

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第24期 Vol.33 No.24 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 24 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 赵其国, 黄国勤, 马艳芹 (7615)
- 《生态学基础》: 对生态学从传统向现代的推进——纪念 E.P. 奥德姆诞辰 100 周年
..... 包庆德, 张秀芬 (7623)
- 食物链长度理论研究进展 张 欢, 何 亮, 张培育, 等 (7630)

个体与基础生态

- 天山盘羊夏季采食地和卧息地生境选择 李 叶, 余玉群, 史 军, 等 (7644)
- 松果梢斑螟对虫害诱导寄主防御的抑制作用 张 晓, 李秀玲, 李新岗, 等 (7651)
- 菹草附着物对营养盐浓度的响应及其与菹草衰亡的关系 魏宏农, 潘建林, 赵 凯, 等 (7661)
- 濒危高原植物羌活化学成分与生态因子的相关性 黄林芳, 李文涛, 王 珍, 等 (7667)
- 四年 O₃ 熏气对小麦根际土壤氮素微生物转化的影响 吴芳芳, 郑有飞, 吴荣军, 等 (7679)
- 重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 胁迫下泥蚶消化酶活性的变化 陈肖肖, 高业田, 吴洪喜, 等 (7690)

种群、群落和生态系统

- 不同生境中橘小实蝇种群动态及密度的差异 郑思宁 (7699)
- 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征 李忠文, 闫文德, 郑 威, 等 (7707)

景观、区域和全球生态

- 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性 王绍强, 陈蝶聪, 周 蕾, 等 (7715)
- 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系 李海东, 沈渭寿, 蔡博峰, 等 (7729)
- 高精度遥感影像下农牧交错带小流域景观特征的粒度效应 张庆印, 樊 军 (7739)
- 高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化 蔡晓布, 于宝政, 彭岳林, 等 (7748)
- 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性
..... 武小钢, 郭晋平, 田旭平, 等 (7756)
- 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征 孙伟军, 方 晰, 项文化, 等 (7765)
- 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响 姜义亮, 郑粉莉, 王 彬, 等 (7774)
- 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等 (7782)
- 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价 杨尚东, 吴 俊, 谭宏伟, 等 (7788)
- 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等 (7798)
- 庐山森林景观格局变化的长期动态模拟 梁艳艳, 周年兴, 谢慧玮, 等 (7807)

暖温带-北亚热带生态过渡区物种生境相关性分析 袁志良,陈云,韦博良,等 (7819)
不同生境和去趋势方法下的祁连圆柏径向生长对气候的响应 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等 (7827)

资源与产业生态

大小兴安岭生态资产变化格局 马立新,覃雪波,孙楠,等 (7838)
生态环境移动数据采集系统研究与实现 申文明,孙中平,张雪,等 (7846)

城乡与社会生态

城市遥感生态指数的创建及其应用 徐涵秋 (7853)

研究简报

大明竹属遗传多样性 ISSR 分析及 DNA 指纹图谱研究 黄树军,陈礼光,肖永太,等 (7863)
干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价 卢广超,许建新,薛立,等 (7872)
基于 ITS2 和 16S rRNA 的西施舌群体遗传差异分析 孟学平,申欣,赵娜娜,等 (7882)
两种浒苔无机碳利用对温度响应的机制 徐军田,王学文,钟志海,等 (7892)
北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响 史宇,余新晓,张建辉,等 (7898)

学术信息与动态

景观生态学研究:传统领域的坚守与新兴领域的探索——2013 厦门景观生态学论坛述评
..... 杨德伟,赵文武,吕一河 (7908)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说:黄土丘陵农牧交错带——黄土丘陵是中国黄土高原的主要地貌形态,由于黄土质地疏松,加之雨季集中,降水强度较大,地表流水冲刷形成很多沟谷,斜坡所占的面积很大。这里千百年来的农牧交错作业,地表植被和生态系统均遭受了严重的破坏。利用高精度影像对小流域景观的研究表明,这里耕地、林地和水域景观相对比较规则简单,荒草地和人工草地景观比较复杂。农牧交错带小流域景观形态具有分形特征,各类景观斑块的分维数对粒度变化的响应不同,分维数随粒度的增大呈非线性下降趋势。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208291219

王绍强,陈蝶聪,周蕾,何洪林,石浩,闫慧敏,苏文.中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性.生态学报,2013,33(24):7715-7728.

Wang S Q, Chen D C, Zhou L, He H L, Shi H, Yan H M, Su W. Assessing the spatial representativeness of eddy covariance flux observation stations of terrestrial ecosystems in China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7715-7728.

中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性

王绍强¹, 陈蝶聪^{1,2,*}, 周蕾¹, 何洪林¹, 石浩¹, 闫慧敏¹, 苏文¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 涡度相关技术是测定大气与陆地生态系统之间 CO₂ 交换、水分和能量通量最直接的方法, 可用于研究土壤、植被与大气间的 CO₂ 交换及其调控机制。收集了 11 个影响净碳交换量的主要变量信息, 包括气象因素、土壤因素和地形因素的非生物因子、实际植被状态以及植被生产力, 采用多元地理变量空间聚类分析方法, 绘制出不同聚类数 (25、50、75、85、100、150 和 200 类) 的通量生态区。结合中国现有通量观测站点的空间分布格局, 与新生成的通量生态区和已有的自然地理区划进行对比分析, 发现由于中国地形复杂, 生态系统类型多样, 现有 85 个涡度相关通量观测站点仅能刻画部分中国生态系统类型的净碳交换量时空特征, 通量生态区划分为 100—150 类比较合适。考虑到涡度相关通量观测运行成本, 通量站点可增加至 150 个, 从而使得优化后的通量观测网络能够代表中国主要类型的生态系统, 并且有利于通量观测数据与遥感资料的有效结合, 提高碳水通量观测从站点扩展到区域尺度的精度, 从而更好地检验过程机理模型的模拟结果。

关键词: 涡度相关通量; 生态区; 多元地理变量; 空间聚类

Assessing the spatial representativeness of eddy covariance flux observation stations of terrestrial ecosystems in China

WANG Shaoqiang¹, CHEN Diecong^{1,2,*}, ZHOU Lei¹, HE Honglin¹, SHI Hao¹, YAN Huimin¹, SU Wen¹

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences & Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Eddy covariance (EC) technique is the most direct way to measure the exchanges of carbon dioxide (CO₂), water vapor, and energy flux between terrestrial ecosystems and atmosphere, which can be used to explore CO₂ exchanges between terrestrial ecosystems and atmosphere and its controlling mechanism. In this paper, we used the multivariate geographic clustering approach to generate flux-ecoregions with different clustering number (25, 50, 75, 85, 100, 150, 200 clusters) in China based on 11 variables affecting carbon flux, including meteorological factor, soil factor, abiotic factor of topography, actual vegetation (Leaf area index (LAI) and Enhanced vegetation index (EVI)) and vegetation productivity variables (Gross primary productivity, GPP). Based on the spatial distribution pattern of the existing flux observation stations in China and the comparative analysis between newly generated flux ecoregions and the existing geographical regionalization, the results showed that the existing 85 eddy covariance flux observation stations in China cannot reflect the spatial and temporal characteristics of carbon flux of all ecosystems because of the country's complex topography and the

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题资助项目 (XDA05050602); 国家 973 计划资助项目 (2010CB833503); 中国科学院青年人才资助项目 (KZCX2-YW-QN301)

收稿日期: 2012-08-29; 修订日期: 2013-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ccong16@163.com

diverse ecosystem types. It is also recommended that the number of the flux-ecoregions be 100—150. Considering the building and operating costs of the flux towers, the number of eddy flux tower stations can be added to 150 sites. Thus, the optimized flux network is supposed to represent major ecosystems and facilitate the integration of flux and remote sensing data, consequently, improve the accuracy of upscaling CO₂ and water vapor flux observations from tower to regional scales to better exam the simulation result of the process based ecosystem model.

