

2005—2014 年南方农牧交错带净初级生产力 时空分布特征

赵唯茜, 杜华明, 董廷旭, 胡利利

(绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了解我国南方农牧交错带内生态系统生产能力的变化程度, 以 2005—2014 年 MOD17A3H 数据为数据源, 利用简单差值法和一元线性回归分析法, 对区内的植被年均 NPP 空间分布及变化趋势进行了分析。结果表明: (1) 2005—2014 年南方农牧交错带内植被 NPP 分布差异较大, 整体呈南部高北部低。(2) 年均植被 NPP 为 $389 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 平均植被 NPP 变化范围在 $344 \sim 426 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间。(3) 2014 年较 2005 年相比, 南方农牧交错带植被 NPP 增加了 $106 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。但 10 年间植被 NPP 总体变化呈略微减少趋势, 减少的地区面积占南方农牧交错区总面积的 57%。(4) 不同生态系统平均植被 NPP 均值表现为: 森林生态系统 > 农田生态系统 > 灌丛生态系统 > 湿地生态系统 > 草地生态系统; 不同生态系统植被 NPP 变化相似, 呈波动略微减少变化。说明区域内生态系统变化波动较为明显, 应对该区域生态系统给予更多的保护。

关键词: NPP; 时空变化; 农牧交错带; MOD17A3H

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0236-06

Temporal-Spatial Characteristics of the Vegetation Net Primary Production in the Farming-Pastoral Eco-Tone of Southern China During 2005—2014

ZHAO Weixi, DU Huaming, DONG Tingxu, HU Lili

(College of Resource and Environment Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to understand the change degree of ecosystem productivity in the farming-pastoral eco-tone southern China, the 2005—2014 annual vegetation NPP data from MOD17A3H dataset was used to analyze the inter-annual variation vegetation NPP and distribution of the average annual vegetation NPP by difference method and a linear regression. The research results indicated that: (1) significant differences in distribution of vegetation NPP presented a decrease trend from north to south, the average annual vegetation NPP was $389 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, average annual vegetation NPP change ranged from $344 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ to $426 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in the farming-pastoral eco-tone of southern China during 2005—2014; (2) the average annual vegetation NPP increased by $106 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ in 2014, the change presented a slight decrease trend, the areas with the decreased annual vegetation NPP accounted for 57% of the territory of the farming-pastoral eco-tone of southern China; (3) the average vegetation NPP for different ecosystems decreased in the sequence: that forest ecosystem > farmland ecosystem > scrub ecosystem > wetland Ecosystem > grassland Ecosystem; the change of vegetation NPP in different ecosystems was similar, and showed a slight decrease trend. It indicated that the fluctuation of ecosystem changes was more obvious and the protection of ecosystem should be strengthened.

Keywords: NPP; spatial-temporal characteristics; farming-pastoral eco-tone southern; MOD17A3H

农牧交错带是我国一条重要的生态安全屏障带, 也是对气候环境变化和人类活动影响反应最为敏感的区域^[1]。其日益恶化的生态环境受到了政府和理

论界的重视^[2]。南方农牧交错带是我国农牧交错带的重要组成部分^[2], 地处青藏高原与四川盆地、云贵高原的过渡地带, 区域内不同植被生态系统在水平空

间和垂直空间交错分布^[3]。既是我国重要的生物多样性保护和水源涵养区^[4],又是长江中下游地区的重要生态安全屏障。因此区域内生态系统的改变,会对周边区域产生较大影响,从而对区域内生态系统变化的了解显得极为重要。净初级生产力可直接反映出生态系统的变化情况。

净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指植被通过光合作用所产生的有机质总量减去植被自养呼吸后的剩余部分,是生态系统中其他生物成员生存和繁衍的物质基础^[5]。净初级生产力反映了植物群在自然条件下的生长状况和生产能力,是一个估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的重要生态指标^[6]。近年来我国学者对不同区域、不同尺度下植被 NPP 的研究工作相继展开^[7-9],但多数集中于某一行政区域内或单一自然地理单元内^[10-14]。对于像农牧交错带这样的地理单元过渡带内的 NPP 研究较少。因此,借助遥感和地理信息技术,利用 MODIS 的遥感数据,对南方农牧交错带内整体和不同植被生态系统 NPP 的空间分布和时间变化进行分析,进而掌握南方农牧交错带内生态系统变化情况。以期望为南方农牧交错带内生态系统的有效保护和植被资源的有效管理与合理利用提供理论参考。

