

淮河流域地上生物量时空特征分析

姚筠^{1,2} 张方敏³ 侯灿^{1,2} 翁升恒³ 吴文玉^{1,2}

(1安徽省气象科学研究所, 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031; 2寿县国家气候观象台, 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 寿县 232200; 3南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 淮河流域是独具特色的东亚季风区典型区, 也是我国最具代表性的农田生态区域。地上生物量能够表征农田可利用资源的现状与承载力, 研究该区域生物量的估算及其变化特征, 可以为农田生态系统碳循环研究提供基础数据。本研究以东亚季风区淮河流域为研究区域, 基于BEPS模型和GLOBMAP LAI产品, 估算得到近38年淮河流域农田地上生物量(AGB), 并分析其时空分布特征。主要结果表明: 淮河流域多年平均AGB在年内日尺度变化呈现“单峰型”变化规律, 峰值为217 d(8月5日(平年)/8月4日(闰年)); 淮河流域年均AGB年际变化呈现波动上升的趋势, 从1981年的836.8 g·m⁻²逐渐上升到2018年的983.3 g·m⁻²; 淮河流域年均AGB年代空间分布自1980年代到2010年代这4个年代间呈现出明显的增加趋势, AGB区域上大体分布为南高北低, 淮河流域的西部地区AGB也较高。近38年间淮河流域逐年AGB_{max}也呈现波动上升的趋势, 从1981年的2111 g·m⁻²逐渐上升到2018年的2610 g·m⁻²。该研究结果可为今后分析较大尺度上生物量的时空变异特征提供案例参考, 同时也可作为农田生态系统的深入研究及长期监测提供数据累积。

关键词: 淮河流域, 地上生物量, BEPS, NPP

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.022

Spatial and Temporal Characteristics of Aboveground Biomass in Huaihe River Basin

Yao Yun^{1,2}, Zhang Fangmin³, Hou Can^{1,2}, Weng Shengheng³, Wu Wenyu^{1,2}

(1 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031 2 Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Ecological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200 3 School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Huaihe River Basin is a typical area in East Asian monsoon region with unique characteristics, and is also the most representative farmland ecological region in China. The aboveground biomass (AGB) can not only represent the current situation and carrying capacity of farmland resources, but also provide basic data for the study on carbon cycle in farmland ecosystem. Based on BEPS model and GLOBMAP LAI products, the AGB in the Huaihe River Basin in recent 38 years was estimated, and its spatial and temporal distribution characteristics were analyzed. The results show that: 38 years mean daily AGB in Huaihe River basin varied with single peak curves, and the peak occurred at 217 d (5 August (common year)/4 August (leap year)). The annual average AGB rises in volatility, from 836.8 g·m⁻² in 1981 to 983.3 g·m⁻² in 2018. The spatial distribution of annual average AGB increase obviously from 1980s to 2010s. AGB was high in the South and low in the north, and also high in the western part of the Huaihe River basin. The annual average AGB_{max} rises in volatility, from 2111 g·m⁻² in 1981 to 2610 g·m⁻² in 2018. The study can provide reference for the analysis of spatial and temporal variation of biomass on a large scale in the future, and also provide data for in-depth study and long-term monitoring of farmland ecosystem.

Keywords: Huaihe River Basin, aboveground biomass (AGB), BEPS, NPP

0 引言

生物量是指某一时刻单位面积内所有植被的总干重, 是表征植被群体长势的重要参数之一。地上生物

量(aboveground biomass, AGB)不仅仅是生态系统第一性生产力的组成部分, 也是评价生态系统的生态脆弱性的重要指标^[1]。关于生物量的研究与应用最早是在林学的相关研究中提出^[2-6]。其后在草地和农田领域, 众多学者也开展了关于地上生物量的大量研究^[7-11]。农田的地上生物量与长势和单产密切相关, 主要受到环境气候、地形、生物多样性和管理利用方式等因素的影响。环境与气候的因素包括光照、水分和土壤温

