

# 基于 GWR 模型的中国 NDVI 与气候因子的相关分析

韩雅<sup>1,2</sup> 朱文博<sup>2</sup> 李双成<sup>2,†</sup>

1. 城市人居环境科学与技术重点实验室, 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; †通信作者, E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

**摘要** 在 ArcGIS 支撑下, 基于 1982—2010 年 8 km 分辨率的 AVHRR NDVI 及气温和降水数据, 应用最小二乘法和地理加权回归方法, 构建中国 NDVI 与气候因子的地理加权回归模型, 定量分析中国 NDVI 与气温和降水的相互关系, 获取各个回归参数的空间格局, 并将模拟结果与全局性回归结果进行对比。结果表明, 与线性回归模型相比, 地理加权回归模型的拟合效果显著提高, 拟合优度从 0.3 提高到 0.6。气候因子对 NDVI 的影响具有空间异质性: 从北到南, 气候因子对 NDVI 的影响逐渐减小; 西北内陆等干旱荒漠地带, 气候因子对 NDVI 的影响较大。对中国大部分地区而言, 气温对 NDVI 的影响超过降水。各区 NDVI 与主导气候因子发生作用的特征尺度不同。

**关键词** NDVI; 气候因子; GWR 模型; 中国  
**中图分类号** K903

## Modelling Relationship between NDVI and Climatic Factors in China Using Geographically Weighted Regression

HAN Ya<sup>1,2</sup>, ZHU Wenbo<sup>2</sup>, LI Shuangcheng<sup>2,†</sup>

1. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055;  
2. Key Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

**Abstract** Based on the GWR (geographically weighted regression) model supported by ArcGIS, the research explores the multi-scale relationship between vegetation change, climatic factors, and the sensitivity of vegetation to climate factors using AVHRR vegetation cover data combined with temperature and precipitation data in China from 1982–2010. Compared with the general linear regression (Ordinary Least Square, OLS) model, GWR gives a much better fitting result, with the goodness of fit increased from 0.3 to 0.6. The relationship between NDVI, annual rainfall, and average annual temperature has a significant spatial heterogeneity. Regression coefficients of climatic factors decrease from north to south and are higher in the northwest dry region of China. Temperature is more influential than rainfall on NDVI in most areas of China. Each ecological zone has different spatial scales when NDVI and the climatic factors maintain a stable relationship.

**Key words** NDVI; climatic factors; geographically weighted regression (GWR); China

由卫星 NOAA AVHRR 数据得到的 NDVI (normal difference vegetation index) 时间序列数据可用于长时间的土地覆被研究和多尺度的陆地生态系统

模拟。NDVI 与植被覆盖度、叶面积指数、生物量和生产力等性状关系密切<sup>[1-2]</sup>, 同时由于 AVHRR 数据的时间分辨率较高, AVHRR NDVI 数据广泛应

用于农作物种植面积估算、产量估算、作物长势监测以及森林草地等自然植被监测等大范围植被活动的研究<sup>[3-4]</sup>。另外,植被的生长过程与气温和降水等气候条件也有密切关系<sup>[1,5]</sup>。

20 世纪 90 年代以来,全球环境以前所未有的速度发生变化,一系列全球性重大环境问题对人类的生存和发展构成严重威胁,NDVI 动态变化及与气候因子的相互关系成为地理学和生态学的研究热点。相关学者进行了不同尺度和视角的研究<sup>[4-6]</sup>,文献[7-10]探讨不同时间序列全国及局部生态敏感区(如黄河三角洲、京津冀风沙源区、青藏高原和黄土高原等地区)NDVI 与气候因子的关系,文献[11-13]分析了不同植被类型的 NDVI 对气候因子的响应机制。结果表明,植被 NDVI 的变化特征及与气候因子的关系随着气候区、植被类型和研究时期的不同而有所差异<sup>[4,6,14]</sup>。

以上研究主要基于统计回归和相关性分析说明 NDVI 与气候因子时间序列的相关关系,并讨论不同区域、不同植被类型中相关性的差异,即使在相似的覆被条件或植被类型中,这种相关性仍具有空间非平稳性<sup>[15-16]</sup>、非线性和时空异质依赖性。NDVI 在中国的变化也有很强的空间异质性<sup>[17]</sup>。例如,在东部沿海地区 NDVI 有下降趋势,在西部地区和一些农业区有上升趋势<sup>[3]</sup>。传统的基于线性假设的研究方法与 NDVI 特性冲突,难以发掘其动态变化与气候因子间的因果关系。近年来,作为传统回归技术的延伸,地理加权回归越来越多地应用于探索空间变化关系<sup>[18]</sup>。

地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)方法通过计算回归模型的局部参数,可以很好地表明 NDVI 与气候因子关系的空间非平稳性和区域特性,从而大幅度提高模型的拟合优度,取得更好的拟合效果<sup>[16,19]</sup>。但是,目前此方法多应用在局地区域研究<sup>[20-23]</sup>。鉴于此,本文以 AVHRR NDVI 和全国 756 个气象台站 29 年时间跨度的长序列数据源为基础,分别运用 GWR 模型和 OLS 模型,在国家尺度上拟合 NDVI 与气温和降水的关系,并对结果进行对比,旨在探索 NDVI 对气候因子的时空响应机制,揭示其关系的空间非平稳性和尺度依存性。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 气象数据

