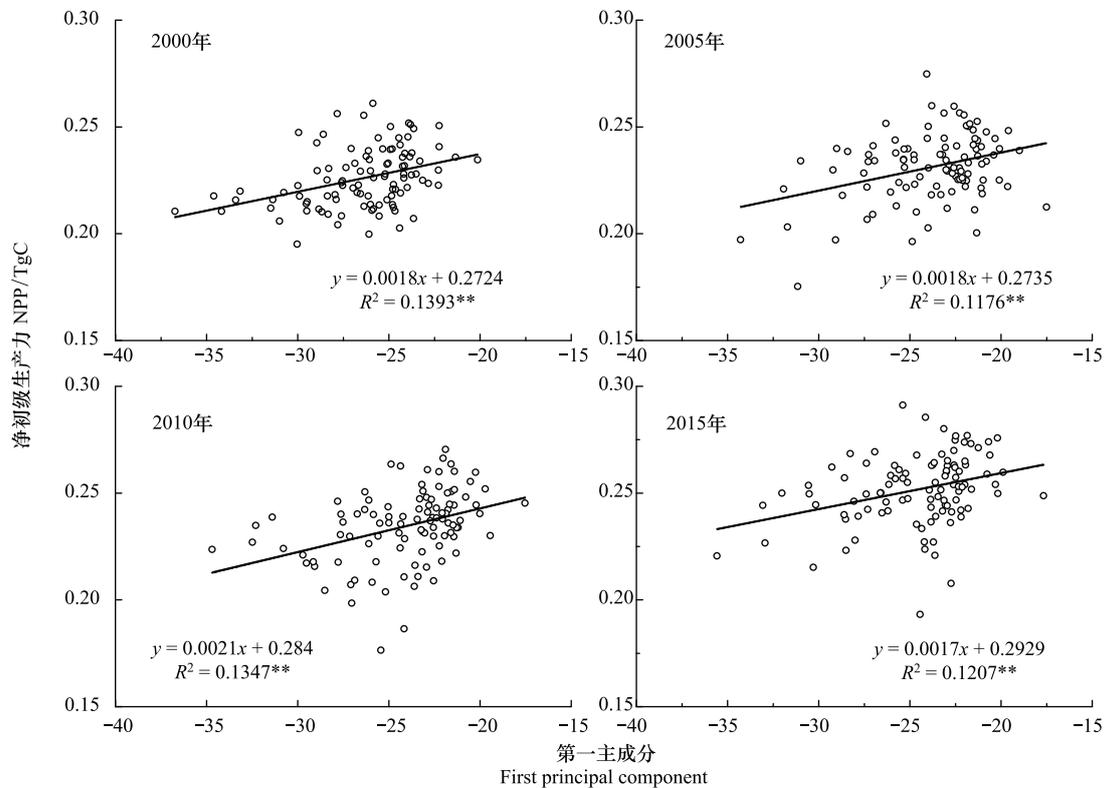


图 8 景观指数第一主成分与 NPP 拟合关系

Fig.8 Relationship between the first principal component of landscape indexes and NPP

* * 表示显著相关;样本数 $n = 102$

4.2 景观格局变化对 NPP 变化的影响

不同空间分辨率的数据对景观格局将产生粒度效应^[42]。已有研究表明在景观水平上斑块密度 PD 随空间粒度变粗,其波动幅度趋于平缓;聚集度 AI 随时间推移呈下降趋势,对粒度变化敏感度低,即降幅不随粒度变粗而变化;多样性指数 SHDI 随时间推移单调上升且增幅不随粒度变粗而变化,对于粒度变化不敏感^[36,43]。本文研究中,PD 基本维持不变,AI 由 67.23 下降到 66.08,SHDI 由 2.28 增加到 2.31,其变化趋势与陈雅如、朱明研究结果相符。