收稿日期: 2020年8月11日; 修回日期: 2020年9月16日
第一作者: 姚筠(1983—), Email: yaoyun358@126.com
通信作者: 吴文玉(1978—), Email: ahwuwy@126.com
资助信息: 安徽省气象局研究型业务科技攻关项目(YJG202001)

度。地形主要包括海拔、地势、斜面等要素，海拔坡度包括光照射、湿度及温度等环境因素。通过海拔高度的变化，气候因子对地上生物量的影响进一步加强^[12]。

淮河流域是我国农业生产经营活动的典型区域之一，代表了东亚季风区的主要气候条件和生态环境状况。同时由于淮河流域地处我国南北气候过渡带，天气复杂多变，加上地形的共同作用，使得该区域地上生物量变化可能较之其他区域更为复杂。而目前流域尺度地上生物量的时空动态变化研究尚不多见。因此建立该区域AGB的估算方法及分析气候变化背景下该区域AGB的变化特征对了解该区域碳源汇情况，以及评估区域碳源汇潜力具有重要意义。

本研究以淮河流域（图1）为对象，基于气象数据、遥感反演数据和BEPS模型，估算得到淮河流域长序列AGB数据，并在此基础上分析淮河流域地上生物量时空变化特征，以期为农田生态系统的深入研究及长期监测提供数据累积，为农业资源的科学管理和合理利用提供信息支撑。

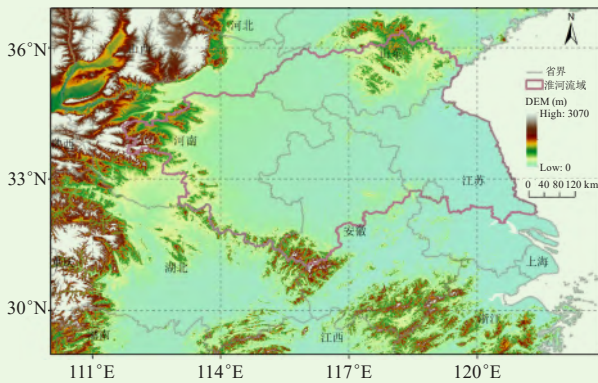


图1 研究区淮河流域图

Fig. 1 The map of Huaihe River Basin

1 资料与方法

1.1 资料

本文数据来源于中国气象局国家气候中心提供的1981—2018年淮河流域内河南、安徽、江苏、山东四省共145站逐日气象资料，包括降雨量、最高温度、最低温度、相对湿度、日照时数等。所有的数据进行插补订正，然后采用Kriging方法插值到0.01°格点数据。叶面积指数（LAI）资料来源于0.08°的1981—2018年的由中国科学院地理所刘荣高团队制作的GLOBMAP LAI V3的产品^[13]，该产品融合AVHRR LAI（1981—1999年）和MODIS LAI（2000—2018年）。

1.2 AGB 估算方法

农田地上生物量主要有3种获取方法：直接收获

法、产量模拟法和遥感模型法^[14-15]。直接收获法是在植被生长发育最旺盛的时候，通过试验的方式去获取某一样地上的所有生物量并进行称重。这种方法估算精度高并且操作简单，但是需要花费大量的时间和精力才能够采集足够的样本数据，而利用有限的样本数据估算大区域范围的生物量也存在较大误差，并且该方法还破坏样地的植被覆盖情况。因此，这种方法一般用于估算小区域范围的地上生物量。产量模拟模型法，此种方法考虑了植被的生态环境特征和生理特征，一般将土壤、植被种类、气候和技术等条件因素用于模型中。该方法需要研究区大量详细具体资料，由于搜集足够的数据存在难度，因此这种模型很难在大范围区域进行估算。遥感模型法主要是基于遥感数据，利用遥感变量和同一时期的地面采样数据建立数据集、构建生物量遥感模型，目前运用遥感手段进行综合建模应用最为广泛。本研究综合利用气象数据和遥感反演数据结合BEPS模型进行AGB的估算。