本研究使用的气象数据是从国家气象数据共享网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)获得的中国地面气候资料日值数据集,选取中国 756 个气象台站的日均温和日降水量,时间跨度为 29 年(1982 年 1 月—2010 年 12 月)。剔除部分长时间缺测站点后,对各年的日均温求算术平均,对日降水量求和,得到 604 个站点(图 1) 29 年的年均气温和年降水量。

### 1.2 AVHRR NDVI 数据

本研究使用的遥感数据为 AVHRR NDVI 月值图,来自 NASA 戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center)全球库存建模和映射研究组(Global Inventory Monitoring and Modelling Studies Groups)的 NDVI3g 数据集。图像空间分辨率为  $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ ,时间分辨率为月,时间跨度为 1982 年 1 月—2010 年 12 月。为了减小误差,以台站周围 15 km 内的 NDVI 均值作为台站的 NDVI 值。

### 1.3 研究方法

对于空间现象而言,传统的统计分析方法大多忽视空间数据之间的相互依赖性,因而其结果说服力不够<sup>[24]</sup>。某些情况下,空间上的依赖性比时间上的更复杂,因此在传统统计方法基础上引入空间因素成为地理学研究方法的热点。GWR 模型考虑了距离因素影响,是研究地理空间异质性现象的回归模型。其特定位置的回归系数不是利用全局信息获得,而是在考虑了临近空间要素影响的情况下,利用临近观测值的子样本信息进行局部回归得到<sup>[6]</sup>。GWR 模型在普通线性回归模型的基础上,将空间因素作为回归参数。因此, GWR 模型可以视为普通线性回归模型的改进。

本研究将 NDVI 与气温和降水的关系分别用全局性的普通最小二乘法(ordinary least square, OLS)和地理加权回归(GWR)方法拟合,并对结果进行对比分析。

#### 1.3.1 经典的线性回归模型

经典的线性回归模型如下:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i,$$

式中,  $y$  为因变量,是自变量  $x_k (k=1, \dots, p)$  的一个线性组合;  $\varepsilon_i$  为符合正态分布的随机误差项,  $i=1, \dots, n$

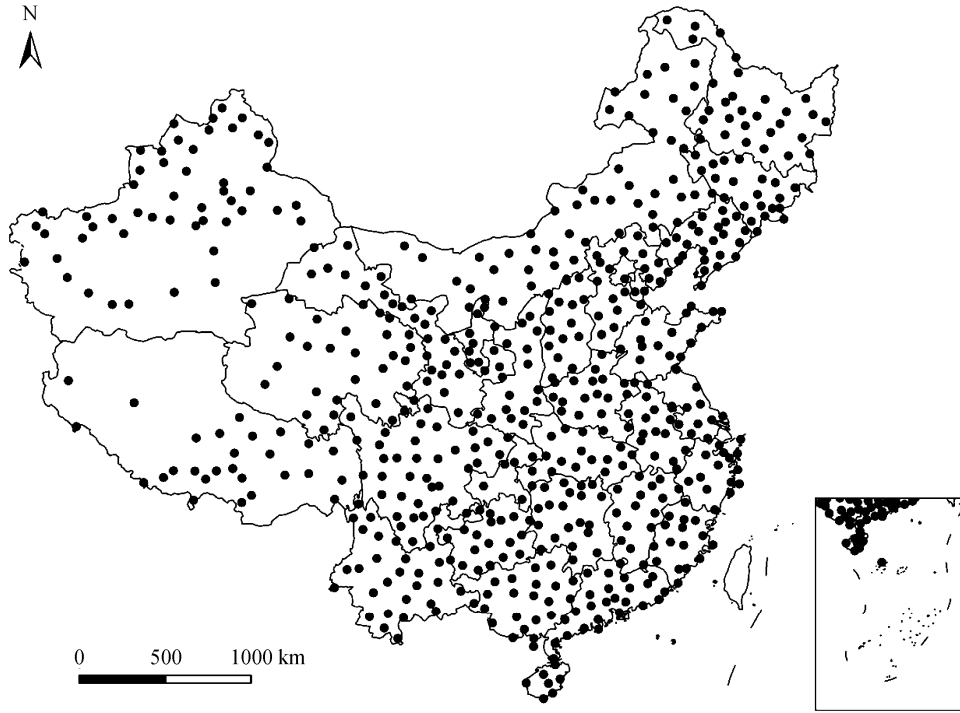


图 1 用于研究的中国 604 个气象台站分布  
Fig. 1 Locations of 604 meteorological stations in China

是观测值的个数。回归系数  $\beta_k (k=1, \dots, p)$  假定为常数, 一般采用 OLS 法估计。

### 1.3.2 地理加权回归模型

GWR 模型对一般的线性模型进行拓展, 模型参数是位置  $i$  的函数<sup>[5]</sup>。GWR 模型表示如下:

$$y_i = \beta_{i0}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_{ik}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i,$$