16 年来研究区景观异质性增加,可能与造林带的形成以及质量效应有关。造林带的形成丰富了植被类型,使景观多样性增加。质量效应指一个物种的某些个体从能够成功建群的区域转移到不适其生存的区域^[44]。库区生态消落带因质量效应的存在,增加了物种的多样性,使景观异质性增加。研究区景观破碎化程度基本保持不变,与张煜星等^[45]研究表明生态工程的实施发挥了显著成效,景观破碎化明显缓解的结果不符。这可能与粒度效应所产生的指数对斑块变化不敏感以及造林带的形成并不意味着景观破碎化趋势的变好有关。研究区景观聚集度下降,可能是林地主要分布在高海拔的山地,而耕地分布在海拔较低的地区,新形成的造林带与天然的林地并不连续,造成研究区景观聚集度下降。

SHDI、PD 与 NPP 呈正相关,表明随着景观类型和景观破碎度的增加,NPP 总量增加。研究区景观破碎度虽变化不大,但因新增加的造林带以及质量效应、林龄效应的存在,植被类型增加,幼龄林和部分中龄林使 NPP 总量增加;AI 与 NPP 呈负相关,而较为集中分布的天然植被主要为固碳能力逐渐下降的成熟林,导致 NPP 减少。景观指数主成分分析中,四个年份的 NPP 均与第一主成分呈显著正相关,表明要提高区域固碳能力需要适当增加区域植被类型、对森林进行抚育更新,并控制成熟林数量。需要指出的是本文中景观格局指数与 NPP 的相关性不高,这可能与所使用的土地利用数据空间分辨率不高有关。另外,第一主成分的累积载

荷值最高只达到 79%, 虽未达到大于 85% 的提取要求, 但未影响景观格局指数与 NPP 之间的线性关系。

5 结论

三峡库区重庆段 2000—2015 年 NPP 均值空间分布特征表现为从东北部山区到西部丘陵区逐渐减少; NPP 空间变化有增有减, 增长区主要为研究区东北部山区, 减少区主要集中在重庆主城区内; 16 年来 NPP 总量呈总体上升趋势, 共增加了 2.9 TgC。土地利用的类型转变、面积变化、耕地产量和林地的林龄效应等对区域植被固碳能力、NPP 空间变化产生影响; 从景观格局的角度来看, 不同景观类型受不同因素的影响, NPP 变化存在差异。景观格局的优化, 即斑块类型和景观破碎度的增加可促使 NPP 增长, 而斑块聚集度的增长将导致 NPP 的下降。因此, 在进行区域规划时, 要考虑到不同的景观类型植被固碳能力不同, 合理的景观类型比例才能促使区域 NPP 增长; 另外, 丰富区域植被类型, 增加景观多样性和破碎度, 重视对幼龄林的培育并控制成熟林数量, 改善区域景观格局, 也能提高区域植被固碳能力, 增加 NPP 的增长空间。

参考文献 (References):

- [1] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征. 生态学报, 2011, 30(12): 2776-2782.
- [2] 张杰, 潘晓玲. 天山北麓山地-绿洲-荒漠生态系统净初级生产力空间分布格局及其季节变化. 干旱区地理, 2010, 33(1): 78-86.
- [3] DeFries R S, Field C B, Fung I, Collatz G J, Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 803-815.
- [4] Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J, Ricketts T. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 434-443.
- [5] Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, Running S W. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 401-410.
- [6] 孙政国, 孙成明, 杨齐, 李建龙. 土地利用与覆盖变化对中小城市净初级生产力的影响. 中国农学通报, 2012, 28(15): 291-296.
- [7] Xu X B, Tan Y, Yang G S, Li H P, Su W Z. Impacts of China's Three Gorges Dam Project on net primary productivity in the reservoir area. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(22): 4656-4662.
- [8] Imhoff M L, Tucker C J, Lawrence W T, Stutzer D C. The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2549-2556.
- [9] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. 自然资源学报, 2016, 31(6): 961-972.
- [10] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 张志军, 丁玲玲, 张涛, 许丽丽. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. 地理学报, 2016, 71(9): 1596-1612.
- [11] Mao J F, Wang B, Dai Y J, Woodward F I, Hanson P J, Lomas M R. Improvements of a dynamic global vegetation model and simulations of carbon and water at an upland-oak forest. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(2): 311-322.
- [12] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 58-66.
- [13] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282-292.
- [14] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桃, 宋开山, 李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [15] 蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
- [16] 李恒凯, 欧彬, 刘雨婷. 基于 MOD17A3 的南岭山地森林区植被 NPP 时空分异分析. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 197-202.
- [17] 程辉, 吴胜军, 王小晓, 姜毅, 陈春娣, 王雨, 吕明权. 三峡库区生态环境效应研究进展. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 127-140.
- [18] 曹银贵, 王静, 刘正军, 程焯, 刘爱霞, 许宁. 三峡库区近 30 年土地利用时空变化特征分析. 测绘科学, 2007, 32(6): 167-170.
- [19] 滕明君, 曾立雄, 肖文发, 周志翔, 黄志霖, 王鹏程, 佃袁勇. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3683-3693.
- [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. 资源科学, 2011, 33(10): 1940-1947.
- [21] 李月臣, 简太敏, 何志明, 胡晓明. 1998—2007 年三峡库区(重庆段)植被净第一性生产力及其时空特征. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2012, 29(3): 61-65.