1.2.1 估算净第一生产力（NPP）

BEPS模型是在FOREST-BGC模型的基础上不断改进、发展得到的，用于估算陆地生态系统的碳水循环^[15-16]。经过多次改进，已被许多学者用到中国区、亚洲东部等区域生产力和蒸散空间分布格局的模拟中。该模型是基于过程的生物地球化学模型，涉及到生化、生理和物理等机理方法，综合运用了生态学、生物物理学、植物生理学、气候学和水文学的方法来模拟植物的光合、呼吸、碳的分配、水分平衡和能量平衡等关系^[17-18]。模型最主要的特点是引入两叶模型将冠层叶片分为阳叶和阴叶，通过进行气孔导度的积分对叶片尺度的瞬时光化学模型进行时空尺度转换，模拟计算逐日值累计。NPP的计算分为3个部分：

1) 总初级生产力（GPP）的计算

$$A = \min(W_c, W_j) - R_d$$

$$W_c = V_m \times \frac{C_i - \Gamma}{C_i + K}$$

$$W_j = J \times \frac{C_i - \Gamma}{4.5C_i + 10.5K}$$

$$R_d = 0.015V_m$$

式中： A 为叶片的光合作用速率（ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ）； W_c 和 W_j 分别为受Rubisco活性限制和光限制的光合作用速率； R_d 为白天叶子的暗呼吸； V_m 为最大羧化作用速率； C_i 是叶肉细胞 CO_2 浓度（ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ）； Γ 是无暗呼吸时的 CO_2 补偿点（ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ）； K 为酶促反应速度常数（ $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ）； J 是电子传递速度。

$$\begin{aligned} A_{\text{canopy}} &= A_{\text{sun}} LAI_{\text{sun}} + A_{\text{shade}} LAI_{\text{shade}} \\ LAI_{\text{sun}} &= 2 \cos(1 - \exp(-0.5\Omega LAI / \cos \theta)) \\ LAI_{\text{shade}} &= LAI - LAI_{\text{sun}} \\ GPP &= A_{\text{canopy}} \times \text{daylength} \times C_{GPP} \end{aligned} \quad (2)$$

式中： A_{canopy} 、 A_{sun} 、 A_{shade} 分别为整个冠层、阳叶和阴叶的日光合速率； LAI_{sun} 和 LAI_{shade} 分别为阳叶和阴叶的叶面积指数； θ 为太阳高度角； Ω 为叶子聚集度系数； daylength 为日长； C_{GPP} 为转换比例。

2) 呼吸作用的计算

植物的呼吸作用可以分为自养呼吸和异养呼吸，其中，植物的自养呼吸 (R_a) 主要包括生长呼吸 (R_g) 和维持呼吸 (R_m) 两部分：

$$\begin{aligned} R_a &= R_g + R_m \\ R_g &= 0.25GPP \\ R_m &= \sum_{i=1}^4 M_i R_{m,i} Q_{10}^{(T-T_b/10)} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中， i 代表植物的不同器官(叶、茎、粗根和细根)； M_i 为第*i*个器官的生物量； $R_{m,i}$ 为第*i*个器官在温度 T_b ($^{\circ}\text{C}$)时的呼吸速率($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)； T 为气温($^{\circ}\text{C}$)； Q_{10} 为呼吸对温度变化的响应系数。

3) NPP的计算

植物每天的NPP即为植物每天的净碳吸收量，计算为GPP与呼吸作用消耗之差，即：

$$NPP = GPP - R_g - R_m \quad (4)$$

1.2.2 估算地上生物量 (AGB)

AGB就是生育期内从第一天到第*n*的干物质的累积量，即

$$AGB = \sum_{i=1}^n NPP_i \quad (5)$$

式(5)中， NPP 为第一净生产力，也表示为有机物质干重， n 为生育期的第*n*天。

2 结果与分析

2.1 淮河流域年均AGB时空变化

2.1.1 淮河流域日均 AGB 的年变化

如图2所示，淮河流域多年平均AGB在年内日尺度变化呈现“单峰型”变化规律，存在两个快速上升期。在年初和年末，AGB都处在较低水平，仅有 $400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，到了73 d(3月14日(平年)/3月13日(闰年))左右，AGB上升速度明显变快，至129 d(5月9日(平年)/5月8日(闰年))左右上升速度放缓，到170 d(6月19日(平年)/6月18日(闰年))进入第二段快速上升期，并在217 d(8月5日(平年)/8月4日(闰年))达到一年中的最大值，为 $2531 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，而后迅速下降。

