

2000—2013 年中国植被碳利用效率(CUE) 时空变化及其与气象因素的关系

刘洋洋¹, 王倩¹, 杨悦², 同琳静¹, 李建龙¹, 章钊颖³, 王振乾⁴

(1.南京大学 生命科学学院生态学系, 南京 210023; 2.环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042; 3.南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023; 4.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:植被碳利用效率(CUE)是评估陆地碳循环的重要指标,探讨其动态特征对气候变化的响应对于陆地生态系统碳循环研究具有重要的指示意义。基于 MOD17 数据计算中国植被 CUE,辅以地统计学理论,利用趋势分析、变异系数及相关性分析等方法,研究了 2000—2013 年中国植被 CUE 的时空变化特征,并结合气象要素数据剖析植被 CUE 对气候变化的响应。结果表明:全国植被年 CUE 在研究年限内总体上表现为轻微的增长趋势,具体表现为在 2000—2007 年以 0.000 6 的变化率呈现波动下降的趋势,而 2007—2013 年植被 CUE 呈现显著上升的变化趋势,该变化特征可归因于 2007 年气温及降水格局的改变;植被 CUE 空间分布具有明显的空间异质性,大体呈现西部高东部低的状态。CUE 增加较明显的区域主要分布在内蒙古呼伦贝尔地区,青藏高原大部分地区,东部沿海地区以及台湾岛。而 CUE 呈减少趋势的区域分布范围较广,其中减少趋势较为明显的地区主要包括东北平原及华北华中的大部分地区,另江南地区及新疆部分地区也有零星分布。草地及森林区域植被 CUE 波动变化较小,表明该部分地区生态系统处于良性循环。不同植被类型的 CUE 均值表现为:草地(0.21)>农田(0.14)>森林(0.09)>灌丛(0.06)。全国大多数地区植被 CUE 与降水呈正相关,而与气温则呈负相关,而这种相关性会随着区域气候格局及植被类型的变化而变化。总体上,全国植被 CUE 的增加主要归因于降水量的增加,而气温的升高则造成植被 CUE 的降低。

关键词:时空动态;碳利用效率(CUE);气候变化;趋势分析;变异系数

中图分类号:X718

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0278-09

Spatiotemporal Dynamic of Vegetation Carbon Use Efficiency and Its Relationship with Climate Factors in China During the Period 2000—2013

LIU Yangyang¹, WANG Qian¹, YANG Yue², TONG Linjing¹,

LI Jianlong¹, ZHANG Zhaoying³, WANG Zhenqian⁴

(1.Department of Ecology, School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection of the People's

Republic of China, Nanjing 210042, China; 3.International Institute for Earth System Science, Nanjing

University, Nanjing 210023, China; 4.School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Carbon use efficiency (CUE) is an important indicator to evaluate the carbon cycle of terrestrial ecosystem. Assessing the responses of CUE to climate change is of great significance to the study of terrestrial ecosystem carbon cycle. In this study, the vegetation CUE was calculated based on the MOD17 dataset, and the temporal and spatial dynamics of vegetation CUE in response to climate change in China during 2000—2013 were also analyzed. The results showed that the vegetation CUE presented a slightly increasing trend during the study period overall. Specifically, the vegetation CUE showed a decreasing trend during the period 2000—2007 with the change rate of 0.000 6, but presented a significant increasing trend from 2007 to 2013, which could be attributable to the change of climate pattern in 2007. The spatial distribution of vegetation CUE had obvious spatial heterogeneity. The vegetation CUE was generally high in the west and low in the

收稿日期:2018-11-02

修回日期:2018-11-21

资助项目:国际 APN 全球变化项目(No.ARPC2015-03CMY-Li);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB950702);国家重点研发计划项目(2018YFD0800201)

第一作者:刘洋洋(1991—),男,河南洛阳人,博士研究生,从事生态遥感及陆地生态系统碳循环等研究。E-mail:hnlycbtks@163.com

通信作者:李建龙(1962—),男,吉林长春人,教授,博导,研究方向为:全球变化及陆地生态系统碳循环。E-mail:lijianlongnju@163.com

east. The regions where vegetation CUE showed an obviously increasing trend were mainly located in the Hulun Buir region of Inner Mongolia, most of parts of the Qinghai Tibet Plateau, the eastern coastal area and the Taiwan Island. However, the regions where vegetation CUE showed an obviously decreasing trend mainly distributed in the Northeast Plain and most areas of central China, while the other areas in the south of the Yangtze River and some parts of Xinjiang also had sporadic distribution. The fluctuation of vegetation CUE in grassland and forest area was relatively small, which indicated that the ecosystem in these areas was in a virtuous circle. The mean CUE values of different vegetation types follow an order of: grassland (0.21) > farmland (0.14) > forest (0.09) > shrub (0.06). The vegetation CUE in most areas was positively correlated with precipitation, but was negatively correlated with the temperature, and this correlation variation with the change of regional climate patterns and vegetation types. In general, the increase of CUE in China was mainly attributed to the increase of precipitation, while the increase of temperature induced the decrease of vegetation CUE.

Keywords: spatiotemporal dynamics; carbon efficiency (CUE); net primary productivity (NPP); gross primary productivity (GPP); climate change; trend analysis; coefficient of variation.