式中,  $(u_i, v_i)$  为第  $i$  个样本点的空间位置,  $\beta_{i0}(u_i, v_i)$  和  $\beta_{ik}(u_i, v_i)x_{ik}$  分别是第  $i$  个样本点的常数估计值和参数估计值,  $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  是第  $i$  个样本点的随机误差项。若  $\beta_{1k} = \beta_{2k} = \dots = \beta_{nk}$ , 则地理加权回归模型就蜕变为普通线性回归模型。

由于位置  $i$  周围的观测值对  $i$  点的参数估计的影响随着距离的增加逐渐减小, 具有距离衰减效应, 因此利用距离加权 OLS 法估计参数<sup>[25]</sup>:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y,$$

式中,  $\hat{\beta}$  为参数  $\beta$  的估计值, 是自变量观测值构成的矩阵, 其第一列元素为 1;  $Y$  为由自变量观测值构成的变量;  $W$  为空间权值矩阵, 保证距离每一个样本点更近的观测值具有更大的权重。实证分析中经常用到的空间权值矩阵计算方法有 Gauss 距离权值 (Gaussian distance)、指数距离权值 (exponential

distance) 和三次方距离权值 (tricube distance) 等, 本研究采用 Gauss 距离权值方法确定  $W$ :

$$W(u_i, v_i) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{d_{ij}}{b} \right)^2},$$

式中,  $W(u_i, v_i)$  为观测点  $j$  对第  $i$  个样本点的空间权重,  $b$  为核函数的基带宽度,  $d_{ij}$  为回归点  $i$  到观测点  $j$  的欧氏距离。

当因变量  $y$  和自变量  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  没有空间差异时, 则称数据具有空间平稳性, 即参数  $\beta_k(u_i, v_i)$  不会随着空间位置的变化而变化。

Brunsdon 等<sup>[5]</sup>引入平稳性指数来评估地理加权回归模型中的数据平稳性, 计算公式如下:

$$SI = \frac{\beta_{GWR\_iqr}}{2 \times GLM\_se},$$

式中,  $SI$  是平稳性指数,  $\beta_{GWR\_iqr}$  是  $x_n$  系数的标准误的四分位距,  $GLM\_se$  是基于全局性的普通最小二乘法回归的标准误。如果  $SI \leq 1$ , 则因变量  $y$  和自变量  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的关系具有平稳性。

对地理加权回归模型进行模型显著性检验和模型误差项空间自相关的显著性检验, 常用的检验方法包括蒙特卡罗检验<sup>[5]</sup>、AIC 信息准则检验<sup>[26]</sup>和

Leung 等<sup>[14]</sup>的检验方法。AIC 检验用于对比不同模型的显著性, 较低的 AIC 值表明模型的模拟效果更好。表达式如下:

$$AIC = 2n \ln(\hat{\sigma}) + n \ln(2\pi) + n \left[ \frac{n + \text{tr}(S)}{n - 2 - \text{tr}(S)} \right],$$

其中,  $n$  是样本的大小,  $\hat{\sigma}$  是误差项估计的标准偏差,  $\text{tr}(S)$  是地理加权回归模型的投影矩阵  $S$  的迹, 是带宽的函数。当两个模型对的 AIC 值之差大于 3, 则具有较小 AIC 值的模型对数据的模拟效果更好。

## 2 研究结果

### 2.1 NDVI 与气候因子关系的带宽选择

尽管 GWR 模型可以研究因变量与自变量之间关系的空间分布, 然而核函数的带宽选择会对回归结果的空间表现有重要影响。带宽过小, 估计值接近真实值, 偏差大; 带宽过大, 估计值接近普通最小二乘回归的结果, 偏差大。本文采用高斯距离权重法确定权重矩阵, 结合自变量的平稳性 SI 指数和模型的 AIC 值确定最优带宽, 并用局部加权最小二乘法估计参数。

从图 2 可以看出, NDVI 与气温的平稳性指数 SI 在空间范围 350 km 时下降到 1.03, 说明 NDVI 与气温的关系在带宽 350 km 以上具有平稳性。NDVI 与降水的平稳性指数 SI 在空间范围 450 km 时下降到 1.09, 说明 NDVI 与降水的关系在带宽 450 km 以上时具有平稳性。如果在全国范围对 NDVI 与气温和降水建立空间平稳性的回归关系, 带宽应该在 350~450 km 之间。根据 AIC 法则, 本文选取 350 km 为最优带宽。

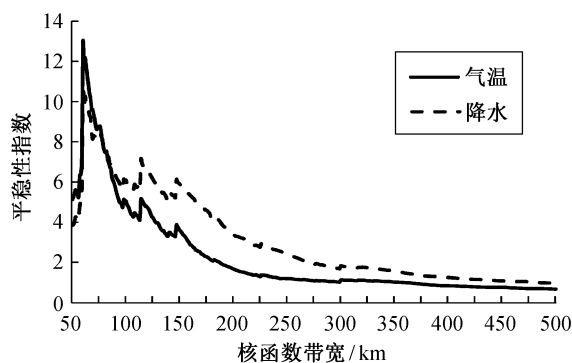


图 2 气温和降水在不同尺度的平稳性指数

Fig. 2 Stationarity index of precipitation and temperature at different scales

### 2.2 NDVI 与气温和降水关系的空间异质性

整体来看, 基于 GWR 模型的 NDVI 与气温的回归系数(图 3)比 NDVI 与降水的回归系数(图 4)大, 表明气温对 NDVI 的影响大于降水。这一结果与已有的研究结果基本上一致, 如李本纲等<sup>[27]</sup>认为, 对中国大部分地区而言, 气温对植被的影响超过降水。NDVI 与气温和降水的回归系数及相关系数空间格局分析表明, 存在着从北到南和从东到西的空间变化。整体上表现为西北部高、东南部低。这与前人的研究结论类似。如李晓兵等<sup>[28]</sup>对 1983—1992 年中国主要植被类型 NDVI 变化与气温和降水的关系的分析显示。从北到南, NDVI 与气候因子的相关性逐渐降低; 从东南到西北, NDVI 与气候因子的相关性逐渐增加。