Key Words: eddy covariance carbon flux; ecoregion; multivariate geographic clustering; spatial clustering

涡度相关技术是测定大气与生态系统之间 CO₂ 交换、水分和能量通量最直接的方法,所提供的数据越来越多地被用作区域性和全球性陆地生态系统和大气间 CO₂、水、能量交换的分析依据^[1]。全球先后建立了 500 多个基于涡度相关技术的通量观测站点,形成全球性和区域性的通量观测网络(Fluxnet)^[2],包括美国通量网(AmeriFLUX)、欧洲通量网(CarboEurope)、亚洲通量网(AsiaFlux)、中国通量网(ChinaFLUX)等共 42 个国家、23 个区域性通量研究网络^[3]。由于通量站点构成的网络本身从未经过正式设计,新增通量观测塔的选址并没有严格地落在整个网络中碳水通量空间代表性较弱的区域,而只是根据建站可行性和经验性判断,并不一定能很好地监测特定区域范围内所有生态系统类型的通量变异特征^[2]。同时,通量塔测量值仅仅代表贡献区尺度的通量,还需要通过尺度扩展方法,应用到区域、国家、洲际或全球尺度来量化陆地生物圈和大气间的通量净交换量^[4]。近几年国外在涡度相关通量尺度扩展方面取得了较大的进展^[5-6],有 7 个区域性通量观测研究网络对尺度扩展进行了研究,研究内容包括:(1)评价通量网络的代表性^[2];(2)站点尺度的通量如何扩展到更大的空间尺度^[7-8];(3)研究区域、洲际或全球通量的幅度、分布和年际变化^[7-8];(4)评估空间异质性和参数变异性对通量估算的影响^[7,9-10]。因此,通量观测数据从站点到区域的尺度扩展,需要首先评价通量观测站点的空间代表性,才能用于区域尺度的生态系统和大气碳水通量交换的时空格局分析。

国外已有科学家对美国通量网和欧洲通量网的代表性开展了定量分析评价^[2,11]。例如,Hargrove 等^[11]研究了美国通量网实际设计对通量观测数据分析的影响,确定美国通量网现有涡度通量塔对整个美国大陆通量环境的代表性程度。Sulkava 等^[2]提出一种网络设计量化方法(Quantitative network design, QND),用来评价现有网络的代表性,通过增加或移除观测站点来优化网络,合理设计使新的通量网络达到最优化。因此,结合多元统计理论和空间分析技术^[12],使得生成的每个生态区内的碳通量都具有相似的影响因素,从而有助于定量表达通量塔代表的空间格局。

中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)于 2002 年建成,最初拥有 8 个微气象和 16 个箱式/气相色谱法观测站,对农田、草地、森林和水体等典型生态系统与大气间 CO₂、水汽、能量通量进行长期观测研究,带动了我国涡度相关通量观测研究的迅速发展^[3]。近几年来,我国科研和教育机构相继在国内建立了一批涡度相关通量观测站点,全国通量观测站达到 85 个,弥补了 ChinaFLUX 观测站在我国生态系统空间分布和植被类型代表性上的不足,增强了我国通量观测研究的实力。但是,中国通量观测站点的建设和其他国家的网络建设相似,基本上是依托已有野外台站上进行建设的,覆盖了主要气候区内重要的土地利用类型,然而并没有完全考虑植物、土壤、地形和环境的多样性、干扰和管理措施等的因素,作为一个整体来监测区域尺度生态系统碳通量变异缺乏系统的评价。

目前中国对通量站点代表性的研究更多的是利用风浪区模型^[13],结合实际观测数据,对密云^[14]、黑河流域^[15]等通量观测站点的空间代表性进行初步分析。由于中国地形复杂,经纬度跨度较大,生态系统类型多样,景观破碎化较严重,现有的通量观测站点仅能反映中国部分生态系统碳通量的空间分布特征。因此,通过对现有观测站点空间代表性程度的定量分析评价,提出我国陆地生态系统通量站点的合理布局,从而使得优化后的通量网络能够代表大部分或主要类型的生态系统,有利于通量数据与遥感资料有效结合,提高碳水通量观测从站点扩展到区域尺度的精度。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 数据来源

本文收集了中国大陆和台湾地区的涡度相关通量观测站点信息(附表 1),按照站点的不同属性如所在省份、所属部门和生态系统类型等分类统计,绘制现有通量观测站点的空间分布图,为通量生态区的划分判定提供依据。

通量是生态系统碳循环中最为重要的特征参数之一,进行陆地生态系统碳通量的生态区划时,主要选择影响植物光合作用的因素作为变量^[16]。涡度相关通量塔所观测到的是净生态系统 CO₂ 交换量(Net ecosystem exchange, NEE, 本文中简称碳通量),本文收集了 11 个与生态系统碳通量最为相关的变量,数据空间分辨率 1 km×1 km,时间分辨率为年,包括气象因素、土壤因素和地形因素的非生物因子,以及实际植被状态、植被生产力的生物因子。气象资料来自中国生态系统研究网络(CERN)数据库,包括 1970—2000 年 30a 平均气温(TEM)、降水量(PRE)、太阳辐射(RAD)和年日照时数(SUN);地形因素选择 1:100 万的数字高程模型(DEM);土壤数据包括 20 世纪 80 年代土壤普查数据得到的土壤有机碳(SOC)和土壤氮含量(STN);实际植被状况数据包括 MODIS 反演得到的 2006—2008 年平均叶面积指数(LAI)、2005 年增强型植被指数(EVI)以及来自中国生态系统研究网络(CERN)数据库的 1970—2000 年平均光合有效辐射(PAR);参照欧洲通量网代表性评价中采用总初级生产力(GPP)作为评价指标^[2],本文采用 BEPS 模型模拟得到的 1990—2000 年年均 GPP 作为植被生产力变量。所选变量数据大部分为多年平均值,尽管在时间尺度上无法完全统一,但是也能反映碳通量影响因素的平均状况和趋势。

1.2 数据处理

1.2.1 标准化处理

所有的输入数据都统一了坐标系和投影格式(Albers 投影,南标准纬度线为 25°N,北标准纬度线为 47°N,中央经线为 110°E),并生成空间分辨率为 1 km×1 km 的栅格数据(行列数为 4888×4000)。由于不同的地图图层测量单位的差异会直接影响聚类算法的结果^[11],因此在聚类运算之前所有的变量图层都必须进行标准化处理。首先统计每个输入图层所有像元的最大值和最小值,每个像元减去该变量图层的最小值后除以最大值与最小值的差值,从而使每个变量图层的像元值都归一化为 0—1 之间(图 1),所有变量图层采用统一的图例,剔除各个变量数量级的差异所导致的聚类误差。

1.2.2 相关性分析

利用 ARCGIS 的空间相关性分析模块对选取的 11 个输入变量进行两两相关性分析。根据相关性矩阵(表 1)可以看出,土壤有机碳与土壤氮含量相关系数达 90%,本文没有随意剔除其中一个,因为有可能 10%的不相关中含有额外的信息能用来区分碳通量差异显著的两个地区^[11],所以,所选取的 11 个变量全都保留用于聚类运算。

1.2.3 主成分分析

主成分分析(PCA)是将原来众多的变量重新组合成一组新的互相无关的综合变量,同时根据实际需要,从中取出几个较少的综合变量尽可能多地反映原来变量信息的统计方法。对 11 个已作相关性分析的聚类输入变量进行主成分分析,计算特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 11)$ 并按从大到小顺序排列,分别计算主成分贡献率和累计贡献率。一般来讲,为了达到降维的目的,只提取前几个主成分,由于第一、第二、第三主成分的累计贡献率达到 86.68%(表 2),根据累计贡献率大于 85%的原则^[17],故选取前三个主成分,用 3 个新变量 PC1、PC2、PC3 来代替原来的 11 个变量。