根据最近的 IPCC 报告,全球气温在 1880—2012 年上升了 0.85°C ,并且仍然在继续上升,此外,陆地生态系统碳循环在全球变化的影响下不断经历新的变化^[1]。植被作为地球陆地表面覆盖的重要组成部分,因其对气候环境变化较为敏感,且作为陆地表面主要的碳库,成为碳循环研究的核心内容^[2]。植被碳利用效率(CUE)被定义为植被净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)的比值,可以表征植被的固碳能力及效率,是植被的重要功能参数^[3]。植被 CUE 也能够衡量不同植被类型间的碳循环差异,且常被用来作为植被模型模拟过程中的功能模型参数^[4]。近年来,随着 3S 技术的广泛应用,遥感手段已被用来监测全球或区域尺度下的 NPP 和 GPP。中分辨率成像光谱辐射仪(MODIS)能够提供覆盖全球的 NPP 和 GPP 数据,为长时间尺度及大范围空间内的生态系统 CUE 时空动态研究提供了便利^[5]。NPP 和 GPP 数据已被野外实测数据和通量站监测数据进行验证,表明对于不同植被类型或不同气候区,MODIS NPP 和 GPP 数据与实际观测数据均具有较高的相关性,且由于其可获得的便利性,已被广泛应用于区域或全球的碳循环研究中^[6-7]。

目前,国内外众多学者基于遥感数据开展了区域或全球尺度下的生态系统 CUE 的研究。例如,Yang 等^[8]基于 MOD17 数据和 IGBP 植被分类系统研究了全球草地 CUE 的时空动态及其对气候变化的响应,认为不同草地类型的 CUE 存在着差异,且总体上草地 CUE 与降水呈正相关而与气温呈负相关;Zhang 等^[9]通过研究 2000—2009 年全球植被 CUE 对气温变化的响应,发现该期间全球 CUE 表现出轻微的下降趋势,降水的增加有利于 CUE 的升高,而气

温的增加则会限制 CUE 的增长。Gang 等^[10]则结合 Drought Severity Index(DSI)指数分析了干旱对全球不同草地类型 CUE 的影响,表明干旱能够充分解释南半球草地 CUE 的动态趋势,且萨王纳较其他草地类型而言,其 CUE 对干旱响应更为敏感。Khalifa 等^[11]则结合 SPEI 干旱指数研究了不同时间尺度下干旱对苏丹及埃塞俄比亚植被 CUE 的影响。此外,也有部分学者基于模型或通量站数据对森林^[12]、草地^[3]等不同植被类型的 CUE 进行了探究。

中国地域面积广,植被类型众多,成为全球陆地碳循环研究的热点区域。纵观以上研究,多是关于全球尺度或洲际范围内的特定生态系统的 CUE 探讨,而针对我国不同生态系统 CUE 的系统研究仍较为缺乏,尤其是我国植被 CUE 的时空动态及其对气候变化的响应特征尚不明确。鉴于此,本研究利用 MOD17 数据计算中国的植被 CUE,分析 2000—2013 年植被 CUE 的时空动态特征,从区域及生物群落水平探讨植被 CUE 与气温降水的相关关系,不仅有助于了解中国植被 CUE 的动态特征,揭示其对气候变化的响应机理,且对于陆地生态系统碳循环的后续研究具有重要的指示意义。此外,系统评价植被 CUE 对于区域的气候变化的预测、植物保护及相关产业的经济发展等具有重要的理论支撑和实践指导意义。

1 数据及方法

1.1 数据来源及处理

1.1.1 MODIS NPP 和 GPP 数据 全球尺度的 NPP 和 GPP 数据分别来源于美国 LPDAAC 所提供的 MOD17A3 和 MOD17A2 产品(下载地址: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>),数据时

间分辨率分别为 1 a 和 8 d, 空间分辨率均为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 数据采用 HDF-EOS 格式存储, 选取的年限为 2000—2013 年。该数据集是参考光能利用模型及 BIOME-BGC 模型进而估算而成, 基于更多的参数且估算方法更为精密, 因而数据估算精度较高, 且该数据已经过大气校正及消除了云、水和气溶胶的影响, 无需再经过校正处理^[13]。此外, 该 NPP 及 GPP 数据集分别已通过实测数据和涡度通量数据的精度验证, 目前已被广泛应用于区域或全球的陆地生态系统碳循环研究中^[7-14]。采用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 软件对原始数据进行拼接、投影及重采样, 采用 UTM/WGS-1984 坐标系, 分辨率统一为 500 m。并通过 ArcGIS 10.0 对某些因水体或建筑物引起的异常值进行剔除, 最终生产年时间序列的 NPP 和 GPP 栅格影像, 再基于公式 $\text{CUE} = \text{NPP}/\text{GPP}$, 计算出每年的植被 CUE。最后基于中国边界范围图, 通过 ENVI 5.2 软件对 CUE 数据进行裁剪, 最终得到中国年尺度上的植被 CUE 数据^[8-9]。

1.1.2 气象数据 气象数据来源于中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 提供的 2000—2013 年全国的 720 个标准气象站点的月平均温度及月降水量数据, 结合各个站点的经纬度及高程信息, 通过 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法对气象数据进行空间插值, 获取与 MOD17 数据投影相同且像元大小一致的气象栅格影像^[15]。

1.1.3 土地覆盖类型数据 土地覆盖产品来源于 NASA MODIS 网站的 2013 年的 MCD12Q1 地表覆盖数据 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>), 空间分辨率为 500 m, 原始数据采用 MRT 软件进行格式转换及重投影处理, 并对数据进行重采样, 使其与 MODIS NPP 和 GPP 数据投影和分辨率保持一致。本研究采用 IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) 分类系统数据, 该分类法将地表覆盖类型划分为 17 类, 具体包括 11 类自然植被类型、3 类土地利用和土地镶嵌、3 类无植生土地类型^[8]。根据研究目的, 本文将其重新划分为水域、森林、灌丛、草地、农田、城镇和裸地及荒漠 7 类, 进而重点分析森林、灌丛、草地和农田 4 种植被覆被类型的碳利用效率时空动态特征^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势分析 本研究采用一元线性回归来分析植被 CUE 及气温降水在空间上的变化趋势和变化率, 回归方程斜率 slope 表示研究年限内各个栅格点 CUE 的变化趋势^[17], 计算公式具体如下:

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

式中: n 为研究的年限数 14; i 代表第 i 年; Var_i 表示第 i 年的变量值。以 CUE 为例, 若 $\text{slope} > 0$, 表示植被 CUE 在 14 a 间呈现出增加的趋势, 反之, 则变化趋势减少。

其中, 植被 CUE 变化趋势的显著性则通过 F 检验来判断^[18], 具体计算公式如下:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

式中: U 为误差平方和; Q 表示回归平方和; \hat{y}_i 为其回归值; \bar{y} 表示 14 a 植被 CUE 的平均值; y_i 为第 i 年的 CUE; n 为研究年数 14 a。通过 F 检验将植被 CUE 的变化趋势划分为 6 等级: 极显著减少 ($\text{slope} < 0, p < 0.01$), 显著减少 ($\text{slope} < 0, 0.01 < p < 0.05$), 不显著减少 ($\text{slope} < 0, p > 0.05$); 不显著增加 ($\text{slope} > 0, p > 0.05$); 显著增加 ($\text{slope} > 0, 0.01 < p < 0.05$), 极显著增加 ($\text{slope} > 0, p < 0.01$)^[18]。

1.2.2 稳定性分析 变异系数可以表示地理数据的相对波动程度, 本文采用变异系数分析植被 CUE 变化的稳定性^[19], 公式具体如下:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{CUE}_i - \overline{\text{CUE}})^2}{n-1}}}{\overline{\text{CUE}}} \quad (5)$$

式中: C_v 为变异系数; CUE_i 表示第 i 年的植被 CUE; $\overline{\text{CUE}}$ 为 14 年间的平均 CUE 值; n 为研究年数。变异系数越小, 表明数据分布越集中, 即数据随时间序列的波动越小, 具有较好的稳定性; 反之则说明数据波动性大, 表现出更高的不稳定性。

1.2.3 相关性分析 植被 CUE 与气象因子的相关性可以通过基于像元的相关系数 R 计算, 进而可以得到 CUE 与气温和降水在不同空间尺度上的相关性, 具体计算公式如下^[20]:

$$R_{xy} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \times \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (6)$$

式中: R_{xy} 表示 CUE 与气象因子的相关系数; n 表示研究的年限; x_i 为第 i 年的 CUE; y_i 为第 i 年的平均气温或降水。

所得的相关系数采用 t 检验来进行相关性的显著性检验, 公式具体如下^[21]:

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (7)$$

式中: R 表示相关系数; n 为年数14 a。根据 t 分布表进而判断相关系数的显著性,根据显著性水平将其划分为6类:极显著负相关($R < 0, p < 0.01$)、显著负相关($R < 0, 0.01 \leq p < 0.05$)、不显著负相关($R < 0, p \geq 0.05$)、不显著正相关($R \geq 0, p \geq 0.05$)、显著正相关($R \geq 0, 0.01 \leq p < 0.05$)和极显著正相关($R \geq 0, p < 0.01$)。

1.2.4 统计分析 本文遥感影像数据的处理主要通过 Matlab 程序实现;数据计算和统计基于 ENVI 5.2 和 IDL 语言实现;图表制作主要通过 ArcGIS 10.0 及 SigmaPlot 10.0 完成。

2 结果与分析

2.1 植被 CUE 的年际变化特征

图1为2000—2013年全国陆地植被CUE的年际变化特征。对全国植被年CUE的平均值进行统计分析可知,研究期限内植被CUE的平均值为0.391,其中最高值为2003年的0.404,最低值为0.387,出现在2007年。趋势上,总体上呈现出轻微的波动上升趋势。具体看来,2000—2006年期间植被CUE呈现波动上升的趋势,2006年之后陡然下降至2007年的最低值,8 a间的变化率为0.000 6。而2007—2013年植被CUE则呈现出波动上升的变化趋势,且线性增长趋势达到显著性水平($p < 0.05$),平均变化率为0.002 2。

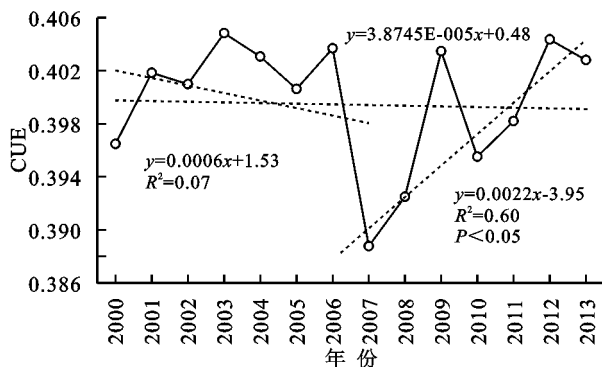
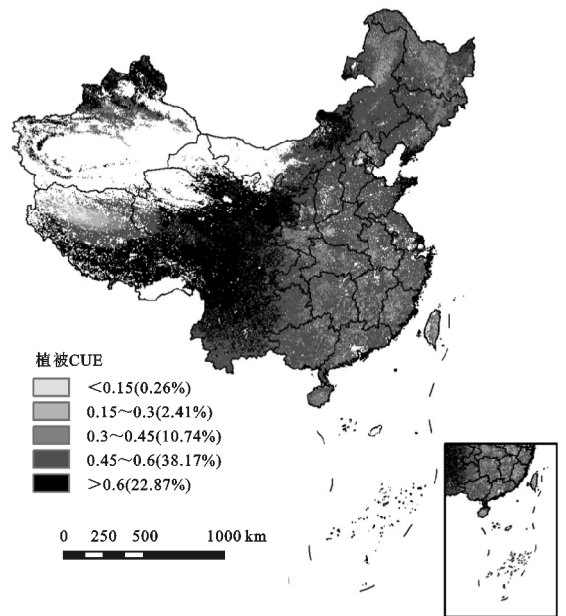