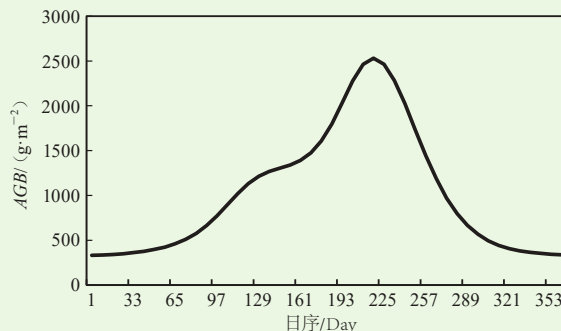


图2 淮河流域年均AGB年变化
Fig. 2 Annual variation of 38 years mean daily AGB in Huaihe River Basin

2.1.2 淮河流域年均 AGB 年际变化

将淮河流域AGB逐年进行平均而得到图3。1981—2018年这38年间淮河流域AGB呈现波动上升的趋势，从1981年的 $836.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 逐渐上升到2018年的 $983.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。多年平均AGB为 $884.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最大值出现在2015年，为 $1083.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最小值出现在1996年，为 $741.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。构建所得年份与AGB的线性方程为 $y=6.333x+760.53$ ($R^2=0.581$)，表明，所研究年份内AGB有明显的上升趋势。

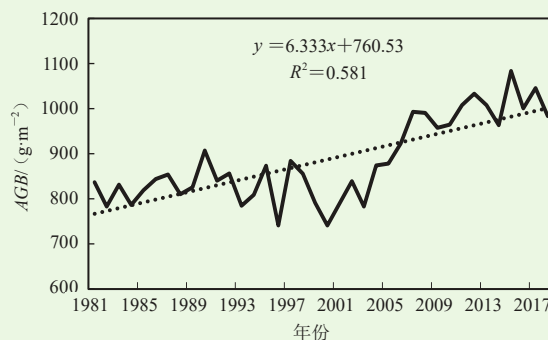


图3 淮河流域平均AGB年际变化(1981—2018年)
Fig. 3 Interannual variation of annual average AGB in Huaihe River Basin from 1981 to 2018

2.1.3 淮河流域不同年代的年均 AGB 空间分布

由图4可知，淮河流域AGB自1980年代到2010年代这4个年代间呈现出明显的增加趋势，AGB区域上大体分布为南高北低，淮河流域的西部地区AGB也较高。西部和南部地区(主要为山区)自1980年代以来就大于 $700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，甚至大于 $1400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (图中未能显示)。在1980与1990年代，淮河流域中部的AGB大多在 $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下；而2000年代时AGB小于 $400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的区域大幅度减少， $500\sim 700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的区域大幅增加，南部和西部地区继续保持高AGB，但区域较前两个年代有略微扩大；到了2010年代，淮河流域大范围内AGB $> 600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，仅北部和部分东部沿海地区AGB $< 400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