1.3 多元空间地理聚类

空间聚类分析是将地理空间实体或地理单元集合依照某种相似性度量原则划分为若干个类似地理空间实体或地理单元组成的类或簇的过程,类中实体或单元彼此间具有较高相似性,类与类之间的实体或单元具有较大差异性,是空间数据挖掘的重要组成部分^[18-19]。本文使用 ENVI 软件的非监督分类中的 K-means

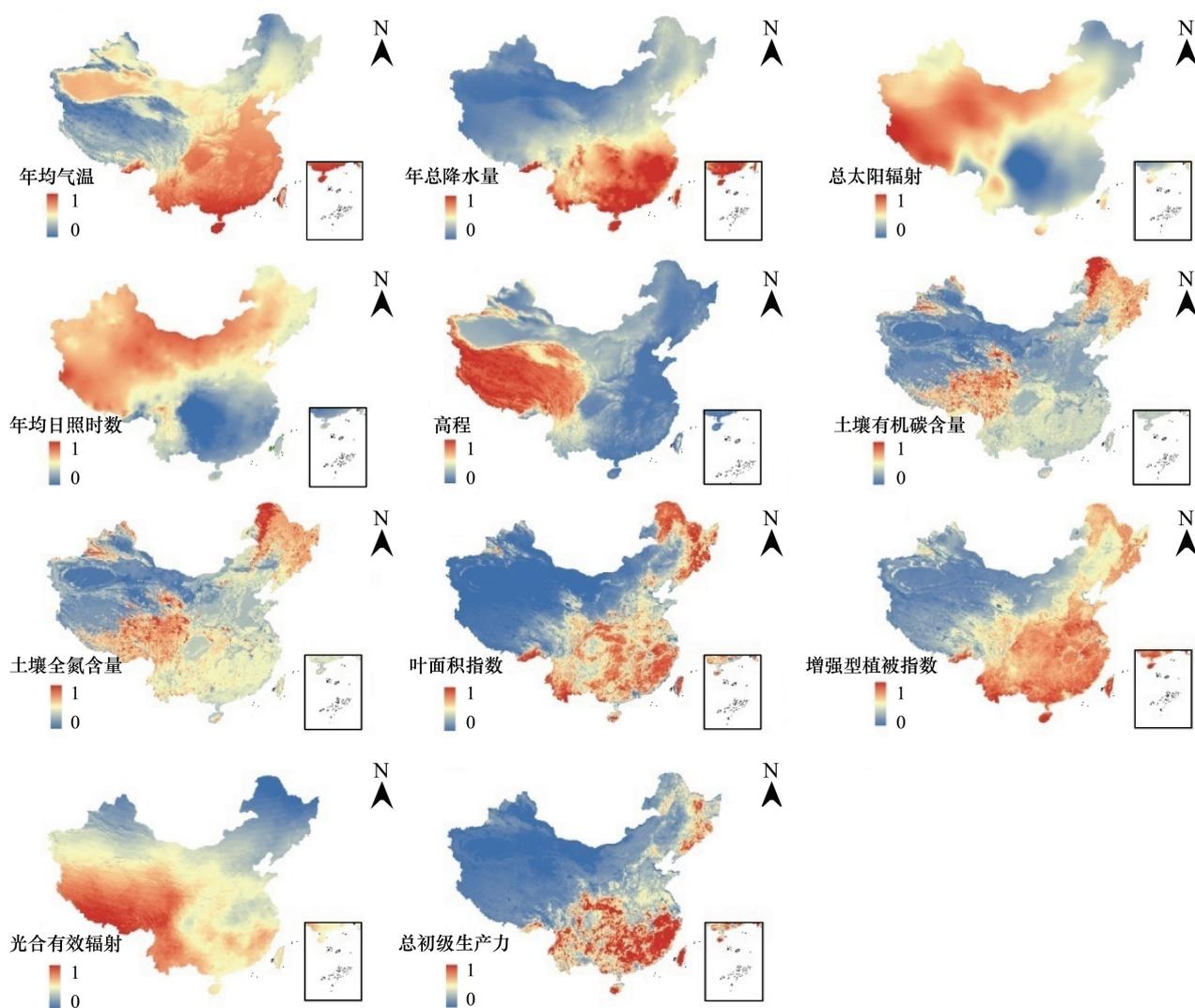


图 1 11 个经过标准化的聚类图层
Fig. 1 11 standardized clustering layers

表 1 11 个输入变量的相关性矩阵

Table 1 Correlation matrix of 11 input layers

	TEM	PRE	RAD	SUN	DEM	SOC	STN	LAI	EVI	PAR	GPP
TEM	1.00										
PRE	0.65	1.00									
RAD	-0.55	-0.70	1.00								
SUN	-0.67	-0.87	0.88	1.00							
DEM	-0.72	-0.38	0.63	0.44	1.00						
SOC	-0.17	0.21	-0.29	-0.19	0.04	1.00					
STN	-0.10	0.29	-0.35	-0.27	0.00	0.94	1.00				
LAI	0.41	0.70	-0.69	-0.68	-0.44	0.37	0.43	1.00			
EVI	0.58	0.81	-0.74	-0.78	-0.51	0.34	0.42	0.85	1.00		
PAR	-0.01	0.17	0.30	-0.08	0.65	-0.05	-0.02	-0.13	-0.05	1.00	
GPP	0.52	0.79	-0.64	-0.72	-0.38	0.19	0.26	0.71	0.72	0.04	1.00

TEM: 年均气温 temperature, PRE: 年总降水量 precipitation, RAD: 年总太阳辐射 radiation, SUN: 年均日照时数 sunshine hours, DEM: 高程 Digital elevation model, SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon, STN: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen, LAI: 叶面积指数 Leaf area index, EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation index, PAR: 光合有效辐射 Photosynthetic active radiation, GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity

表 2 特征值及主成分贡献率、累计贡献率

Table 2 Eigen values, principal component contribution rate and cumulative contribution rate

主成分 Principal component	特征值 Eigen values	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	0.09696	63.82	63.82
2	0.02104	13.85	77.67
3	0.01369	9.01	86.68
4	0.00763	5.02	91.71
5	0.00438	2.88	94.59
6	0.00365	2.40	96.99
7	0.00222	1.46	98.45
8	0.00137	0.90	99.35
9	0.00056	0.37	99.72
10	0.00024	0.16	99.88
11	0.00018	0.12	100

$$\text{贡献率}(\%) = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^{11} \lambda_k} \times 100, \text{累计贡献率}(\%) = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^{11} \lambda_k} \times 100$$

算法,来实现空间聚类(图 2)。非监督分类即在多光谱图像中搜寻,定义其自然相似光谱集群组的过程,其中不需要人工选择训练样本,仅需极少的人工初始输入,计算机按照一定规则自动地根据像元光谱或空间等特征组成集群组,然后分析者将每个组和参考数据比较,将其划分到某一类别中去,主要有 K-means 算法和 ISODATA 算法^[20]。

K-means 算法在空间聚类各算法中一直处于核心地位,是由 MacQueen 于 1967 年提出的,在目前的聚类分析中应用最为广泛,具有算法简单且收敛速度快的特点^[21]。本研究中采用 K-means 算法作为多元空间地理聚类的算法,把与碳通量相关的生物与非生物因子作为空间地理聚类的输入因子,随机在所有图层选择 k 类中心,每个聚类中心拥有 11 个变量,随后剩余的每个栅格,根据其自带的 11 个变量的值计算与 k 类聚类中心的距离,并根据最近距离原则赋值给最近的聚类中心。聚类中心及其属于该聚类中心的栅格重新计算新的聚类中心,不断重复这个过程,直到准则函数收敛^[22]。

K-means 算法具体步骤:

(1) 选 K 个初始聚类中心, $z_1(k), z_2(k), \dots, z_k(k)$, 其中 k 为迭代运算的次序号,初始时 $k=1$ 。

(2) 逐个将模式样本 x 按最小距离准则分配给 K 个聚类中心中的某一个 $z_j(k)$,

$$j = \arg \min \|x - z_i(k)\|^2 \quad (1)$$

(3) 计算新的聚类中心, $z_j(k+1)$, $1 \leq j \leq K$,

$$z_j(k+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j(k)} x \quad (2)$$

式中, N_j 为第 j 个聚类域 S_j 中所包含的样本个数。

(4) 设 e 为迭代误差阈值,可根据需要设置,若

$$|z_j(k+1) - z_j(k)| < e \quad (3)$$

则迭代结束,否则 $k = k + 1$, 返回(1)。

1.4 通量生态区的代表性评价

生态区划是在对生态系统客观认识和充分研究的基础上,应用生态学原理和方法,结合地理学、气候学、土壤学、环境科学和资源科学等多个学科的知识,揭示自然生态区域的相似性和差异性规律,以及人类活动对

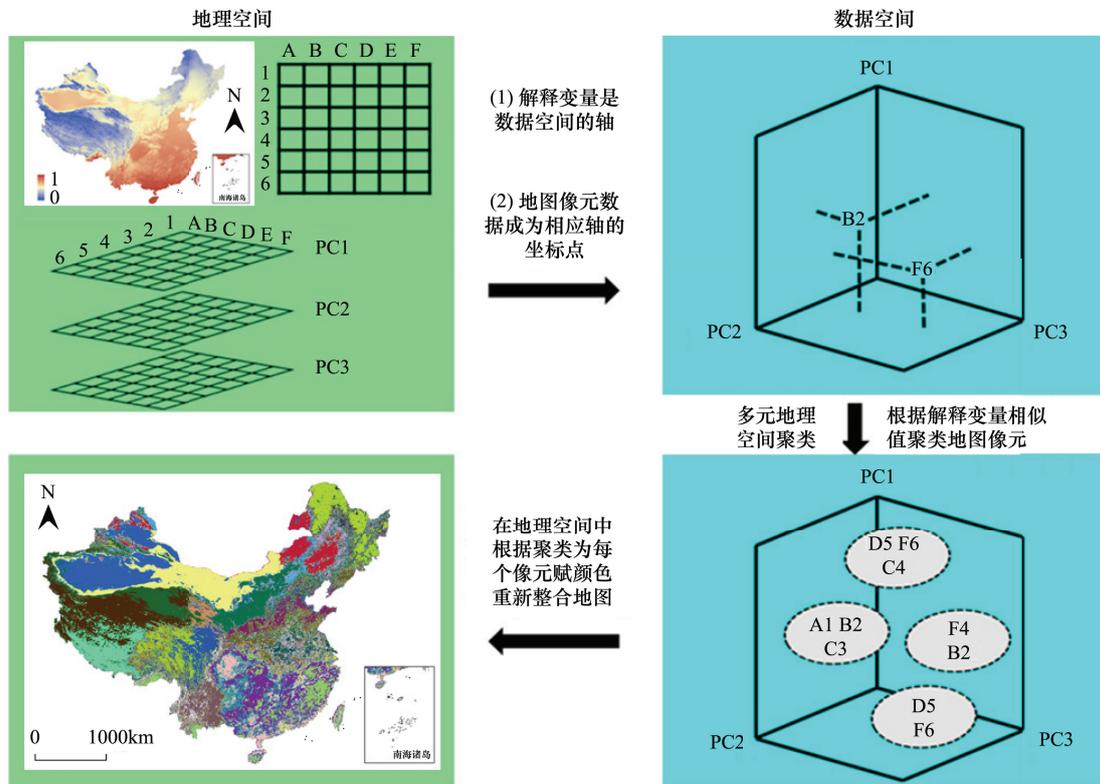


图2 多元空间地理聚类方法示意图

Fig.2 Diagram of multivariate geographic clustering approach

生态系统干扰的规律,从而进行整合和分异,划分生态环境的区域单元^[23-24]。傅伯杰等^[25-26]根据我国的气候、地貌、地形、生态系统特点以及人类活动规律等特征,将我国划分为3个生态大区、13个生态地区、57个生态区。Williams等^[27]利用多元地理聚类法,从影响通量变化的气候、地形和土壤等16个因子中挑选出最重要的3个因子,通过主成分分析法进行聚类运算,绘制了美国爱荷华州的农业生态区划分布图。与生态区划相类似,通量生态区划是根据与生态系统碳通量相关的环境变量的综合影响,综合分析各个要素或变量的空间分异特征、结构组合和区域分布对通量的影响。通量生态区内部的气象因素、土壤因素和地形因素的非生物因子,以及实际植被状态、植被生产力的生物因子具有高度的相似性,不同的通量生态区能够反映区域间碳通量的差异。利用多元地理聚类分析方法对每个像元进行空间聚类,得到不同聚类数(25类、50类、75类、100类、150类和200类)的通量生态区。根据中国现有通量观测站点的空间分布格局,与空间聚类得到的通量生态区进行对比叠加,综合分析现有通量站点的代表性。

2 结果分析

2.1 中国通量观测站点的现状及分析

中国现有85个通量观测站,其中包括38个森林站、17个农田站、16个草地站、7个荒漠站和7个湿地站(图3)。从站点分布图中可以看出,目前中国通量观测站点大部分分布在中国东部地区;黑河流域(甘肃、青海交界处)有8个通量站点,分布较为密集;西部高寒区和干旱区的通量站点较少,新疆只有1个阜康草地站和1个塔中荒漠站,西藏北部没有通量站点;西南地区如广西、贵州两省缺少通量塔的布设。从生态系统类型统计来看,森林站点最多,占整个中国通量站点的45%,而荒漠、湿地站点较少。

2.2 多元空间聚类通量生态区分析

本文利用多元空间地理聚类方法,分别对影响碳通量的3个主成分变量图层进行25类、50类、75类、100类、150类和200类的空间聚类运算,结果如图4所示。从图中可以看出,西北地区由于生态系统类型单一,

环境因子相似,通量生态区划的界限比较明显,不同分类数量所导致的区划间差异较小;南方地区生态系统类型错综复杂,随着聚类个数的增加,通量生态区更加破碎。因此南方地区比西北地区可能需要布设更多的通量观测站点,来反映复杂地形条件下生态系统类型的通量变化特征。

为了与 25、50、75、100、150、200 类的空间聚类运算结果进行对比分析,按照现有 85 个通量观测站点,本文还进行了 85 类通量生态区的计算。随着通量生态区数量的增加,对生态区的划分不断细化,通量生态区面积的平均值、最大值、最小值、标准差呈不同幅度的下降趋势(表 3)。随着聚类数的增加,原有的比较均质的区域由于环境因子的微小差异,被划分成更加细致的区域(图 4)。

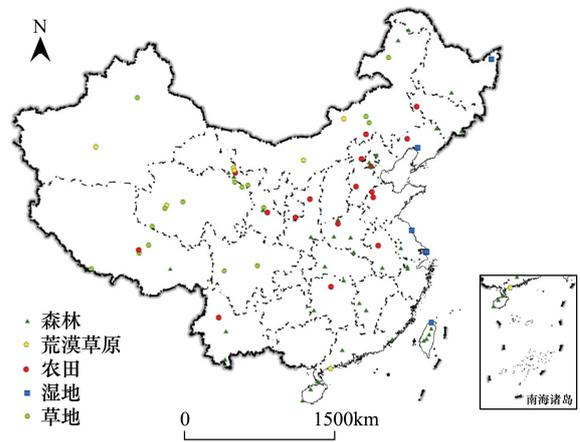


图 3 中国陆地生态系统通量观测站点的生态系统类型
Fig.3 Ecosystem types of eddy flux tower stations of terrestrial ecosystems in China