图1 2000—2013年中国植被CUE年际变化趋势

2.2 CUE 空间分布及动态趋势

由全国2000—2013年植被平均CUE的空间分布(图2)可知,植被CUE分布具有明显的空间异质性,大体呈现西部高东部低的状态。高值区主要集中在西南地区。具体表现为:植被CUE大于0.6的区域占中国陆地面积的22.87%,主要分布在秦巴山区、四川盆地、青藏高原南端、新疆北部地区以及内蒙古中部地区,该部分地区植被类型多数以草地和灌丛为主,另辽东半岛及山东半岛植被CUE值也在0.6以

上。植被CUE值在0.45~0.6的区域面积相对最多,占中国面积的38.17%,主要集中在东北平原、云贵高原及青藏高原中部地区,另在华中及华南地区也呈零星分布。此外,东北长白山及大兴安岭地区,华北平原及江南地区的植被CUE则趋于中等水平,其CUE值处于0.3~0.45,该部分地区占中国陆地面积的10.74%。植被CUE在0.15以下的地区所占比例较小,集中分布在青藏高原的中西部地区,另在中国东部大部分地区零星分布。



注:空白区域为无植被分布区域,下同。

图2 2000—2013年中国植被CUE空间分布特征

图3表明2000—2013年全国植被CUE的年际变化率分布于-0.03~0.02。其中CUE增加较明显的区域主要分布在内蒙古呼伦贝尔地区,青藏高原大部分地区,东部沿海地区以及台湾岛。而CUE呈减少趋势的区域分布范围较广,其中减少趋势较为明显的地区主要包括东北平原及华北华中的大部分地区,另江南地区及新疆部分地区也有零星分布。对植被CUE的变化趋势进行显著性检验,共分为6个显著性等级,具体如附图5所示。具体看来,植被CUE呈极显著增加和显著增加的区域分别占中国陆地面积的1.71%和2.79%,主要分布在青藏高原东缘以及长三角地区。植被CUE呈极显著减少或显著减少的区域分别占全国陆地面积的2.53%和4.09%,该部分区域主要集中在河南山西的太行山地区,云贵高原的部分地区以及甘肃小陇山地区。未显著增加及减少的地区所占面积比例较大,分别为29.37%和32.68%,其中未显著增加的区域集中在新疆北部,青藏高原以及东北兴安岭地区,江苏省及长三角地区植被CUE增加趋势也不显著。而未显著减少的区域则主要集中在东北平原,华北地区以及华南、云贵高原的大部分地带。

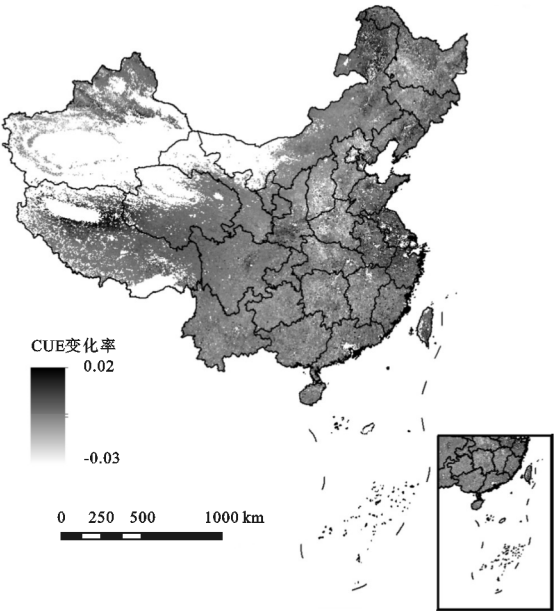


图 3 2000—2013 年中国植被 CUE 的变化率

2.3 CUE 的区域变化稳定性特征

通过计算 2000—2013 年全国植被 CUE 变异系数,根据变异值将波动程度划分为 5 个等级(表 1),并对全国植被 CUE 的波动变化特征进行系统研究,结果如图 4 所示,总体上,全国植被 CUE 的变异系数处于 0.002~0.72,表明植被 CUE 在空间分布上存在着一定的差异性。具体上表现为:全国大部分地区植被 CUE 变异系数位于 0.05 以下,处于低波动变化状态,该部分地区占全国陆地面积的 47.27%,该部分地区主要集中在青藏高原东缘、四川盆地及内蒙古中部地区(图 5)。CUE 变异系数在 0.2 以上的地区占全国陆地面积的 2.68%,处于高波动变化状态,主要集中在黑龙江的大兴安岭地区、秦巴山区的部分区域,植被类型主要以森林和灌丛为主,表明该期间我国的森林防护工程的实施,提升了植被覆盖率及固碳能力,引起了林地区域的植被 CUE 产生较大的波动变化。中等波动的区域占全国陆地面积的 6.29%,除了在黑龙江北部地区分布之外,在华中及江南地区也呈零星状分布。

表 1 中国植被 CUE 的变异系数统计

CUE 变异系数	变异程度	所占面积比例/%
$C_v \leq 0.05$	低波动状态	47.27
$0.05 < C_v \leq 0.10$	较低波动状态	14.54
$0.10 < C_v \leq 0.15$	中等波动状态	6.29
$0.15 < C_v \leq 0.20$	较高波动状态	2.39
$C_v > 0.20$	高波动状态	2.68