1 研究区概况

南方农牧交错带位于 25.55°—34.31°N, 98.14°—104.42°E, 处于我国第一阶梯和第二阶梯交界处, 是青藏高原与四川盆地和云贵高原的过渡地带(图 1)。交错带内整体地势高, 地势起伏较大, 地势高差较大。整体趋势东南低, 西北高, 平均海拔大于 3 000 m。主要地貌表现为高山地貌和高原地貌。气候类型以高原山地温带、寒温带季风气候为主, 夏季受东南季风和西南季风影响, 降水丰沛, 冬季受西北季风影响气候寒冷。区内河流水系分布较多, 大体上呈“川”字形排列, 多数江河自西北流向东南方向, 主要江河有怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、大渡河、岷江等。植被主要有云杉、冷杉、红杉等林地, 以及高山灌丛和高山草甸等。行政区划上包括四川省的阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州和云南省迪庆藏族自治州。交错带内地广人稀, 少数民族较多。由于自然、社会等客观因素的限制影响, 致使经济发展相对缓慢。

2 数据来源以及研究方法

2.1 数据来源

文中所涉及到的遥感数据均来自美国宇航局(NASA)的 MODIS 产品(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。植被 NPP 数据为 MODIS 版本 6 的 MOD17A3H 数据集, 数据利用 BIOME-BGC 模型和光能利用率模型所建立的 NPP 估算模型, 模拟得到全球生态系统的年 NPP 值。版本 6 的 MOD17A3H 与版本 5.5 的 MOD17A3 相比, 使用了新的生物属性调查表(BPLUT)和新版的全球模型与融合室(GMAO)的日气象数据对 NPP 数值进行模拟, 提高了 NPP 的估算精度, 而且数据的空间分辨率提高到 500 m×500 m。目前该数据已广泛应用于不同空间尺度下的 NPP 和碳循环研究中。本文中选取了 2005—2014 年共 10 a 的 NPP 数据进行分析。土地覆盖分类所使用的数据为 MCD12Q1 数据集, 空间分辨率为 500 m×500 m。该数据通过对 Terra 和 Aqua 两颗卫星 1 a 的观测数据进行处理后, 根据国际生物圈计划分类标准, 确定了 17 个土地覆盖类别。MCD12Q1 数据集包含了 5 种不同的土地覆盖分类方案, 分别为国际生物圈计划分类方案、美国马里兰大学分类方案、基于 MODIS 数据叶面积指数/光合有效辐射的分类方案、基于 MODIS 数据净初级生产力分类方案、植物功能型方案。本文土地覆盖类型分类方案选用国际生物圈计划的分类方案, 对研究区域内土地覆盖分类进行提取。