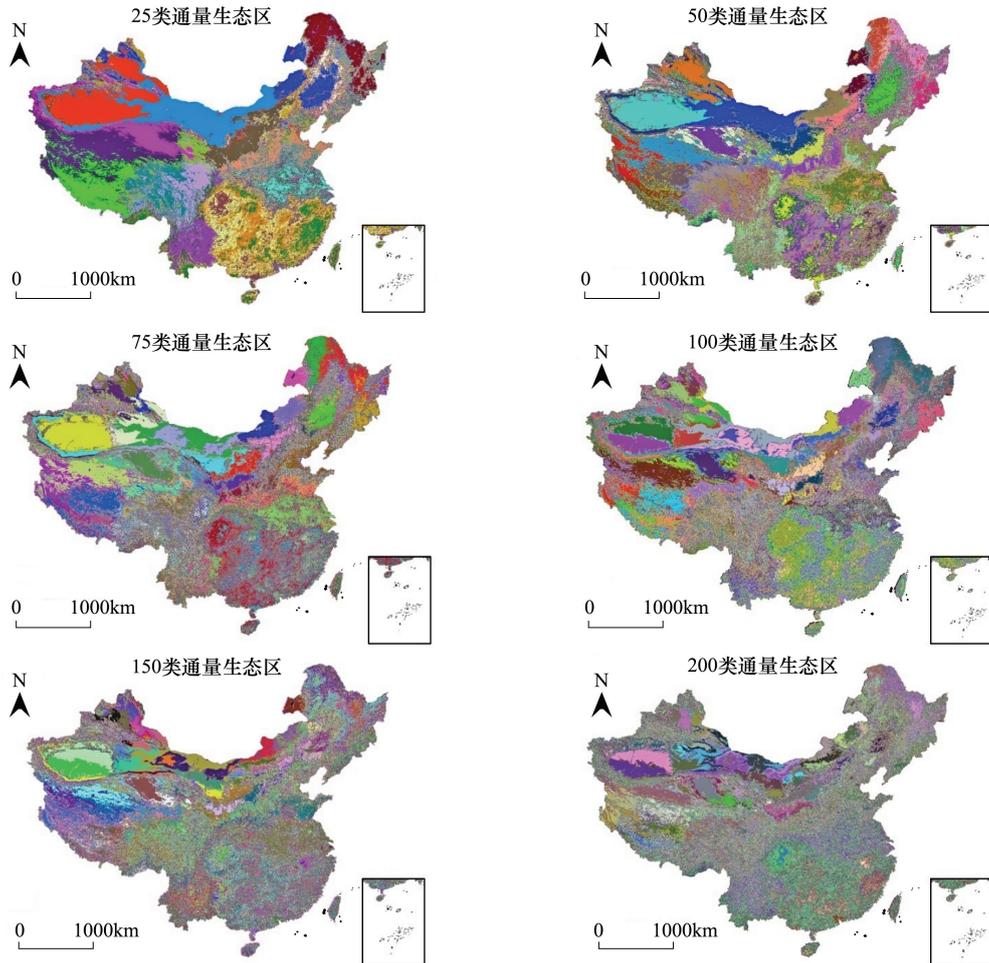


图 4 不同聚类数的通量生态区分布,颜色代表不同的生态区
Fig.4 Flux-ecoregions based on different number of clusters

将 25 类通量生态区的平均面积分别除以 25、50、75、100、150、200 类聚类的通量生态区相应的平均面积,发现通量生态区平均面积缩小的倍数与聚类数增加的倍数一致(表 3)。以表 3 中 25 类通量生态区面积的平均

均值、最大值、最小值、极差和标准差分别作为基准,通量生态区面积的平均值和标准差的缩小倍数与聚类数增加的倍数较为一致,最大值的缩小倍数落后于聚类数增加的倍数,而最小值的缩小倍数大于聚类数增加的倍数。随着通量生态区数量的增加,最小面积减小的速度明显要快于最大面积的减少,这主要是南方地区环境因子相对复杂,分类更加细化,而北方地区环境因子单一,差异相对较小。

表 3 不同聚类数的通量生态区面积
Table 3 Areas of different flux-ecoregions

通量生态区面积 Areas of flux-ecoregions	25 类 25 clusters	50 类 50 clusters	75 类 75 clusters	85 类 85 clusters	100 类 100 clusters	150 类 150 clusters	200 类 200 clusters
平均值 Mean/ $(\times 10^{11} \text{ m}^2)$	3.80	1.90	1.26	1.12	0.94	0.64	0.48
最大值 Maximum/ $(\times 10^{11} \text{ m}^2)$	8.71	4.99	3.95	3.88	3.38	1.95	1.75
最小值 Minimum/ $(\times 10^{11} \text{ m}^2)$	0.65	0.18	0.15	0.14	0.14	0.05	0.04
极差 Range/ $(\times 10^{11} \text{ m}^2)$	8.06	4.81	3.80	3.74	3.24	1.90	1.71
标准差 Standard deviation/ $(\times 10^{11} \text{ m}^2)$	2.02	1.07	0.68	0.64	0.51	0.35	0.27

2.3 现有站点与通量生态区的综合分析

基于现有通量观测站点的数量,对 3 个主成分变量图层进行了 85 类的聚类运算(图 5)。将现有通量观测站点与空间聚类得到的 85 类通量生态区叠加分析,在 85 个通量生态区中,有 51 个区含有通量观测站点,生态区覆盖率即含有通量观测站点的生态区的个数占分区个数(即聚类数)的比例为 60%,国土面积覆盖率即含有通量观测站点的生态区的面积占全国国土面积的比例为 63.2%。对 85 类通量生态区中的 51 个含有通量观测点的分区作生态区内所含站点数统计:31 个区内只含有一个站点,12 个区内含有 2 个站点,6 个区内含有 3 个站点,2 个区内含有 4 个以上的站点。因此,假设全国有 85 类生态区,目前这 85 个站点仅能代表全国 60%左右的生态系统碳通量空间特征,还有近 40%的区域需要增加通量观测站点的布设,即新增 34 个通量观测站点。

对不同聚类数的通量生态区中现有站点的覆盖情况进行统计(表 4),发现随着分区个数的增加,含有通量观测站点的生态区的个数呈增加趋势,但是现有站点的生态区覆盖率和国土面积覆盖率都在逐渐减小。85 类通量生态区的国土面积覆盖率比 75 类的高,是由于 85 类通量生态区的空间聚类是考虑了现有站点的空间分布,导致大部分站点落在面积较大的生态区,没有站点的生态区数量多而且面积较小,因而按照国土覆盖率达到 90%以上来说比 100 类通量生态区需要更多地新增站点。从 150 个通量生态区增加到 200 个时,含有通量站点的生态区个数和含有 1 个站点的生态区个数都不变,意味着聚类区的增加不再对现有 85 个通量站的空间分布有明显的区划作用了,可以将 150 作为当前通量站点数量增加的上限。

现有的 85 个通量站点在 50 类和 75 类聚类的通量生态区中,仅能覆盖 60%—67%的国土面积,说明目前 85 个站点的分布仍然不平衡,部分地区较为集中,空间代表性需要加强。如果按照 85 类通量生态区的区划方案,生态区数量和国土面积覆盖率都达到 90%以上的,仅仅新增加 25—26 个通量站点即可。其次,150 类通量生态区中有 62 个区包含现有站点,在此基础上,至少需要增加 73 个站点才能覆盖 90%以上的通量生态区。同样 150 类通量生态区中,现有站点只能覆盖国土面积的 43.5%,若要覆盖率达到 90%以上,需要新增加 55 个站点,从覆盖更多国土面积的角度考虑,能够少增加约 20 个站点,可以节省建设、运行等费用。