中国地域广阔, 自然环境条件具有显著的空间差异, 因而 NDVI 与气温和降水的关系也呈现显著的空间异质性(图 3 和 4)。NDVI 与气温的回归关系在全国大部分地区均为正值, 表明气温对于 NDVI 有正向影响, 即温度越高, NDVI 值越大。在华中、华北、西南、西北和青藏高原地区, 这种正向的关系表现得尤为显著。然而, 在东北和华北地区, NDVI 与气温的回归系数出现负值, 表明气温在这些地区对 NDVI 产生负向控制作用。

NDVI 与降水的回归系数呈现更加复杂的空间格局, 在全国大部分地区均为正值, 但数值较小, 表明降水对 NDVI 具有弱的正向影响。在东北西部、西北和东南沿海地区有较弱的正向关系, 而在华北、华中、华南和西南地区, 两者的正向关系更弱甚至转变负向关系, 这与其他研究成果基本上一致<sup>[24,29]</sup>。

GWR 模型的局部拟合优度(调整的  $R^2$ )的空间分布如图 5 所示。可以看出受人类活动干扰较小的中西部和东北部等以森林、草原和荒漠为主要覆被类型的地区, NDVI 主要受气温和降水等气候因素的控制, 模型的拟合优度较高。东南地区的植被除受气候等自然因素作用外, 人类活动的扰动更强, NDVI 受到更多复杂因素的影响, 因此模型的拟合优度较小。

### 2.3 OLS 与 GWR 模型拟合效果对比

本研究分别应用 OLS 模型和 GWR 模型对 NDVI 进行拟合, 并对拟合效果进行对比, 结果如表 1 所示。基于 OLS 模型回归的拟合优度为 0.33, 调整的拟合优度为 0.32, AIC 值为 5537.55; 基于

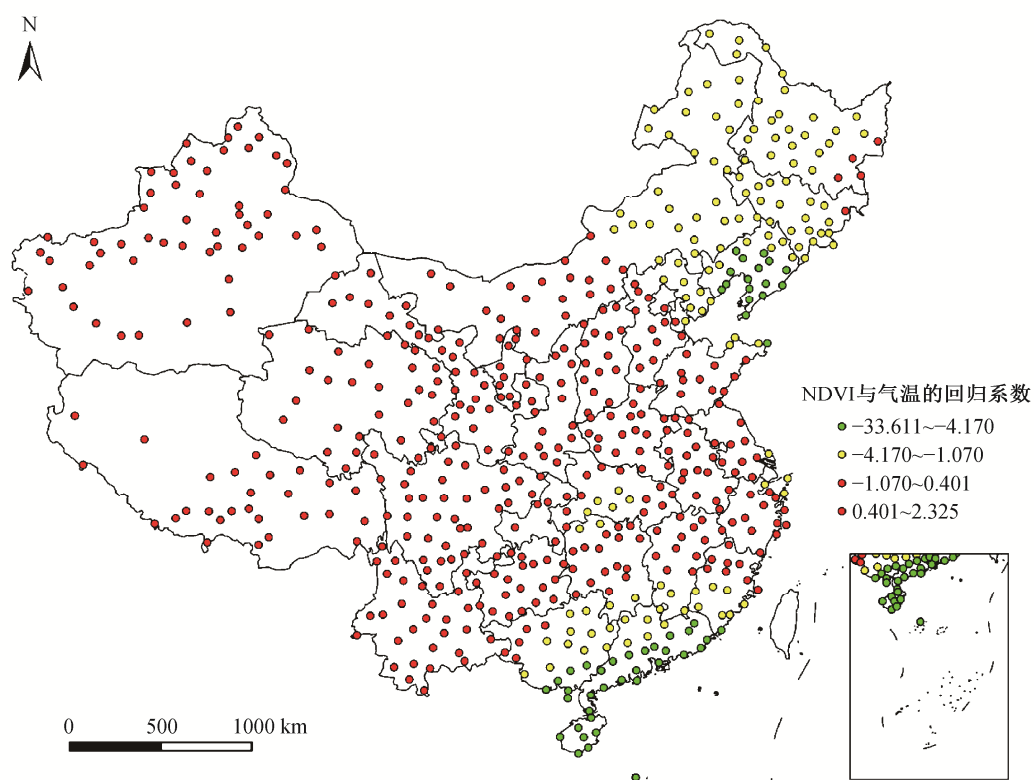


图 3 地理加权回归模型中 NDVI 与气温的回归系数  
Fig. 3 Regression coefficients of temperature in GWR model