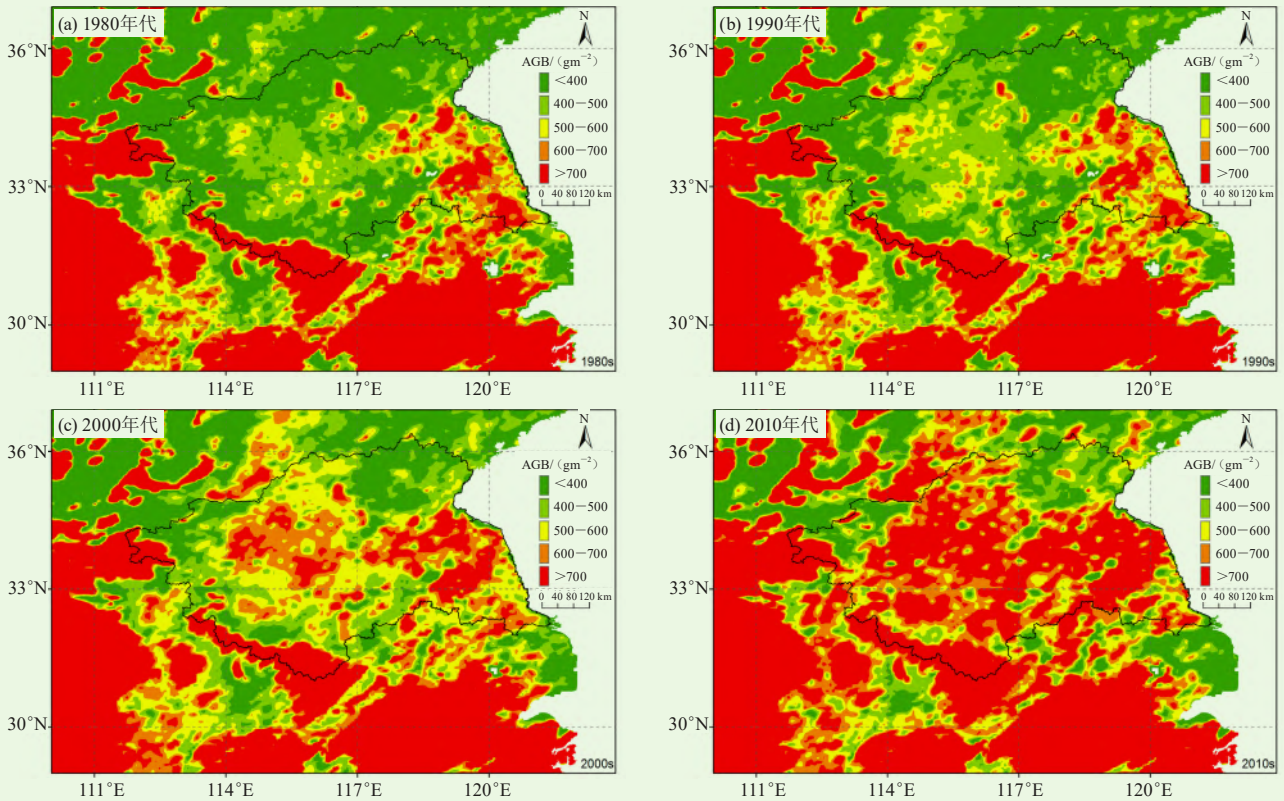


图4 淮河流域不同年代的年均AGB空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average AGB in Huaihe River Basin from 1980s to 2010s

2.1.4 淮河流域年均AGB变化趋势的空间分布

如图5所示，除东部沿海等小范围区域以外，1981—2018年间淮河流域AGB变化趋势均大于0，即淮河流域大范围的AGB表现为上升趋势，但上升的速率有所不同。在淮河流域的中部、中部偏北和中部偏西区域大范围AGB变化趋势最大，上升最明显，几乎都在0.50以上，甚至出现大面积大于0.75的情况；然而在淮河流域的南部和东部沿海地区，AGB变化趋势大多小于0.50，甚至有大面积小于0的情况，即AGB在

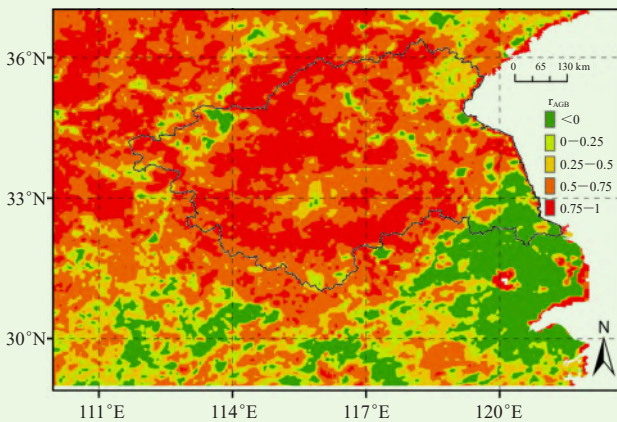


图5 1981—2018年淮河流域年均AGB变化趋势的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of AGB variation trend in Huaihe River Basin from 1981 to 2018