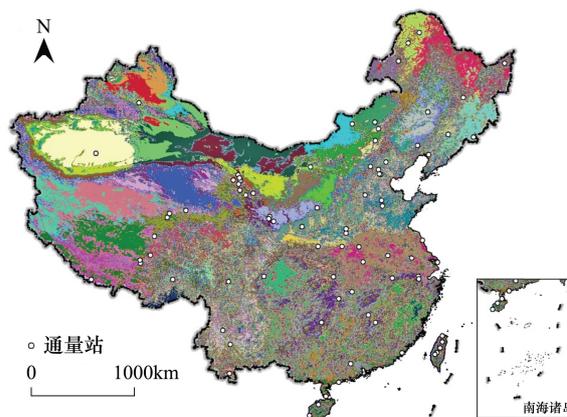


图 5 85 类通量生态区划分

Fig.5 85 clusters of flux-ecoregion regionalization

表 4 不同聚类数通量生态区内的现有站点覆盖情况
Table 4 The covering of existing sites in different flux-ecoregions

	25 区 25 clusters	50 区 50 clusters	75 区 75 clusters	85 区 85 clusters	100 区 100 clusters	150 区 150 clusters	200 区 200 clusters
含有通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing flux stations	24	34	46	51	55	62	62
含 1 个通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing only one flux station	3	11	23	31	38	46	46
含 2 个通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing 2 flux stations	8	10	14	12	9	12	13
含 3 个通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing 3 flux stations	4	6	6	6	5	3	0
含 4 个通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing 4 flux stations	2	3	1	0	2	0	1
含 5 个及以上通量站的生态区/个 Number of flux-ecoregions containing more than 5 flux stations	7	4	2	2	1	1	1
生态区覆盖率/% Ratio of flux-ecoregions containing existing flux towers to all flux-ecoregions	96.0	68.0	61.3	60.0	55.0	41.3	31.0
国土面积覆盖率/% Ratio of areas of flux-ecoregions containing existing flux towers to national area	98.0	67.3	60.0	63.2	53.9	43.5	31.9
生态区覆盖率达 90% 需增加站点数/个 Number of adding stations to reach up the ratio of flux-ecoregions containing existing flux towers to all flux-ecoregions to 90%	0	11	22	26	35	73	118
面积覆盖率达 90% 需增加站点数/个 Number of adding stations to reach up the ratio of areas of flux-ecoregions containing existing flux towers to national area to 90%	0	8	16	25	21	55	93

生态区覆盖率即含有通量观测站点的生态区的个数占分区个数(即聚类数)的比例,国土面积覆盖率即含有通量观测站点的生态区的面积占全国国土面积的比例

2.4 现有站点与自然地理区划的综合分析

为了更好地分析中国通量观测站点空间代表性,我们将现有通量观测站点与自然地理区划^[28]叠加分析(图 6)。从图 6 中发现,全国 55 个自然地理区划生态区中有 18 个生态区缺乏通量观测站点,主要集中在中温带半干旱地区、南亚热带湿润地区、青藏高原寒带干旱地区和青藏高原温带干旱地区。从这个意义上讲,在 18 个缺乏通量观测站点的生态区分别增加通量站点,也能起到增强空间代表性的作用。根据现有通量观测站点与自然地理区划生态区的叠加分析,发现在 37 个含有通量观测点的自然地理区划生态区中:13 个生态区只含有 1 个站点,9 个生态区含有 2 个站点,7 个生态区含有 3 个站点,4 个生态区含有 4 个站点,3 个生态区含有 5 个以上的站点。通量观测站分布的空间变异性较大,85 个通量站点中,38 个站点分布在生态区边界,大多数站点位于较偏地区和接近边界地区,只有 8 个站点处于生态区中心附近,由此看来,目前通量观测

站点的空间代表性需要加强。

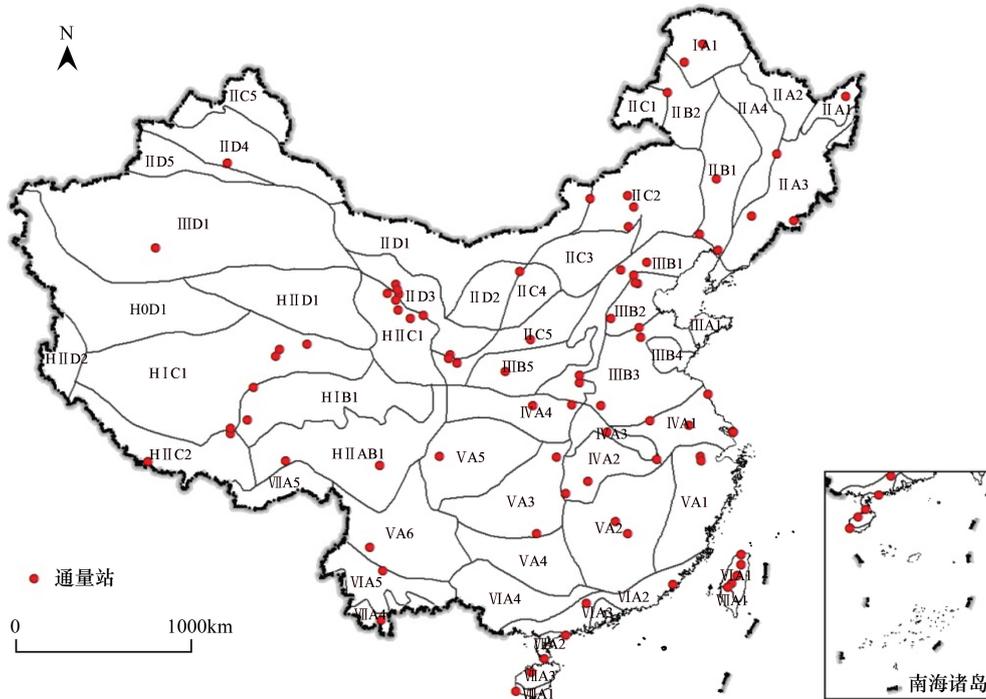


图 6 通量站点在自然地理区划生态区中的分布

Fig. 6 Spatial distribution of eddy flux tower stations in geographical regionalization

I A1 大兴安岭北部针叶林生态区, II A1 三江平原农业湿地生态区, II A2 小兴安岭针阔混交林生态区, II A3 长白山针阔混交林生态区, II A4 松辽平原东部农业生态区, II B1 松辽平原西部农业生态区, II B2 大兴安岭中部林区-山前丘陵平原生态区, II C1 呼伦贝尔草原生态区, II C2 毛乌素沙地荒漠草原生态区, II C3 内蒙古高原典型草原生态区, II C4 内蒙古高原南缘农牧交错带脆弱生态区, II C5 黄土高原北部草原-农业生态区, II D1 阿拉善高原半荒漠生态区, II D2 河西走廊绿洲农业生态区, II D3 河套平原农业生态区, II D4 准噶尔盆地荒漠-绿洲生态区, II D5 阿尔泰山地森林草原生态区, III A1 辽东胶东半岛落叶阔叶林生态区, III B1 华北山地落叶阔叶林生态区, III B2 鲁南山地丘陵落叶阔叶林生态区, III B3 海河平原农业生态区, III B4 黄淮海平原农业生态区, III B5 汾、渭河谷农业生态区, III D1 塔里木盆地与吐鲁番盆地荒漠-戈壁-绿洲农业生态区, IV A1 秦巴山地常绿-落叶阔叶林生态区, IV A2 长江三角洲与淮南农业-湿地生态区, IV A3 长江中游平原农业-湿地生态区, IV A4 大别山-天目山常绿阔叶林生态区, V A1 浙闽山地常绿阔叶林生态区, V A2 湘赣丘陵常绿阔叶林-农业生态区, V A3 湘西黔鄂山地常绿阔叶林生态区, V A4 黔桂喀斯特常绿阔叶林-农业生态区, V A5 四川盆地农业生态区, V A6 云贵高原北部(半湿润)常绿阔叶林生态区, VI A1 台湾岛中北部常绿阔叶林生态区, VI A2 粤桂闽丘陵平原-常绿阔叶林-农业生态区, VI A3 岭南山地常绿阔叶林生态区, VI A4 珠江三角洲平原农业生态区, VI A5 云贵高原南部常绿阔叶林生态区, VII A1 台湾南部雨林季雨林生态区, VII A2 雷州半岛农业生态区, VII A3 海南中北部雨林、季雨林生态区, VII A4 西双版纳雨林、季雨林生态区, VII A5 喜马拉雅东段南坡热带雨林、季雨林生态区, VIII A1 海南南部雨林生态区, HOD1 昆仑山地荒漠、半荒漠生态区, HIB1 藏东高寒草甸生态区, HIC 1 羌塘高原高寒草原生态区, HIIB1 青藏高原东部常绿阔叶林-暗针叶林生态区, HIIC1 青海东部农牧高寒草甸生态区, HIIC2 藏南农牧高寒草甸生态区, HIID1 柴达木盆地荒漠-盐壳生态区, HIID2 阿里山地荒漠草原生态区