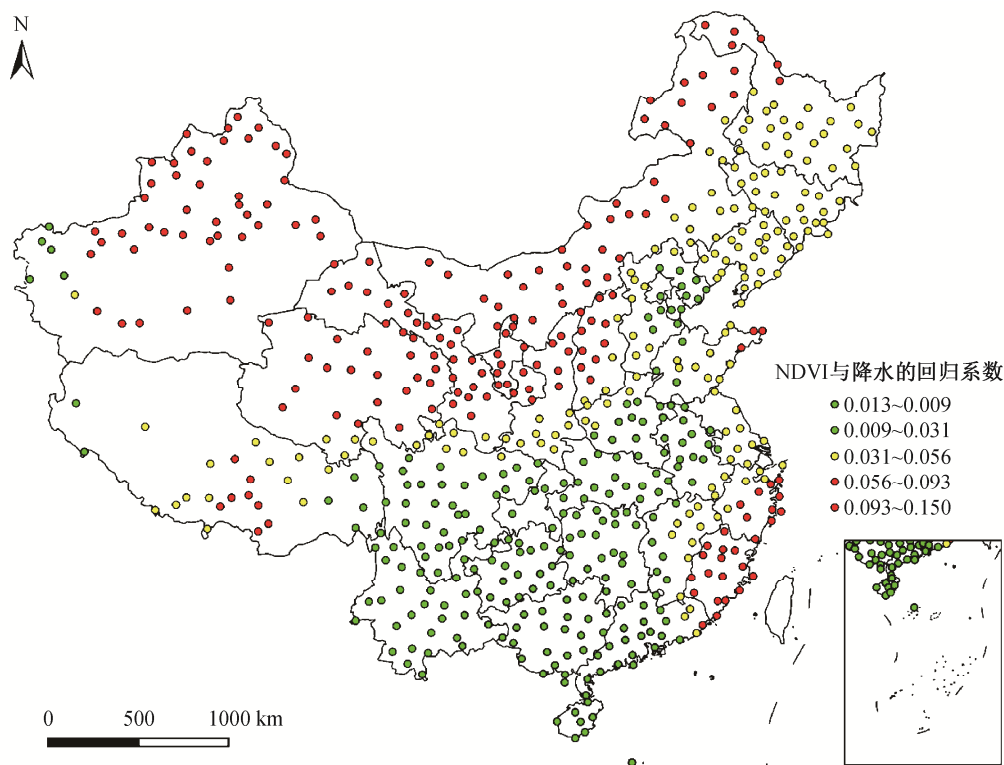


图 4 地理加权回归 NDVI 与降水的回归系数  
Fig. 4 Regression coefficients of precipitation in GWR model