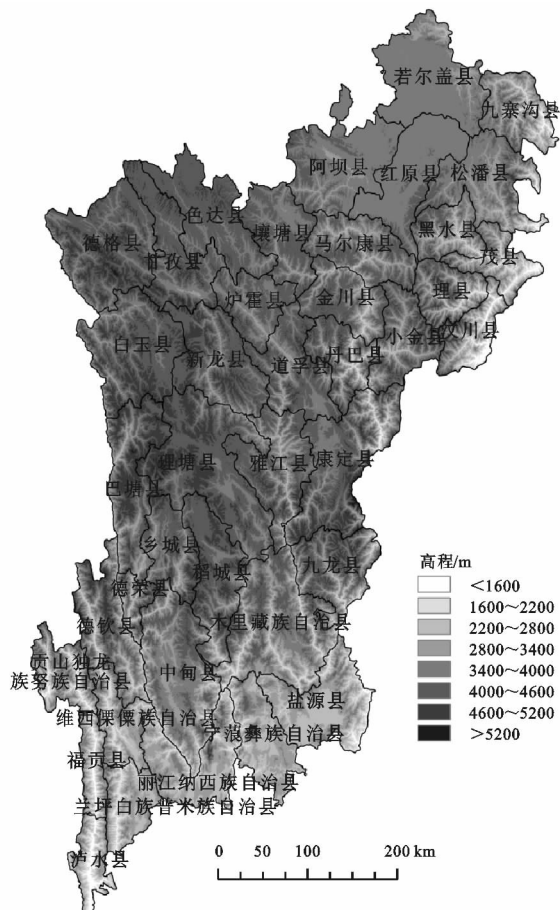


图1 南方农牧交错带区域分布

2.2 研究方法

研究区域跨度较大,涉及 MODIS 三景影像。因此在对数据提取和分析之前,使用 MODIS 重投影工具(MRT)对 HDF 格式的 MOD17A3H 数据集和 MCD12Q1 数据集进行波段提取、影像拼接,将影像投影坐标重新定义为 WGS_1984_Albers 投影,文件格式转换为 TIF 格式。应用 ArcGIS 对重投影后的影像进行研究区域的裁切,并对区域内数据进行提取、分析。

本文所涉及的植被 NPP 年际变化趋势分析处理方法主要有简单差值法和一元线性回归分析法,在像元的基础上,模拟研究区域内 2005—2014 年每个栅格像元植被 NPP 值的变化趋势。

简单差值法是对同一研究区域内,不同年份的影像进行相减,利用差值的大小来衡量在研究时间段内植被 NPP 值的变化程度和变化量。其计算公式为:

$$NPP_{\text{minus}} = NPP_{t_1} - NPP_{t_2} \quad (1)$$

式中: NPP_{minus} 为两个不同年份带的 NPP 的差值; t_1 , t_2 为不同的年份。

一元线性回归分析法是在栅格数据的每个像元基础上,对研究区域内 2005—2014 年 10 年间每个像元 NPP 值的变化趋势进行模拟,从而揭示不同时期内 NPP 变化趋势的空间特征。其计算公式如下:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i NPP_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: θ_{slope} 为研究区内 NPP 值的趋势线的斜率即线性倾向值; n 为研究时间段内总年数,本文中 $n=10$; i 为年数变量,即 $i=1 \sim n$; NPP_i 为第 i 年的 NPP 的平均值。随时间 i 的增加 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时, NPP 处于上升趋势;反之,随时间 i 的增加 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时, NPP 值则处于下降趋势。 θ_{slope} 的大小反映了 NPP 上升或下降的速率,也就是其趋势线的倾斜程度。

10 年间 NPP 的变化程度用百分比表示,其公式为:

$$NPP_{\text{change}} = \frac{\theta_{\text{slope}}}{NPP_{\text{mean}}} \times n \times 100\% \quad (3)$$

式中: NPP_{change} 为 NPP 值的变化百分比; θ_{slope} 为由公式(2)计算得出的 NPP 斜率; NPP_{mean} 为 10 a 的平均 NPP 值; n 为研究时间段内总年数,文中 $n=10$ 。

3 结果与分析

3.1 年均植被 NPP 值空间分布特征

2005—2014 年均植被 NPP 分布图(图 2)可以看出,由于受到经纬度地带性、植被覆盖、气候、地形等因素的综合影响,2005—2014 年植被 NPP 分布差异

较大,整体呈自西北部向南、向东增多的趋势。大约在 31°N 线以北地区植被 NPP 自西向东逐渐增加,介于 $240 \sim 503 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间。大约在 $29^\circ \sim 31^\circ\text{N}$, 呈西北向东南逐渐增加的趋势,植被 NPP 值介于 $274 \sim 405 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间。在 29°N 以南的地区,植被 NPP 自北向南大幅度增加,介于 $289 \sim 749 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间。从行政区域划分来看,云南省泸水县、玉龙县、宁蒗县植被 NPP 最大,分别为 748.72, 712.13, 671.84 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 3 县均处于低纬高原季风区,受高原和高山峡谷地形的影响较大,降水量丰富,日照时间充足,拥有良好的植被生长条件。四川省德格县、甘孜县、理塘县 NPP 均值最小,分别为 240.40, 243.34, 245.98 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 由于 3 个县处于青藏高原东部,受高原气候影响较大,境内气温低,冬长夏短,降水量较少,全年无霜期短,气候不利于植被生长。区域内河谷地带植被 NPP 值较高,沿河流呈带状分布。位于南部横断山脉的怒江、澜沧江、金沙江流域内河谷植被 NPP 高于位于北部大渡河、岷江河谷内植被 NPP。