2.4 不同植被类型 CUE 变化

不同植被类型 CUE 的年际变化趋势及变化显著性面积比例有明显差异。由图 5 可以看出,不同植被类

型的 CUE 均值表现为:草地(0.21)>农田(0.14)>森林(0.09)>灌丛(0.06)。以上表明,草地的碳利用效率最高,且固碳能力相对较强,而灌丛的碳利用效率最低,固碳能力较弱。通过对全国 2000—2013 年不同植被类型的 CUE 变化趋势进行统计,表明不同植被类型的 CUE 变化趋势存在差异,其中草地与农田的 CUE 呈现出波动减少的趋势,而森林及灌丛的 CUE 则表现为波动增加的变化趋势,以上变化趋势均未通过 0.05 显著性水平检验(图 5A)。由图 5B 可以看出,就草地而言,草地 CUE 呈极显著增加或显著增加的区域分别占草地总面积的 2.76%和 4.62%,而全国共计 83.4%的草地 CUE 变化趋势不明显。农田 CUE 呈极显著和显著增加趋势的区域分别占全国农田总面积的 2.96%和 3.40%,全国约 83.62%的农田 CUE 变化趋势不明显。森林的极显著增加,显著增加,极显著减少和显著减少的区域分别占森林总面积的 0.98%,2.06%,1.60%和 3.80%。对于灌丛而言,78.70%的灌丛 CUE 变化(增加或减少)显著性不明显。

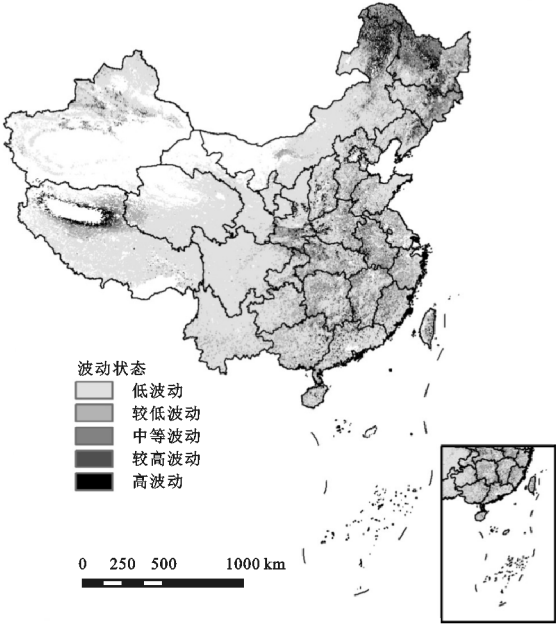


图 4 2000—2013 年中国植被 CUE 的变异程度

2.5 2000—2013 年中国降水 and 气温时空动态

图 6 为 2000—2013 年中国的年均气温和降水量变化趋势。空间变化上,降水增加的区域占中国陆地面积的主要分布在中国北方的大部分地区,以及四川重庆和东南沿海地区;而华北平原及西南云贵高原地区降水明显减少(图 6A)。气温明显增加的区域主要分布在四川及云南的西南部地区和河南省的部分区域,而气温明显减少的区域主要集中在陕西的西北地区以及东北的大部分地区(图 6B)。时间变化上,2000—2013 年中国降水总体上呈现出波动上升趋势,而上升趋势不明显,趋势变化率为 0.5 mm/a。其中,2000—2007 年降水呈现出

波动减少的趋势,2007—2013 年降水呈波动上升,两个时间段的趋势变化率分别为 5.89,8.17 mm/a。降水的最高值及最低值分别出现在 2012 年、2011 年,分别为 626.18,518.37 mm。气温变化趋势与降水恰好相反,具体表现为 2000—2013 年整体上表现为波动下

降的趋势,趋势变化率为 0.02℃/a,然而 2000—2007 年气温则以 0.07℃/a 的速率呈现出上升趋势,2007 年达到最高值 7.73℃之后陡然下降。2007—2013 年气温以 0.11℃/a 的变化率波动下降,于 2012 年达到最低值 6.57℃后又转而上升(图 6C)。