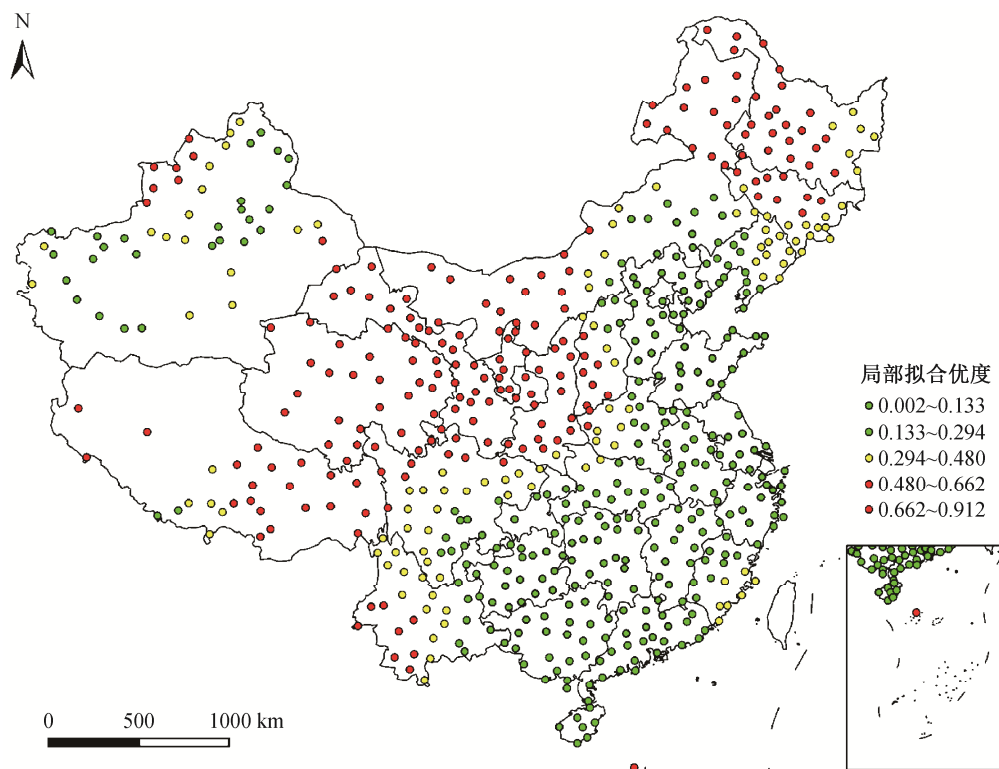


图 5 地理加权回归局部拟合优度  
Fig. 5 Spatial patterns of local  $R^2$  of GWR model

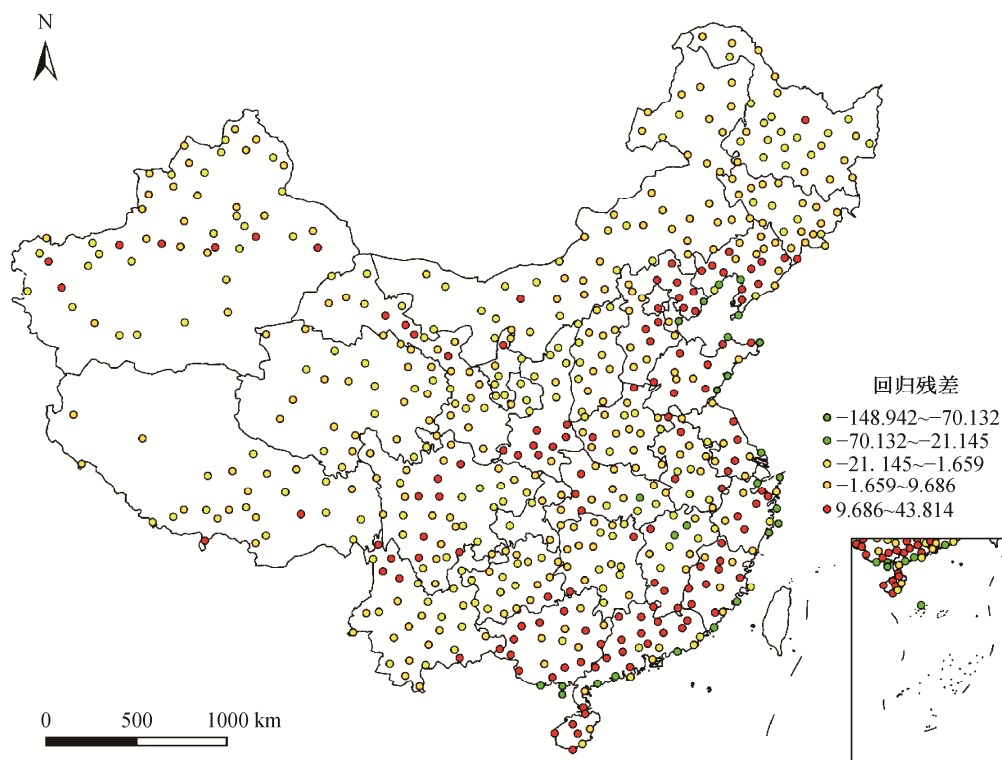


图 6 GWR 模型回归残差  
Fig. 6 Spatial distribution of residuals of the GWR model

表 1 GWR 和 OLS 模型回归效果比较  
Table 1 Model performance difference between GWR and OLS

指标	AIC	$R^2$	$R^2_{\text{adjusted}}$
OLS	5537.55	0.33	0.32
GWR	5142.42	0.65	0.59

GWR 模型回归的拟合优度为 0.65, 调整的拟合优度为 0.59, AIC 值为 5142.42。GWR 模型拟合优度显著大于 OLS 模型, 因此 GWR 模型的拟合效果更好。GWR 模型的 AIC 值小于 OLS 模型, 且两者之差大于 3, 可以判定地理加权回归模型比普通线性回归模型更接近真实状态, 即 NDVI 与气候因子之间存在明显的空间非平稳性<sup>[5]</sup>。

在空间回归分析中, 为了保证回归模型参数的可靠性, 空间样本点之间不应具有显著相关性。通常回归残差是否随机分布可以作为检验样本点空间自相关的标准。GWR 模型回归残差的空间分布(图 6)比 OLS 模型更离散。应用最近邻法对 GWR 模型回归残差进行自相关检验, 残差满足随机分布。

2.4 NDVI 与气候因子关系的区域差异

由于中国国土面积较大, 因此自然环境条件复

杂多变。利用地理加权回归的最优带宽、拟合优度和 AIC 值, 可以分析 NDVI 与气候因子关系的空间异质性。根据温度、降水、海拔、植被和地形地貌等数据, 将中国分为 4 个生态地理区, 即东北部湿润半湿润生态地理区、北部干旱半干旱生态地理区、南部湿润生态地理区和青藏高原生态地理区<sup>[30]</sup>。对不同生态地理区的样本点分别计算平稳性指数(图 7), 可以得到以下结论。

1) 各个生态地理区 NDVI 与气温和降水平稳性关系的空间尺度不同。在北部干旱半干旱生态地理区, NDVI 与气温之间关系达到平稳性的空间尺度是 225 km, 降水则是 725 km(图 7(a)); 在东北部湿润半湿润生态地理区, NDVI 与气温之间平稳性关系的最小空间尺度是 234 km, 而降水则是 242 km(图 7(b)); 在南部湿润生态地理区, NDVI 与气温之间的关系在 130 km 以上达到平稳性状态, 降水则为 93 km(图 7(c)); 在青藏高原生态地理区, NDVI 与气温之间的关系在 109 km 以上达到稳定, 而降水则为 152 km(图 7(d))。整体上, 除南部湿润生态地理区外, 气温与 NDVI 达到平稳关系的空间尺度小于降水与 NDVI 之间的关系; 随着带宽尺度减小, 数据平稳性下降, 模型回归结果可信性小;