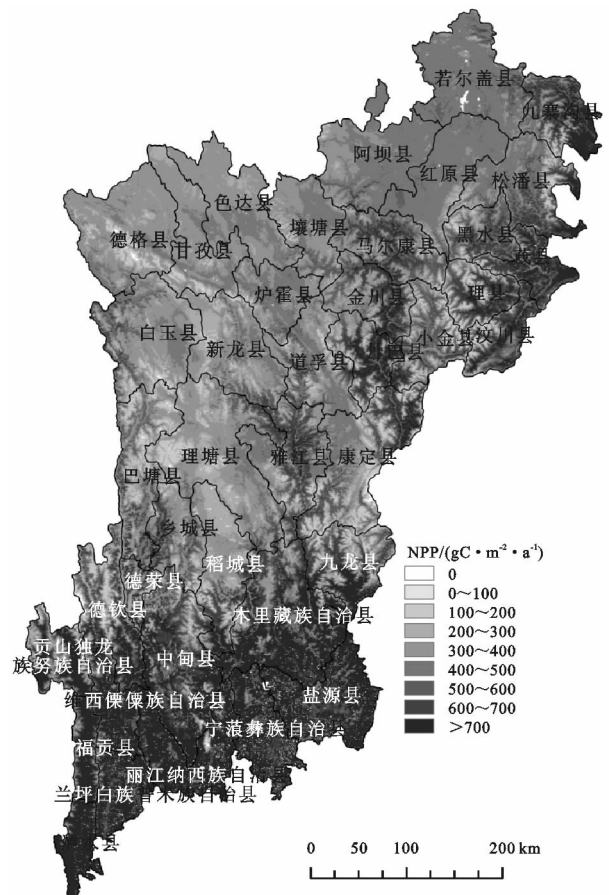


图 2 2005—2014 年南方农牧交错带年均植被 NPP 分布

3.2 植被 NPP 年际变化特征

2005—2014 年南方农牧交错带年植被 NPP 变化范围为 $344 \sim 426 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 年均植被 NPP 为

389 gC/(m²·a)。平均变化幅度为-0.48 gC/(m²·a)。植被 NPP 在 2012 年时最低,在 2006 年时植被 NPP 值最高。通过对 2005—2014 年南方农牧交错带内植被 NPP 的分级构成比例(图 3)分析发现,南方农牧交错带年植被 NPP 主要分布在 200~300 gC/(m²·a), 300~400 gC/(m²·a)范围内,分别占南方农牧交错带总面积的 18.87%~26.21%和 18.43%~26.83%。其次为 100~200 gC/(m²·a),400~500 gC/(m²·a)范围内,分别占南方农牧交错带总面积的 7.12%~15.66%和 9.67%~13.69%。再其次为 500~600 gC/(m²·a)和>700 gC/(m²·a)区间,分别占南方农牧交错带总面积的 7.83%~10.78%和 4.91%~13.01%。植被 NPP 在 600~700 gC/(m²·a)范围内所占土地面积最少,占南方农牧交错带总面积的 5.7%~9.73%。