- [22] 简太敏. 三峡库区(重庆段)生态服务功能定量遥感测量与价值估算[D]. 重庆:重庆师范大学, 2012.
- [23] 张莎. 基于长时间序列多源遥感数据的河北省植被 NPP 时空分布研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2015.
- [24] 李晓荣, 高会, 韩立朴, 刘金铜. 太行山区植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 498-508.
- [25] 吴云, 曾源, 赵炎, 吴炳方, 武文波. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析. 资源科学, 2010, 32(7): 1417-1424.
- [26] 国洪磊, 周启刚. 三峡库区蓄水前后土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2016, 23(5): 222-228.
- [27] Hicke J A, Lobell D B, Asner G P. Cropland area and net primary production computed from 30 years of USDA agricultural harvest data. *Earth Interactions*, 2004, 8(10): 1-20.
- [28] 崔晓伟, 张磊, 朱亮, 宋戈, 吴炳方. 三峡库区开县蓄水前后景观格局变化特征. 农业工程学报, 2012, 28(4): 227-234.
- [29] 徐佩. 上海市土地利用/土地覆盖变化对城市植被净初级生产力的影响[D]. 上海:华东师范大学, 2015.
- [30] 周珺. 基于遥感数据的重庆市净初级生产力(NPP)时空特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2013.
- [31] 陆逸. 基于 MODIS 数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- [32] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. 生态学报, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [33] 张锐. 基于遥感—过程耦合模型的重庆地区 NPP 时空模拟研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
- [34] 刘琳, 李月臣, 朱翠霞, 杨扬, 李琼瑶. 2001 年—2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系. 遥感信息, 2013, 28(5): 99-108.
- [35] 杨会中, 刘丽娟, 马金龙, 王进, 李小明. 基于 Landsat 8 遥感影像反演干旱区净初级生产力的尺度效应. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1294-1300.
- [36] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2017.
- [37] 刘玉安, 黄波, 易成功, 程涛, 余健, 曲乐安. 基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析. 农业工程学报, 2013, 29(13): 130-141.
- [38] 谢圣. 湖北省土地利用景观格局及其影响因素分析[D]. 武汉:华中师范大学, 2013.
- [39] 成方妍, 刘世梁, 张月秋, 尹艺洁, 候笑云. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [40] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [41] 吴艳艳. 城市化过程广州土地覆盖变化对净初级生产力格局的影响[D]. 广州:中山大学, 2016.
- [42] Teng M J, Zeng L X, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F, Dian Y Y. Responses of landscape metrics to altering grain size in the Three Gorges Reservoir landscape in China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1055.
- [43] 朱明, 濮励杰, 李建龙. 遥感影像空间分辨率及粒度变化对城市景观格局分析的影响. 生态学报, 2008, 28(6): 2753-2763.
- [44] 彭羽, 范敏, 卿凤婷, 薛达元. 景观格局对植物多样性影响研究进展. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1061-1068.
- [45] 张煜星, 严恩萍, 夏朝宗, 党永锋. 基于多期遥感的三峡库区森林景观破碎化演变研究. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(7): 1-7.