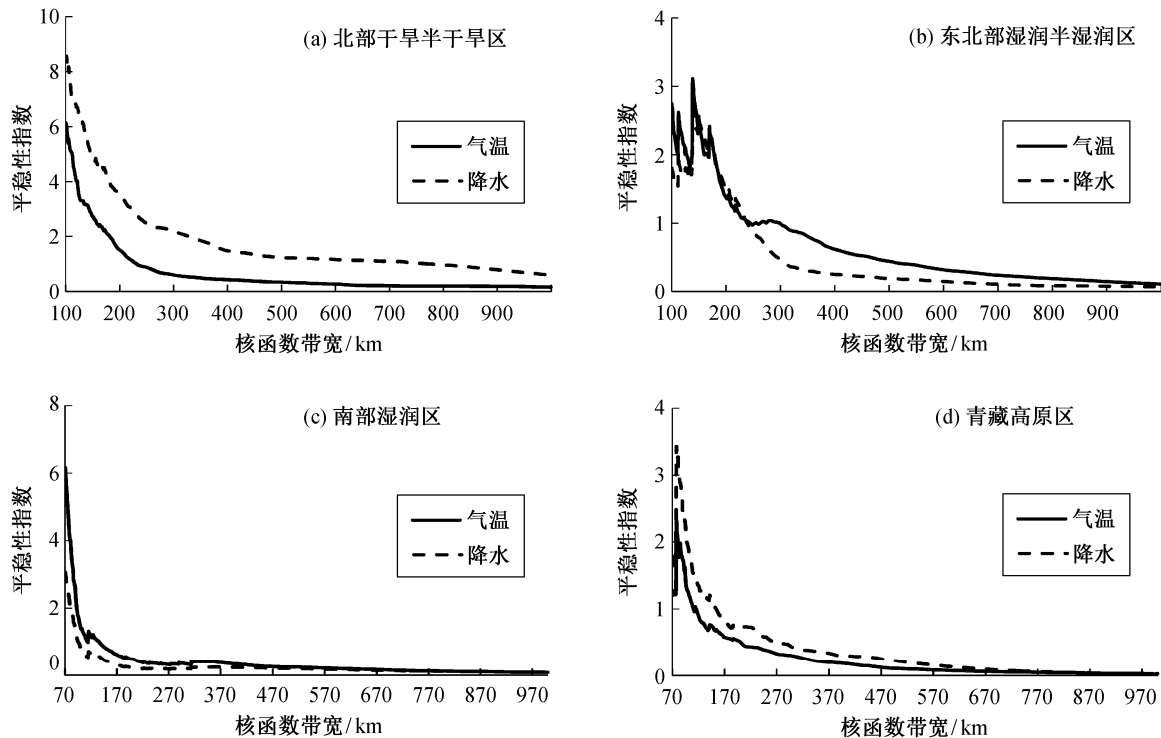


图 7 不同尺度下 NDVI 与气温和降水关系的平稳性指数变化  
Fig. 7 Stationarity index at different for two explanatory variables

随着带宽尺度增加,数据平稳性增加,模型回归结果可信性大。一般情况下,自然环境控制因素越单调,NDVI 与气候因素达到平稳性的空间尺度就越小,反之就越大。因而,各区 NDVI 与气候因子平稳性关系的空间尺度是区域面积、地形复杂度、人类扰动强度等多种因素综合作用的结果。

2) 各区 GWR 模拟性能有较大差异。根据各个生态地理区 NDVI 与气温和降水平稳性关系空间尺度的分析结果,进行分区地理加权回归计算,得到结果如表 2 所示。可以看出,不同生态地理区的地理加权回归结果有显著差异。GWR 模型在青藏高原生态区拟合优度最高,达到 0.98; AIC 值较小,为 577.58; 在东北部湿润半湿润生态区拟合优度最低,为 0.39; AIC 值最大,为 1194.77。

表 2 不同生态地理区 NDVI 与气候因子的关系  
Table 2 Relationship between NDVI and climatic factors in different ecological regions

生态地理分区	最优带宽/km	$R^2$	$R^2_{\text{adjusted}}$	AIC
东北部湿润半湿润生态地理区	240	0.39	0.23	1194.77
南部湿润生态地理区	100	0.93	0.67	366.05
北部干旱半干旱生态地理区	230	0.76	0.62	958.43
青藏高原生态地理区	140	0.98	0.91	577.58

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文应用地理加权回归模型(GWR),以 1982—2010 年中国多年平均 NDVI 为因变量,年降水量和年均气温为自变量,对 NDVI 与气候因子关系的空间非平稳性和区域特征进行分析,结论如下。

1) NDVI 与年均温和年降水量之间的关系分别在 350 km 和 450 km 尺度上趋于平稳。根据 AIC 法则和平稳性指数的变化趋势,确定 350 km 为最优带宽,在这一尺度上建立的 NDVI 与气候因子的回归关系较为可靠。