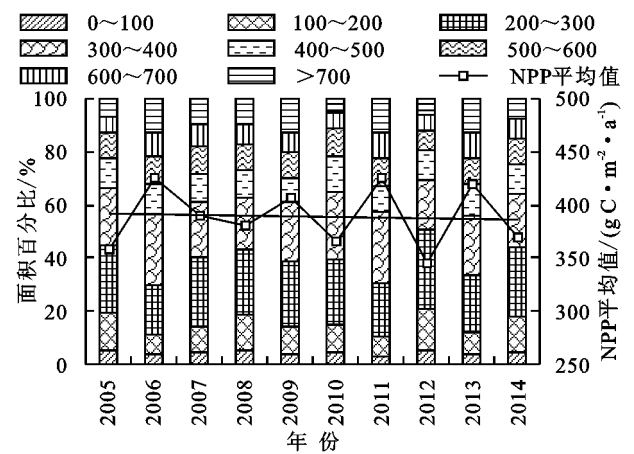


图 3 2005—2014 年南方农牧交错带平均植被 NPP 年际变化和面积占比

利用一元线性回归法分析得出南方农牧交错带平均植被 NPP 变化率(图 4)。分析发现,南方农牧交错区 10 年间植被 NPP 减少的面积大于增加面积,植被 NPP 呈减少的面积占南方农牧交错带总面积的 57.41%,呈增加趋势的面积占总面积的 42.59%。其中减少 0~15%的面积占总面积的 47.88%,占南方农牧交错带土地面积最大,且在交错带内广泛分布。减少 15%~30%的面积占总面积的 8.56%,主要分布于南部贡山县、德钦县、得荣县、中甸县、木里县、稻城县的河谷地带和西部高原地区的白玉县、德格县、甘孜县、色达县和炉霍县;减少大于 30%的面积占总面积的 0.97%,主要在南部的河谷地带分和汶川县集中分布。增加 0~15%的面积占总面积的 34.41%,除西部高原的德格县、色达县、甘孜县、炉霍县、白玉县分布相对较少,在其他县域广泛分布;增加 15%~30%的面积占南方农牧交错带总面积的 6.98%,分布较多的区域主要在东部,主要包括九寨沟县、松潘县、黑水县、理县、小金县、金川县、丹巴县、道孚县、雅

江县、康定县、九龙县、盐源县、宁蒗县、福贡县、泸水县;增加大于 30%的面积占总面积的 1.21%,在东部分布较多,主要包括松潘县、茂县、理县、汶川县、小金县、丹巴县、康定县、九龙县。

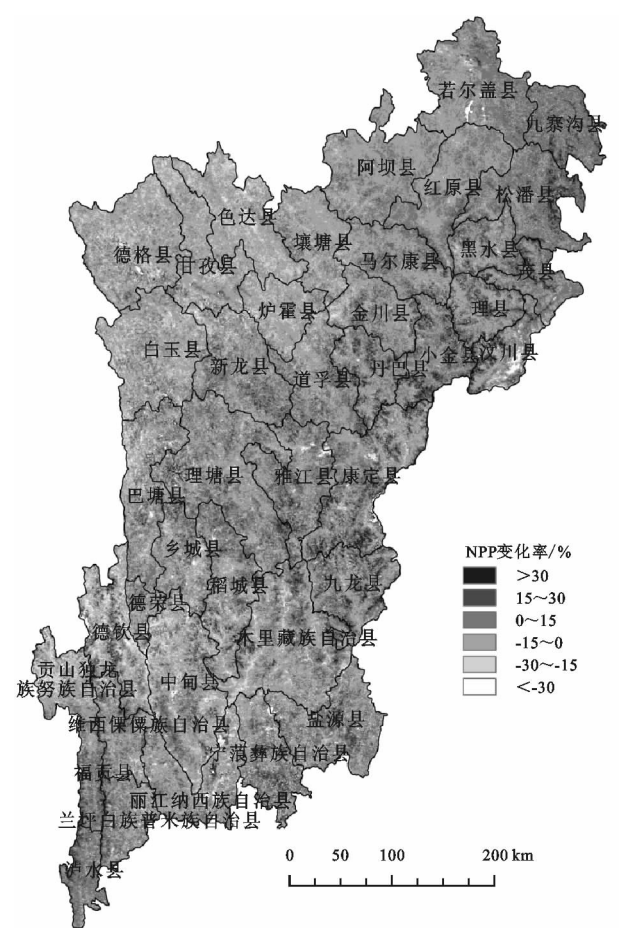


图 4 2005—2014 年南方农牧交错带植被 NPP 变化百分率

将本文研究时间段端点时间,即 2005 年和 2014 年的年植被 NPP 影像进行简单差值计算,得出 10 a 的植被 NPP 变化特征分布图(图 5),2014 年与 2005 年相比平均植被 NPP 增加了 106 gC/(m²·a)。通过对图 5 分析发现,2014 年与 2005 年相比,南方农牧交错带内植物 NPP 呈减少的面积占南方农牧交错带总面积的 42.05%,植物 NPP 呈增长的面积占南方农牧交错带总面积的 57.95%。其中,增幅大于 80 gC/(m²·a)的地区占总面积的 8.38%,主要分布在东北部的九寨沟县、松潘县、黑水县、茂县、汶川县、马尔康县、丹巴县,中部的雅江县以及南部的盐源县、宁蒗县、贡山县、维西县、福贡县、兰坪县、泸水县。增幅在 40~80 gC/(m²·a)的地区占总面积的 15.02%,在九寨沟县、松潘县、黑水县、茂县、理县、汶川县、马尔康县、小金县、金川县、丹巴县、道孚县、雅江县分布较多;增加在 0~40 gC/(m²·a)的地区占总面积的 34.56%,广泛分布于除福贡县和泸水县以外其他区域。减少 0~40 gC/(m²·a)的地区占总面积的 29.18%,在