淮河流域这些范围内增长不快甚至有减小。

2.2 淮河流域最大AGB (AGB_{max}) 时空变化

2.2.1 淮河流域 AGB_{max} 年变化

将淮河流域各格点AGB求逐年内最大值，再求平均得到淮河流域 AGB_{max} 变化图(图6)。38年间淮河流域 AGB_{max} 呈现波动上升的趋势，从1981年的 $2111 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 逐渐上升到2018年的 $2610 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。多年平均 AGB_{max} 为 $2221 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最大值出现在2015年，为 $3025 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，最小值出现在1982年，为 $1699 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。构建所得年份与AGB的线性方程为 $y=28.639x+1662.9$ ($R^2=0.661$)。与AGB相同(图3)，淮河流域 AGB_{max}

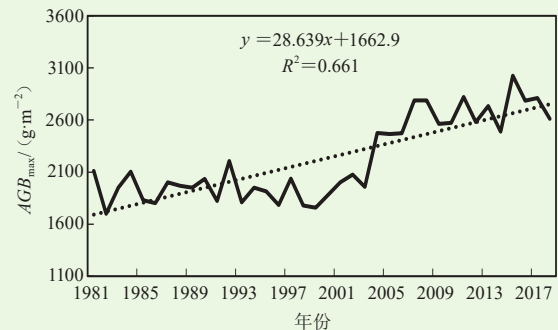


图6 1981—2018年淮河流域 AGB_{max} 逐年变化
Fig. 6 Annual average AGB_{max} in Huaihe River Basin from 1981 to 2018

有明显的上升趋势。

2.2.2 淮河流域不同年代 AGB_{max} 空间分布

由图7可知，淮河流域 AGB_{max} 自1980年代到2010年代这4个年代间呈现出明显的增加趋势， AGB_{max} 区域大体分布为南高北低，淮河流域的西部地区 AGB_{max} 也较高。西部和南部地区（主要是山区）自1980年

代以来就大于 $2500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，在1980与1990年代，淮河流域中部的 AGB_{max} 大多在 $700\sim 1500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ；而2000与2010年代时 AGB_{max} 小于 $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的区域大幅度减少， $1500\sim 2500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的区域大幅增加，甚至淮河流域大范围内 AGB_{max} 大于 $2500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，仅西北部和部分东部沿海地区 AGB_{max} 还小于 $700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