2) 与一般全局性回归模型比较,不论是模拟精度还是空间结构,GWR 模拟结果都显著优于一般全局性回归模型。GWR 模型的  $R^2$  为 65,调整的  $R^2$  为 0.59,而 OLS 方法的  $R^2$  为 0.33,调整的  $R^2$  为 0.32; GWR 模型的 AIC 值为 5142.42,而 OLS 模型的 AIC 值为 5537.55。

3) 中国区域广阔,自然环境空间异质性很高,故 NDVI 与气候因子的关系存在显著的区域差异,表征为:各区 NDVI 与主导气候因子发生作用的特征尺度大小不同;模拟各区 NDVI 与主导气候因子地理加权回归模型的性能不尽相同。

#### 3.2 讨论

本文研究结果表明,NDVI 与气候因子之间的关系存在显著的时空差异,并且具有多尺度特征。这一特性已经逐步被研究者所认识,如刘绿柳等<sup>[31]</sup>通过对黄河流域 NDVI 与降水、温度的年际变化趋势及相互关系的时空变化规律分析,发现该流域 NDVI 与降水、温度相关显著的植被类型以草地、灌木为主,但相关区域的空间位置随时间变化。郭锐等<sup>[11]</sup>的研究也证实,西北地区 NDVI 与气温的相关系数大于降水,天山、阿尔泰山和秦岭的 NDVI 与气温相关系数最高,而青海东北部 NDVI 与降水的相关系数最高。

本研究也存在一些不足。首先,GWR 模型虽然对于刻画 NDVI 与气候因子的空间非平稳性和尺度依存特性具有独特的优势,但自然界一些环境因子对 NDVI 的作用范围是全局性的,应用 GWR 时会出现一些虚假的回归空间结构。将来的工作可以寻求混合型地理加权回归模型来解决这一问题。其次,本文仅分析了 NDVI 与气候因子的回归关系,实际上,除气候因子外,诸多环境因素都影响到 NDVI,如地形和土壤条件等。下一步工作将把这些因子融合到地理加权回归模型中,以期得到更为客观的分析结果。

#### 参考文献

- [1] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241–252
- [2] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6): 1313–1330
- [3] Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982–1999. *Science in China: Series C*, 2004, 47(3): 229–240
- [4] Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416: 389–395



- [5] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D*, 1998, 47(3): 431–443
- [6] Lesage J P. A family of geographically weighted regression models // *Advances in spatial econometrics*. Berlin: Springer Berlin, 2004: 241–264
- [7] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆被变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 2014, 36(1): 166–174
- [8] 单楠. 京津冀风沙源区植被指数对气候变化响应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院. 2013
- [9] 李明杰, 侯西勇, 应兰兰, 等. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征. *资源科学*, 2011, 33(2): 322–327
- [10] 毛飞, 卢志光, 张佳华, 等. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系. *生态学报*, 2007, 27(8): 3199–2307
- [11] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 等. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 319–327
- [12] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982–2010 年中国草地的时空动态及其对气候变化的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 15–31
- [13] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 等. 1982–2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究. *西北植物学报*, 2009, 29(4): 800–808
- [14] Leung Y, Mei C L, Zhang W X. Statistical test for local patterns of spatial association. *Environ Plant A*, 2003, 35(4): 725–744
- [15] Foody G M. Geographical weighting as a further refinement to regression modeling: an example focused on the NDVI-rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 283–293
- [16] Kupfer A J, Farris A C. Incorporating spatial non-stationarity of regression coefficients into predictive vegetation models. *Landscape Ecology*, 2007, 22(6): 837–852
- [17] Nemani R, Keeling C, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300: 1560–1563
- [18] Zhao Z Q, Gao J B, Wang Y L, et al. Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 120(5): 507–519
- [19] Propastin A P, Kappas M. Reducing uncertainty in modeling the NDVI-precipitation relationship: a comparative study using global and local regression techniques. *GIScience and Remote Sensing*, 2008, 45(1): 47–67
- [20] 马宗文, 许学工, 卢亚灵. 环渤海地区 NDVI 拟合方法比较及其影响因素. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1558–1564
- [21] 张静. 三峡库区植被指数与气象因子相互关系研究[D]. 重庆: 西南大学. 2012
- [22] 范锦龙, 李贵才, 张艳. 阴山北麓农牧交错带植被变化及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1528–1532
- [23] 郭广猛, 谢高地, 甄霖. 泾河上游固原地区的 NDVI 变化与降水的相关性研究. *资源科学*, 2007, 29(2): 178–182
- [24] Cui Linli, Shi Jun. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China. *J Geogr Sci*, 2010, 20(2): 163–176
- [25] Fotheringham A S, Charlton M, Brunsdon C. The geography of parameter space: an investigation of spatial non-stationarity. *International Journal of Geographical Information systems*, 1996, 10(5): 605–627
- [26] Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle // Petrov B N, Csaki F. *Second international symposium on information theory*. Budapest: Akademiai Kiado, 1973: 267–281
- [27] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. *生态学报*, 2000, 20(5): 899–902
- [28] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379–382
- [29] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204–209
- [30] 谢高地, 张昌顺, 张林波, 等. 保持县域边界完整性的中国生态区划方案. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 154–162
- [31] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 477–481