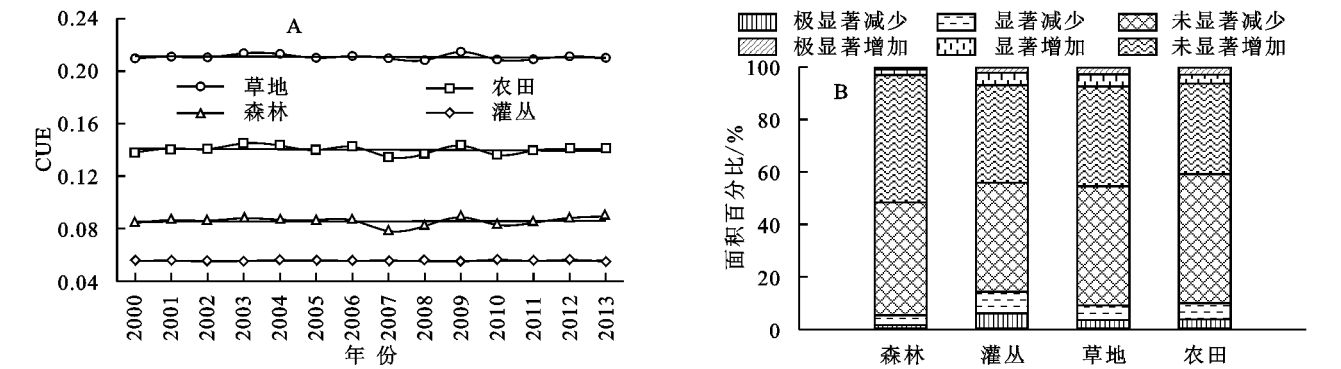


图 5 2000—2013 年不同植被类型 CUE 的变化趋势及显著性面积比例

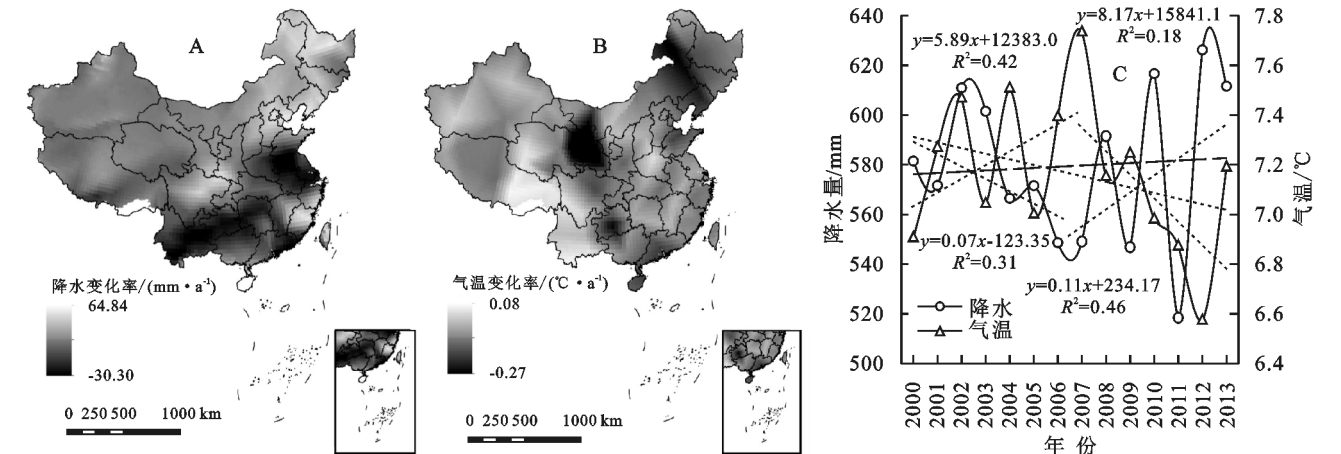


图 6 2000—2013 年中国气温降水变化率和年际变化趋势

2.6 植被 CUE 与气象因子的关系

由附图 6A 可以看出,植被 CUE 与降水呈正相关的区域占全国植被面积的 45.85%,主要分布在黑龙江大小兴安岭地区、秦巴山区、黄淮平原地区以及江南的大部分区域,其中植被 CUE 与降水呈极显著正相关和显著正相关的区域分别占全国植被面积的 0.90%和 3.33%,主要集中分布在内蒙古呼伦贝尔以及大兴安岭地区,另在云贵高原地区也有分布。而植被 CUE 与降水呈极显著负相关的区域所占比例较小,仅在青藏高原地区零星分布。总体看来,全国植被 CUE 与降水的平均相关系数为 0.27,且大部分地区降水的增加对植被 CUE 具有促进作用。植被 CUE 与气温的相关性如附图 6B 所示:我国大部分地区植被 CUE 与气温呈现负相关关系,占植被总面积的 42.31%,该部分区域主要分布在我国东北地区、新疆北部地区、陕西的大部分地区以及华北地区,另外还包括云南省的中部和南部以及青藏高原的中部地带;其中极显著负相关的区域占总植被面积的 0.66%,主要集中在云南省的南端。而正相关关系的区

域占我国植被总面积的 30.84%,主要分布在内蒙古中部地区、辽河平原地区、云贵高原地区、青藏高原东部以及甘肃省的大部分地区,其中极显著和显著正相关的区域占总植被面积的 2.93%,主要集中分布在青藏高原、云贵高原以及甘肃小陇山地区。根据统计分析,全国植被 CUE 与气温的平均相关系数为 0.25。

不同植被类型 CUE 对降水和气温的响应也有明显的差异(图 7)。本文统计不同植被类型 CUE 与气温降水的平均相关系数(图 7A),就森林而言,森林 CUE 与降水和气温的相关系数分别为 0.33,0.21,表明森林 CUE 受降水影响更为明显。与森林 CUE 一样,农田 CUE 对降水的响应较气温更加敏感。关于草地和灌丛,草地 CUE 与气温、降水的相关系数分布为 0.28,0.24,灌丛 CUE 与气温和降水的相关系数分别为 0.27,0.23,表明草地及灌丛 CUE 与降水的相关系数均小于其与气温的相关系数,说明这两种植被类型 CUE 的变化主要受气温控制。对不同植被 CUE 和气象因子相关系数的显著性面积百分比进行

统计(图 7B),结果表明,农田和灌丛区域中,CUE 与气温达到极显著或显著正相关的面积分别占全国植被面积的 0.42%和 0.35%;而森林和草地 CUE 与气温达到显著水平的区域面积占总植被面积的比例均较小。就 CUE 与降水相关性而言,森林 CUE 与降水呈显著正相关的区域占总植被面积的 1.74%,而灌丛 CUE 与降水的相关性达到显著水平的面积比例最小。