除九寨沟县、茂县、汶川县、马尔康县、金川县、丹巴县、雅江县、维西县、福贡县、泸水县之外的地区分布较多。减少 $40 \sim 80 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的地区占总面积的 9.67% , 在色达县、炉霍县、甘孜县、德格县、白玉县、巴塘县、乡城县、得荣县、德钦县、中甸县、木里县、盐源县、宁蒗县、丽江市分布广泛。减少大于 $80 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的地区占总面积的 3.2% , 主要分布在汶川县、色达县、康定县、德钦县、中甸县、木里县、丽江市、宁蒗县、盐源县。

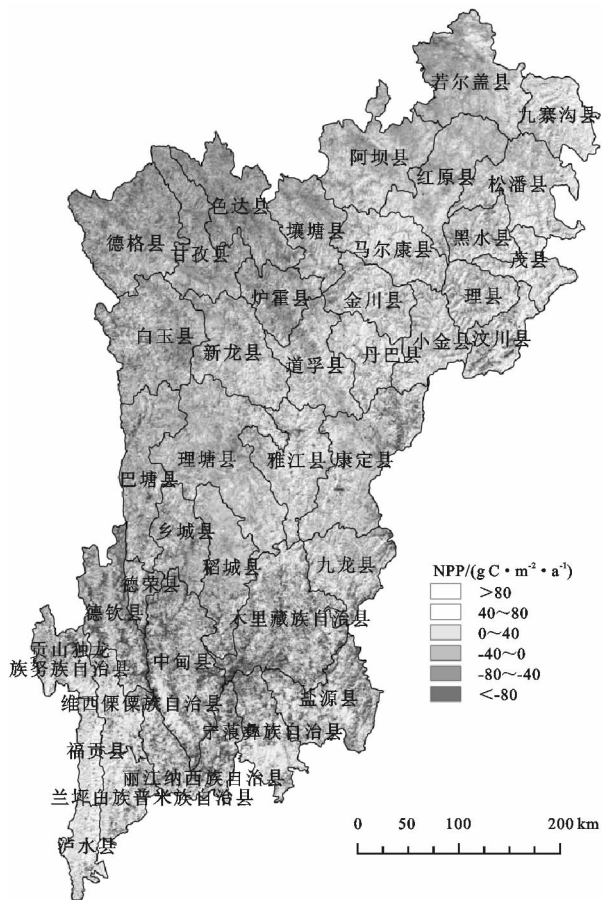


图 5 南方农牧交错带 2014 与 2005 年植被 NPP 差值

简单差值法虽然能够直接反映 10 年间南方农牧交错带内植被 NPP 的变化趋势, 由于计算所涉及的数据是研究时间段端点数据之间的差异, 因此得到的结果可能会受到极端天气影响^[10]。因此本文选用一元线性回归和简单差值法对南方农牧交错带内植被 NPP 的变化趋势进行分析。

3.3 南方农牧交错带不同生态系统类型植被 NPP 化趋势

南方农牧交错带生态系统分为森林生态系统、草原生态系统、灌丛生态系统、湿地生态系统、农田生态系统。其中森林生态系统主要分布在南部横断山脉和河谷谷底。草地生态系统主要分布在西部高原地区, 灌丛生态系统、农田生态系统等在区域内零星分布(图 6)。