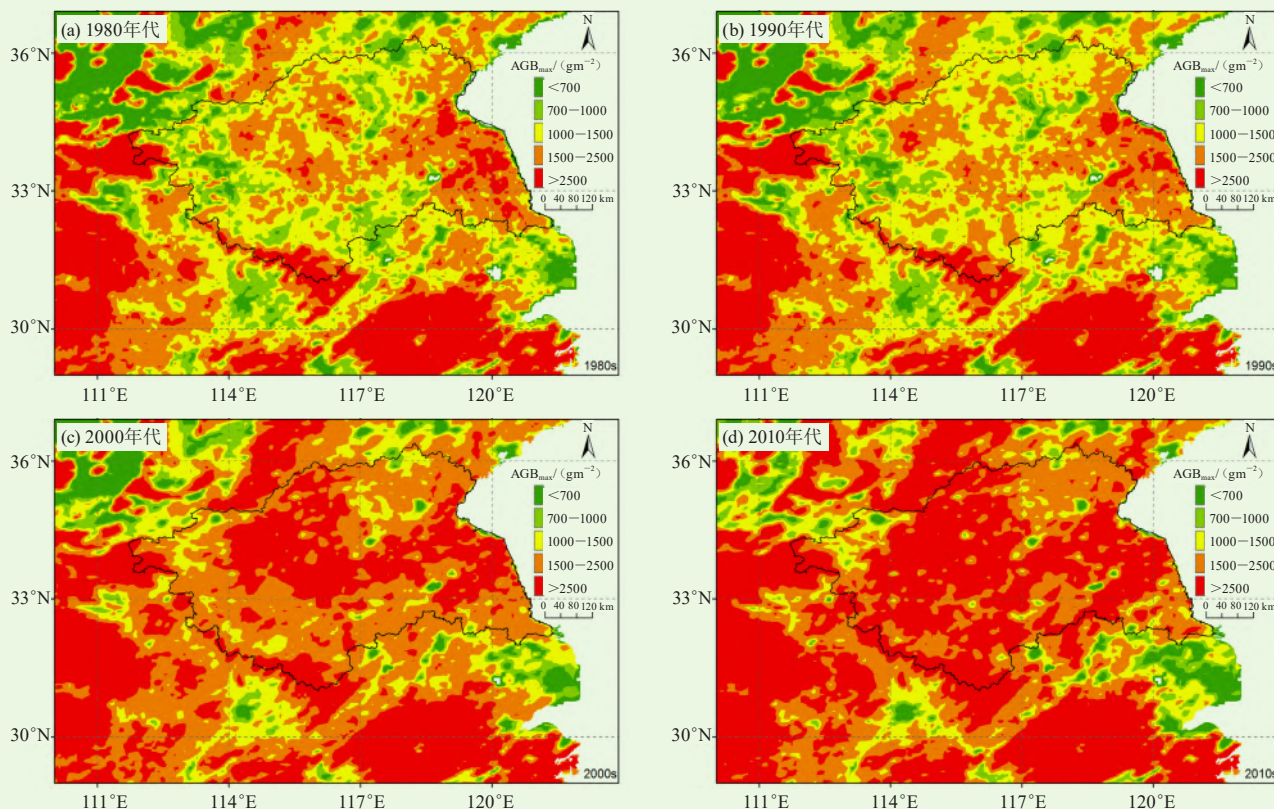


图7 淮河流域不同年代 AGB_{max} 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of AGB_{max} in Huaihe River Basin from 1980s to 2010s

2.2.3 淮河流域 AGB_{max} 变化趋势的空间分布

如图8所示，同 AGB 变化趋势类似（图5），除东部沿海等小范围区域以外，1981—2018年间淮河流域 AGB_{max} 变化趋势均大于0，即淮河流域大范围的 AGB_{max} 表现为上升趋势，但上升的速率有所不同。在淮河流域的中部、中部偏北和中部偏西区域 AGB_{max} 变化趋势最大，上升最明显，几乎都在0.50以上，甚至出现大于0.75的情况；然而，在淮河流域的南部和东部沿海地区地区， AGB_{max} 变化趋势多在0.50以下，甚至在东部沿海地区出现大面积小于0的情况，即 AGB_{max} 在淮河流域这些范围内为减小趋势。

3 结论与讨论

1) 本文分析了淮河流域年均 AGB 时空变化。结果表明：淮河流域多年均 AGB 在年内日尺度变化呈现“单峰型”变化，存在两个快速上升期，峰值出现在

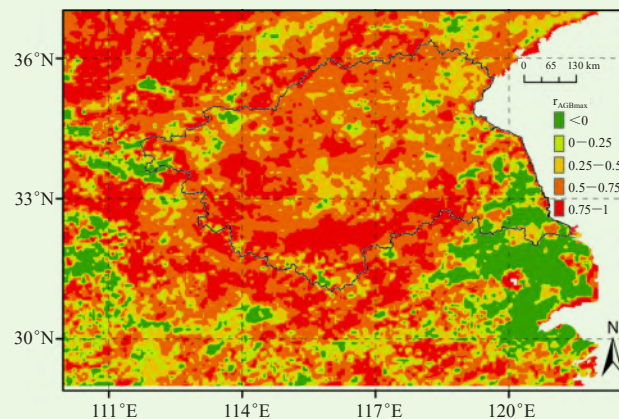


图8 1981—2018年淮河流域 AGB_{max} 变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of AGB_{max} variation trend in Huaihe River Basin from 1981 to 2018

217 d（8月5日（平年）/8月4日（闰年））；淮河流

（下转162页）