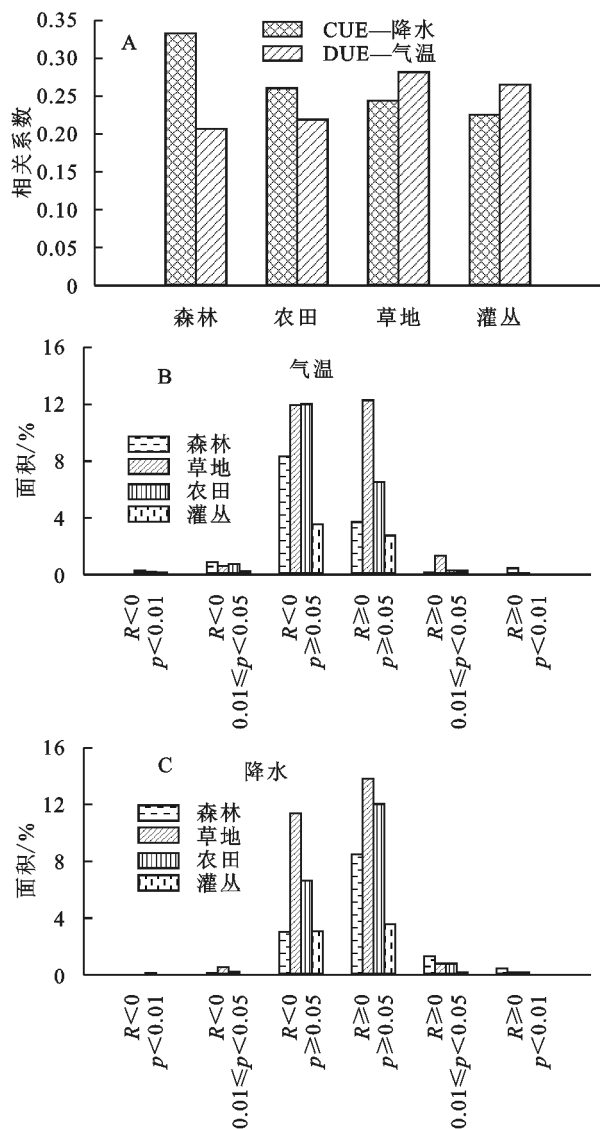


图 7 不同植被类型 CUE 与气温降水的相关性

3 讨论

安相等^[3]研究了东亚地区植被 CUE 的空间变异特征及其影响因素,认为降水是影响草地 CUE 的主要因素。本研究表明,草地分布区降水总体上均呈现出增加趋势,而气温则主要表现为降低趋势,因而促使该部分区域植被 CUE 相对较高。同时,研究发现草地及农田的植被 CUE 相对较高,而森林及灌丛的 CUE 则相对较低,该结果与 Zhang 对全球植被 CUE 的研究一致,他发现草地生态系统的 CUE 明显高于

森林及灌丛等植被类型^[22]。原因可能是草地不像森林灌丛一样在自身茎和树干上存在较大的水体阻力,因而其光合速率及生产力相对于其他植被类型较高,从而使其具有更高的 CUE^[23]。

本研究发现,2000—2007 年我国植被 CUE 呈现出波动降低的变化趋势,而 2007—2013 年植被 CUE 则表现为显著增加的变化趋势,该特征恰好与气温降水的年际变化特征相吻合,即 2000—2007 年降水不断减少而气温不断增高,因而导致植被 CUE 的降低,而 2007 年之后降水和气温则均表现为相反的趋势,气温降水格局的改变,从而引起植被 CUE 的上升。同样的结果可以在 Zhang 等的研究中发现,他的结果表明植被 CUE 与气温降水的变化有很大关系^[9]。同时,我们发现植被 CUE 较高的地区,其变异系数相对较低,植被 CUE 的变化状态相关比较稳定,且大多数地区植被类型主要以草地为主。本研究发现森林及农田 CUE 对降水的敏感性强于气温,而草地和灌丛 CUE 则更易受气温影响,主要源于不同生物群落自身的生物及生态学特性有很大差异^[24]。综合以上分析,植被 CUE 的变化除了受气候变化影响,同时与植被类型的分布、生物学特性有很大关系。

不同的水热组合状况,除了引起植物群落的组成差异,还会对植被的光合作用、呼吸作用及生产活动产生重要影响^[24]。我国绝大多数地区植被 CUE 与降水呈正相关,而与气温呈现负相关关系,表明在全国尺度内,植被 CUE 的增长主要受降水控制。该结果与 Yang 等^[8]对全球草地 CUE 对气候变化响应的研究结果一致。具体上看来,植被 CUE 与降水呈显著正相关的区域主要集中在东北大兴安岭及呼伦贝尔地区,而该部分区域的植被 CUE 与气温则呈显著的负相关。研究表明该部分区域的植被 CUE 在 2000—2013 年呈现出增加的趋势,降水呈现出增加趋势,而气温则表现为降低的趋势,表明降水的增加利于植被 CUE 的增加,而气温的增加则会导致植被 CUE 降低。Zhang 等^[9]研究了全球植被 CUE 对气候变化的响应,发现在全球尺度范围内,降水的增多有利于植被 CUE 的增加,而气温的升高会导致 CUE 的减少。该研究结果与我们的结果一致。原因可能是气温升高会促使植被的呼吸作用增强、植物的气孔关闭等活动,进而降低了碳吸收,且将导致植被异氧呼吸增强,最终会导致植被 CUE 的降低^[25];而降水的增加,将会减弱植物的根系活力与根系呼吸,尤其在干旱地区,则会引起植被 CUE 的升高^[26]。本研究发现植被 CUE 在云贵高原及青藏高原的部分地区与气温呈现出显著的正相关关系,而与降水则呈负相

关或不显著正相关。原因可能是该部分地区太阳辐射较强,气温的升高能够促进植被光合作用的增强,进而促进植被对大气碳的吸收,而降雨的增加则会影响太阳辐射,抑制光合作用^[27]。

4 结论

(1) 全国植被年 CUE 在研究年限内总体上表现为轻微的增长趋势,具体表现为在 2000—2007 年以 0.000 6 的变化率呈现波动下降的趋势,而 2007—2013 年植被 CUE 呈现显著上升的变化趋势。

(2) 植被 CUE 空间分布具有明显的空间异质性,大体呈现西部高东部低的状态。植被 CUE 大于 0.6 的区域主要分布在秦巴山区、四川盆地、青藏高原南端等地;而植被 CUE 低于 0.15 的地区集中分布在青藏高原的中西部地区。CUE 增加较明显的区域主要分布在内蒙古呼伦贝尔地区,青藏高原大部分地区,东部沿海地区以及台湾岛。而 CUE 呈减少趋势的区域主要包括东北平原及华北华中的大部分地区,另江南地区及新疆部分地区也有零星分布。不同植被类型的 CUE 均值表现为:草地(0.21)>农田(0.14)>森林(0.09)>灌丛(0.06)。