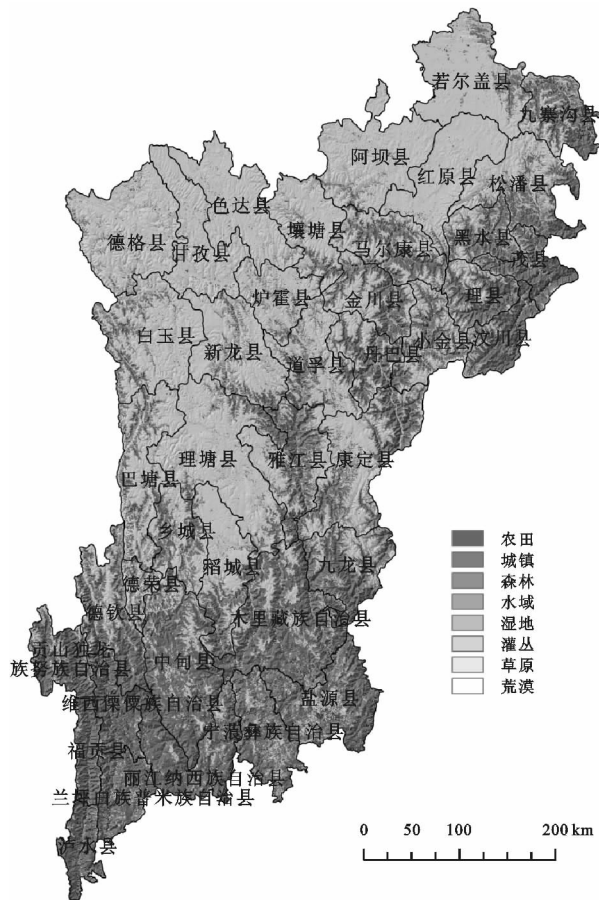


图 6 南方农牧交错带土地利用类型

南方农牧交错带不同生态系统类型 NPP 变化趋势和变化幅度差异明显(表 1)。森林生态系统年均植被 NPP 为 $558 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 2011 年森林生态系统植被 NPP 最高为 $608 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在 2012 年植被 NPP 最低为 $492 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。草地生态系统年均植被 NPP 为 $275 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 2006 年草地生态系统植被 NPP 最高, 为 $305 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 2012 年草地生态系统植被 NPP 最低为 $244 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。农田生态系统年均植被 NPP 为 $500 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 2006 年农田生态系统植被 NPP 最高为 $536 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在 2012 年植被 NPP 最低为 $459 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。灌丛生态系统年均植被 NPP 为 $359 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 2009 年灌丛生态系统植被 NPP 最高, 为 $395 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在 2012 年、2014 年灌丛生态系统植被 NPP 最低为 $325 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。湿地年均植被 NPP 为 $326 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其中 2006 年湿地生态系统植被 NPP 最高为 $357 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 在 2010 年湿地植被 NPP 最低为 $298 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。不同生态系统植被 NPP 均值表现为: 森林生态系统 > 农田生态系统 > 灌丛生态系统 > 湿地生态系统 > 草地生态系统。

从图 7 中可以看出, 南方农牧交错带内不同生态系统植被 NPP 变化相似, 呈波动减少变化。其中灌丛植被的 NPP 下降趋势最大, 平均变化幅度为 -3.34

$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。森林植被 NPP 下降趋势为 $-0.86 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,农田植被 NPP 下降趋势为 $-0.52 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,湿地植被 NPP 下降趋势为 $-0.32 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,草地植被 NPP 下降趋势最小,为 $-0.23 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。该地区不同植被类型 NPP 在 2009 年之后 NPP 波动变化幅度较大,可能与 2009—2012 年开始的川滇旱灾有关。

表 1 2005—2014 年南方农牧交错带
不同生态系统植被 NPP 特征

年份	$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$				
	农田	森林	草地	灌丛	湿地
2005	471	514	255	343	304
2006	536	607	305	394	357
2007	494	568	273	365	324
2008	504	557	262	356	323
2009	526	594	280	395	336
2010	460	504	274	338	298
2011	535	608	303	383	349
2012	459	492	244	325	307
2013	527	605	297	365	348
2014	485	535	259	325	310
平均	500	558	275	359	326