(3) 全国大多数地区植被 CUE 与降水呈正相关,而与气温则呈负相关,而这种相关性会随着区域气候格局及植被类型的变化而变化。森林及农田 CUE 对降水的响应更加敏感,而草地和灌丛 CUE 则更易受气温变化影响。总体上,全国植被 CUE 的增加主要归因于全国降水量的增加,而气温的升高则对植被 CUE 产生抑制作用。

参考文献:

- [1] Chen Y, Mu S, Sun Z, et al. Grassland carbon sequestration ability in China: A new perspective from terrestrial aridity zones[J]. *Rangeland Ecology & Management*(Elsevier Science), 2016, 69(1): 84-94.
- [2] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 等. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1028-1039.
- [3] 安相, 陈云明, 唐亚坤. 东亚森林、草地碳利用效率及碳通量空间变化的影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 79-87.
- [4] 袁旻舒, 李明旭, 程红岩, 等. 基于 CMIP5 模型结果的中国陆地生态系统未来碳利用效率变化趋势分析[J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(4): 452-461.
- [5] Zhang Y. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 261-274.
- [6] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [7] Heinsch F A, Zhao M, Running S W, et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations[J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1908-1925.
- [8] Gang C, Wang Z, Zhou W, et al. Assessing the spatio-temporal dynamic of global grassland water use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2015, 202(5): 343-354.
- [9] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(2): 144-155.
- [10] Gang C, Wang Z, Chen Y, et al. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 788-797.
- [11] Khalifa M, Elagib N A, Ribbe L, et al. Spatio-temporal variations in climate, primary productivity and efficiency of water and carbon use of the land cover types in Sudan and Ethiopia[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 790-806.
- [12] Campioli M, Gielen B, Ckede M G, et al. Temporal variability of the NPP-GPP ratio at seasonal and interannual time scales in a temperate beech forest[J]. *Bio-geosciences*, 2011, 8(9): 97-106.
- [13] 王林林. 柴达木盆地 GPP 时空变化特征及其影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [14] Gong W, Wang L, Lin A, et al. Evaluating the monthly and interannual variation of net primary production in response to climate in Wuhan during 2001 to 2010[J]. *Geosciences Journal*, 2012, 16(3): 347-355.
- [15] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 等. 1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4335-4345.
- [16] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 397-405.
- [17] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 15-30.
- [18] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [19] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.

- [20] 袁沫汐,邹玲,林爱文,等.湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2016,36(17):5315-5323.
- [21] 李晓荣,高会,韩立朴,等.太行山区植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析[J].中国生态农业学报,2017,25(4):498-508.
- [22] Zhang Y J, Xu M, Chen H, et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2010,18(3):280-290.
- [23] Nakano T, Nemoto M, Shinoda M. Environmental controls on photosynthetic production and ecosystem respiration in semi-arid grasslands of Mongolia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008,148(10):0-1466.
- [24] Gang C, Zhou W, Wang Z, et al. Comparative Assessment of Grassland NPP Dynamics in Response to Climate Change in China, North America, Europe and Australia from 1981 to 2010[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2015,201(1):57-68.
- [25] Chambers J Q, Tribuzy E S, Toledo L C, et al. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency[J]. *Ecological Applications*, 2004,14(S):72-88.
- [26] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, et al. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status[J]. *Tree Physiology*, 1996,16(3):333-343.
- [27] Lin X, Han P, Zhang W, et al. Sensitivity of alpine grassland carbon balance to interannual variability in climate and atmospheric CO₂ on the Tibetan Plateau during the last century [J]. *Global and Planetary Change*, 2017,154:23-32.

~~~~~

(上接第 277 页)

- [10] Feng Y, Cui N, Zhao L, et al. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,536:376-383.
- [11] 张薇,霍树义,贾悦.机器学习模型在河北省参考作物蒸散量计算中的比较[J].节水灌溉,2018(4):50-53,58.
- [12] 李翊.都江堰灌区空间信息技术应用现状与需求分析[J].中国农村水利水电,2015(12):30-34.
- [13] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业工程学报,2016,32(6):130-138.
- [14] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using large-scale parameters [J]. *Monthly Weather Review*, 1972,100(2):81-92.
- [15] Makkink G F. Testing the Penman Formula by means of lysimeters[J]. *Instit. Water Engineers*, 1957,11:277-288.
- [16] Hoffman G J, Howell T A. Management of Farm Irrigation Systems[M]// *Management of farm irrigation systems*. American Society of Agricultural Engineers, 1990.
- [17] 冯禹,崔宁博,龚道枝,等.基于极限学习机的参考作物蒸散量预测模型[J].农业工程学报,2015,31(S1):153-160.
- [18] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [19] 李菲菲,饶良懿,吕琨珑,等. Priestley-Taylor 模型参数修正及在蒸散发估算中的应用[J].浙江农林大学学报,2013,30(5):748-754.
- [20] 符娜,宋孝玉,夏露,等.云南省不同生态水文分区参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业机械学报,2017,48(5):208-217.
- [21] 刘晓英,林而达,刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J].农业工程学报,2003,19(1):32-36.
- [22] 左德鹏,徐宗学,程磊,等.基于辐射的潜在蒸散量估算方法适用性分析[J].干旱区地理,2011,34(4):565-573.
- [23] 邓艾东,赵力,包永强.粒子群优化小波神经网络用于碰摩声发射源定位[J].中国电机工程学报,2009,29(32):83-87.
- [24] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C H. Extreme learning machine: theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006,70(1/2/3):489-501.
- [25] 王少福,张金磊,赵仕俊,等.广义回归神经网络的改进及在预测控制中的应用[J].微电子学与计算机,2009,26(6):32-35.