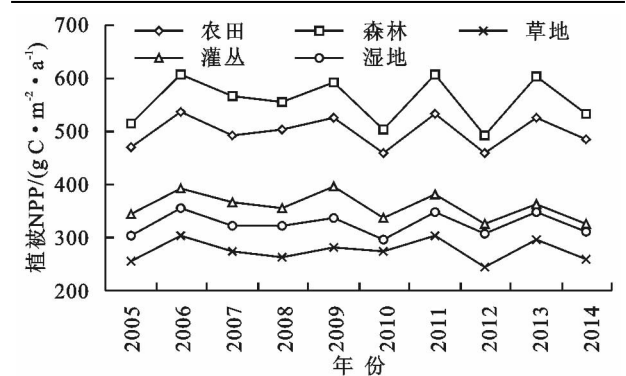


图 7 2004—2015 年南方农牧交错带内
不同生态系统植被 NPP 变化

4 结论

(1) 南方农牧交错带 NPP 总体上呈南部高北部低,东北部高,西部低的分布趋势。河谷地带分布较高。南部横断山脉是南方农牧交错带 NPP 最高的地区,植被 NPP 大于 $600 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。东北部有部分区域年均植被 NPP 也超过 $600 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。西北部高原地区年均植被 NPP 小于 $300 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,是该区域年均 NPP 最低的区域。而西北部是区域的高海拔分布区,东北部和南部是低海拔区域。

(2) 2005—2014 年,南方农牧交错带植被 NPP 年变化范围为 $344 \sim 426 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年平均植被 NPP 为 $470 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。南方农牧交错带年 NPP 在 $200 \sim 300 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 区间分布最多,占南方农牧交错带总面积的 26%。其次为 $300 \sim 400 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 占 23%。

(3) 2014 年与 2005 年相比 57.95% 的区域为增长,平均植被 NPP 增加了 $106 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。但是,2005—2014 年,南方农牧交错带 57% 的区域植被 NPP 趋势呈略微减少。在 10 年间,48% 的植被覆盖区域植被 NPP 减少了 $0 \sim 15\%$,为植被 NPP 变化分布最多的区间。34% 植被覆盖区域植被 NPP 增加了 $0 \sim 15\%$ 。

(4) 南方农牧交错带不同生态系统平均植被 NPP 差异明显,森林生态系统植被 NPP 最高,变化范围为 $492 \sim 608 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;其次是农田生态系统,变化范围为 $459 \sim 536 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;灌丛生态系统变化范围为 $325 \sim 395 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;湿地生态系统变化范围为 $298 \sim 357 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;草地生态系统植被 NPP 最低,变化范围为 $275 \sim 305 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

参考文献:

[1] 杨阳,宋乃平,刘秉儒,等. 农牧交错带土地利用格局演变研究进展[J]. 环境工程,2015,33(3):158-162.

[2] 吴贵蜀. 农牧交错带的研究现状及进展[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2003,26(1):108-110.

[3] 刘庆. 青藏高原东部(川西)生态脆弱带恢复与重建研究进展[J]. 资源科学,1999,21(5):81-84.

[4] 环境保护部,中国科学院. 全国生态功能区划[R]. 修编版. 北京:环境保护部,2015.

[5] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A M B, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): overview and key results[J]. Global Change Biology, 1999,5(S1):1-15.

[6] 王莺,夏文韬,梁天刚,等. 基于 MODIS 植被指数的甘南草地净初级生产力时空变化研究[J]. 草业学报,2010,19(1):201-210.

[7] 孙金伟,关德新,吴家兵,等. 陆地植被净初级生产力研究进展[J]. 世界林业研究,2012,25(1):1-6.

[8] 罗玲,王宗明,毛德华,等. 松嫩平原西部草地净初级生产力遥感估算与验证[J]. 中国草地学报,2011,33(6):21-29.

[9] 国志兴,王宗明,张柏,等. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析[J]. 资源科学,2008,30(8):1226-1235.

[10] 李登科,范建忠,王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志,2011,30(12):2776-2782.

[11] 刘春雨,董晓峰,刘英英,等. 甘肃省净初级生产力时空变化特征[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(1):163-170.

[12] 刘双,阮宏华. 基于地统计学的广东省和广西省森林生物量和 NPP 空间格局分析[J]. 生态学杂志,2013,32(9):2502-2509.

[13] 李传华,赵军. 2000—2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子[J]. 生态学杂志,2013,32(3):712-718.

[14] 陈卓奇,邵全琴,刘纪远,等. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(3):402-410.