3 讨论

国外已有科学家对美国通量网和欧洲通量网的代表性开展了定量分析评价。Hargrove 等^[11]首先选取调控碳通量以及影响植被光合作用与呼吸作用的气候、土壤、干扰等 25 个环境因子,采用 K-means 聚类方法,生成 9 套不同的美国通量生态区划,为美国通量网找到 5 个最优的新增地理位置。Sulkava 等^[2]以欧洲通量网络为例,根据三类研究问题设计 8 个模拟情景,将气候要素和土壤要素或总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)作为输入变量,根据 K-means++ 聚类分析,使同一类中数据点到聚类中心的平均距离平方即量化误差最小,得到 k 个聚类,选取与 k 个聚类中心距离最近的像元作为 k 个样本通量塔的位置。同时以 GPP 为目标变量,根据 k 个样本通量塔的数据,用人工神经网络模型(Artificial neural network, ANN)进行尺度扩展,用 GPP 的均值、空间变异性、半方差函数参数(块金值、基台值、变程)和时空变异性这四项指标来估算现有网络的代表性。最后根据不同的设计情景,设定平均量化误差阈值,确定现有站点中应保留的站点数量

及新增站点数量,计算尺度扩展结果的不确定性,优化通量网络中3种植被类型的设计^[2]。由此可见,多元统计理论和空间分析技术结合有助于优化通量网络的设计,推动通量观测的尺度扩展研究的进一步深入发展。

本研究采用多元地理变量空间聚类方法,基于分层的环境数据空间,把主要影响通量的气候、土壤、植被特征相似的划分为一个区域,把中国生态系统划分成具有相对均质通量特征的生态区域,确定现有涡度通量观测站点对整个中国陆地生态系统的代表性程度,并根据与碳通量相关的生态系统特征定量化的相似性,为外推现有的通量观测来估计那些没有观测值的生态区通量提供理论基础。假定每一个通量生态区表示一类生态系统,每一类生态系统至少有一个通量观测塔,那么划分的通量生态区越多,需要新增加的通量塔就越多。由于通量塔的建设受到观测技术的发展程度、资金、运行管理、电力、地形、环境等各方面条件的限制,要在目前85个站点基础上新增加100多个站点,从而覆盖200个通量生态区也是不现实的。综合现有站点对不同聚类数的通量生态区的覆盖率和区内站点数来看,通量生态区划分为100—150类比较合适,需要新增的通量塔数量大约25—55个,这样既覆盖中国生态系统的大部分主要类型,同时也能充分利用现有通量观测站点网络的优势。

根据本文3.3节的结果,若要使国土面积覆盖率达90%以上,对于85类通量生态区,可在准格尔盆地、柴达木盆地、青藏高原、阿拉善高原、呼伦贝尔高原、大兴安岭、黑龙江东北部、三江平原、云贵高原、四川盆地、东南地区等增加25个站点;对于100类通量生态区,可在准格尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、青藏高原、阿拉善高原、鄂尔多斯高原、大兴安岭、黑龙江东北部、三江平原、东北平原、云贵高原、四川盆地、东南地区等地区增加21个站点;对于150类通量生态区,可在全国大部分地区增加55个站点。

综合中国通量观测站点的现状和通量生态区的结果分析,西部高寒区和干旱区的通量站点较少,西南地区广西、贵州两省缺少通量塔的布设,加之南方地区生态系统类型破碎复杂,未来的通量观测站点布局可考虑在上述地区增加新的涡度相关通量站点,提高中国生态系统通量观测站点的代表性。

4 结论

本文通过收集主要影响碳通量的变量数据(包括气象因素、土壤因素和地形因素的非生物因子、实际植被状态以及植被生产力),用主成分分析法得到3个主成分变量,基于K-means空间聚类分析方法,分别计算出25、50、75、85、100、150、200类的通量生态区。利用中国现有的85个涡度相关通量观测站点,与75—200类的通量生态区进行对比分析,能代表30%—60%的生态系统类型。综合现有站点对不同聚类数的通量生态区的覆盖率和区内站点数来看,考虑现有站点分布格局,通量生态区划分为100—150类比较合适;考虑到涡度相关设备运行成本,在尽可能利用现有通量观测塔的基础上,通量站点可增加至100—150个,这样能覆盖中国陆地生态系统的大部分主要类型。

本研究采用3个主成分变量进行通量生态区的空间聚类,由于信息量的减少会对聚类的结果和分析有一定的影响。其次,进行K-means聚类运算时,像元变化阈值、最多迭代次数和聚类数量的设置主观性较强,也会影响到分类结果。第三,本文重点是用空间聚类方法获得的通量生态区,来评价现有站点在通量生态区的空间分布情况,尚未分析聚类中心和现有通量塔位置之间的关系,难以量化通量站点的最优位置。第四,由于难以获取所有85个通量站点的月或年通量观测值,本文无法对比分析通量生态区的GPP模拟值与站点的GPP观测值,从而未能更加有效地定量评价新增站点在现有网络中的代表性,无法确定现有站点中应保留的站点数量及新增站点数量。由于现有通量观测站点空间代表性有待提高,在现有站点空间格局的基础上,结合中国地形的破碎化和生态系统类型的多样性,需要找出更多的定量化的指标,提出我国陆地生态系统通量站点的合理布局,从而为通量观测从站点扩展到区域提供基础数据,使通量数据与遥感观测资料有机地结合,更加有效地用于检验过程机理模型的模拟结果。

References:

- [1] Baldocchi D D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T,

- Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-Scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [2] Sulkava M, Luysaert S, Zaehle S, Papale D. Assessing and improving the representativeness of monitoring networks: The European flux tower network example. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J04, doi: 10.1029/2010JG001562.
- [3] Yu G R, Sun X M. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [4] Xiao J F, Zhuang Q L, Baldocchi D D, Law B E, Richardson A D, Chen J Q, Oren R, Starr G, Noormets A, Ma S Y, Verma S B, Wharton S, Wofsy S C, Bolstad P V, Burns S P, Cook D R, Curtis P S, Drake B G, Falk M, Fischer M L, Foster D R, Gu L H, Hadley J L, Hollinger D Y, Katul G G, Litvak M, Martin T A, Matamala R, McNulty S, Meyers T P, Monson R K, Munger J W, Oechel W C, Paw U K T, Schmid H P, Scott R L, Sun G, Suyker A E, Torn M S. Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and Ameri Flux data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1827-1847.
- [5] Xiao J F, Zhuang Q L, Law B E, Baldocchi D D, Chen J Q, Richardson A D, Melillo J M, Davis K J, Hollinger D Y, Wharton S, Oren R, Noormets A, Fischer M L, Verma S B, Cook D R, Sun G, McNulty S, Wofsy S C, Bolstad P V, Burns S P, Curtis P S, Drake B G, Falk M, Foster D R, Gu L H, Hadley J L, Katul G G, Litvak M, Ma S Y, Martin T A, Matamala R, Meyers T P, Monson R K, Munger J W, Oechel W C, Paw U K T, Schmid H P, Scott R L, Starr G, Suyker A E, Torn M S. Assessing net ecosystem carbon exchange of U. S. terrestrial ecosystems by integrating eddy covariance flux measurements and satellite observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 60-69.
- [6] Jung M, Reichstein M, Bondeau A. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences*, 2009, 6(10): 2001-2013.
- [7] Xiao J F, Davis K J, Urban N M, Keller K, Saliendra N Z. Upscaling carbon fluxes from towers to the regional scale: Influence of parameter variability and land cover representation on regional flux estimates. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J06, doi: 10.1029/2010JG001568.
- [8] Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J Q, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J07, doi: 10.1029/2010JG001566.
- [9] Desai A R. Climatic and phenological controls on coherent regional interannual variability of carbon dioxide flux in a heterogeneous landscape. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: G00J02, doi: 10.1029/2010JG001423.
- [10] Chasmer L, Kljun N, Hopkinson C, Brown S, Milne T, Giroux K, Barr A, Devito K, Creed I, Petrone R. Characterizing vegetation structural and topographic characteristics sampled by eddy covariance within two mature aspen stands using lidar and a flux footprint model: Scaling to MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G02026, doi: 10.1029/2010JG001567.
- [11] Hargrove W W, Hoffman F M, Law B E. New analysis reveals representativeness of the AmeriFlux network. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 2003, 84(48): 529-544.
- [12] Hargrove W W, Hoffman F M. Potential of multivariate quantitative methods for delineation and visualization of ecoregions. *Environmental Management*, 2005, 34(S1): S39-S60.
- [13] Mi N, Yu G R, Wang P X, Wen X F, Sun X M. A preliminary study for spatial representativeness of flux observation at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 24-35.
- [14] Gong L J, Liu S M. Flux spatial representativeness of *Miyun* // Chinese Meteorological Society. Proceeding of Ecological Meteorology Operation Establishment and Agricultural Meteorology Disaster Warning. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2007.
- [15] Shuang X, Liu S M, Xu Z W, Wang W Z. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements in the *Heihe* river basin. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 724-733.
- [16] Song T, Wang S Q, Gao J X, Han Y W. A study on the scaling-up of CO₂ fluxes at *Haibei* station based on GIS and RS technologies. *International Journal of Intelligent Information Technology Application*, 2010, 3(2): 71-78.
- [17] Zhang W T. Senior Tutorial of SPSS Statistical Analysis. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [18] Chen S Q, Yang C C. Clustering method for area geographical entities based on cluster validity function. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(1): 44-47.
- [19] Liu S, Ji G L. A review of researches on spatial clustering. *Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology*, 2010, 10(2): 57-62.
- [20] Zhao Y S. Principles and Methods of Remote Sensing Application Analysis. Beijing: Science Press, 2003.
- [21] Wang Y, Song Z B, Wu P L. A study on spatial clustering of urban function partition. *Areal Research and Development*, 2009, 28(1): 27-31.
- [22] Lin D Y, Liu H P. Spatial clustering analysis in the point data distribution. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(4):

419-423.

- [23] Liu G H, Fu B J. The principle and characteristics of ecological regionalization. *Advances in Environmental Science*, 1998, 6(6): 67-72.
- [24] Cheng Y Q, Zhang P Y. Progress on eco-geographical regionalization researches. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3424-3433.
- [25] Fu B J, Chen L D, Liu G H. The objectives, tasks and characteristics of China ecological regionalization. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 591-595.
- [26] Fu B J, Liu G H, Chen L D, Ma K M, Li J R. Scheme of ecological regionalization in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6.
- [27] Williams C L, Hargrove W W, Liebman M, James D E. Agro-ecoregionalization of Iowa using multivariate geographical clustering. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 123(1/3): 161-174.
- [28] Huang B W. Primary scheme of comprehensive natural geographical zonation. *Acta Geographica Sinica*, 1958, 24(4): 348-365.

参考文献:

- [3] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 孙晓敏. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)通量观测空间代表性初步研究. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2006, (增刊1): 22-33.
- [14] 宫丽娟, 刘绍民. 密云通量观测的空间代表性 // 中国气象学会. 中国气象学会 2007 年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2007.
- [15] 双喜, 刘绍民, 徐自为, 王维真. 黑河流域观测通量的空间代表性研究. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 724-733.
- [17] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [18] 陈四清, 杨春成. 基于聚类有效性函数的面状地理实体聚类. *测绘科学技术学报*, 2006, 23(1): 44-47.
- [19] 柳盛, 吉根林. 空间聚类技术研究综述. *南京师范大学学报: 工程技术版*, 2010, 10(2): 57-62.
- [20] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [21] 王艳, 宋振柏, 吴佩林. 城市功能分区空间聚类方法研究及其应用——以济南市为例. *地域研究与开发*, 2009, 28(1): 27-31.
- [22] 林冬云, 刘慧平. 应用空间聚类进行点数据分布研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(4): 419-423.
- [23] 刘国华, 傅伯杰. 生态区划的原则及其特征. *环境科学进展*, 1998, 6(6): 67-72.
- [24] 程叶青, 张平宇. 生态地理区划研究进展. *生态学报*, 2006, 26(10): 3424-3433.
- [25] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. *生态学报*, 1999, 19(5): 591-595.
- [26] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.
- [28] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. *地理学报*, 1958, 24(4): 348-365.

附表 1 中国陆地生态系统通量观测站点信息

Attached table 1 Information of eddy flux tower stations of terrestrial ecosystems in China

站点名 Site name	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	生态系统类型 Ecosystem types	站点名 Site name	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	生态系统类型 Ecosystem types
呼伦贝尔站	49.33	119.93	草地	大岗山站	27.4	114.38	森林
锡林郭勒站	44.13	116.33	草地	长白山站	41.83	127.88	森林
锡林浩特站	43.55	116.68	草地	千烟洲站	26.74	115.06	森林
玛曲站	37.88	102.15	草地	哀牢山站	24.53	101.02	森林
海北站	37.67	101.33	草地	鼎湖山站	23.17	112.53	森林
当雄站	30.5	91.07	草地	西双版纳站	21.96	101.2	森林
阿柔站	38.04	100.46	草地	儋州站	19.55	109.48	森林
珠峰站	28.21	86.56	草地	西平站	33.4	113.8	森林
西大滩站	35.72	94.82	草地	奥林匹克森林公园站	40.03	116.39	森林
唐古拉站	33.07	91.93	草地	大兴站	39.62	116.43	森林
北麓河站	34.85	92.94	草地	密云站	40.63	117.32	森林
那曲站	31.37	91.9	草地	岳阳站	29.52	112.85	森林
阜康站	44.12	87.1	草地	安庆站	30.5	117.03	森林
温江站	30.7	103.83	草地	小浪底站	35.02	112.47	森林

续表

站点名 Site name	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	生态系统类型 Ecosystem types	站点名 Site name	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	生态系统类型 Ecosystem types
理塘站	30	100.27	草地	藏东南站	29.6	94.6	森林
榆中站	35.95	104.13	草地	大野口站	38.53	100.25	森林
临泽站	39.35	100.13	荒漠草原	漳江口站	23.92	117.45	森林
库布奇站	40.38	108.55	荒漠草原	安吉站	30.46	119.68	森林
五道梁站	35.22	93.1	荒漠草原	临安站	30.23	119.7	森林
东苏站	44.09	113.57	荒漠草原	兴隆山站	35.77	104.05	森林
张掖站	39.09	100.28	荒漠草原	长三角站	32.12	119.2	森林
塔中站	38.97	83.65	荒漠草原	会同站	26.83	109.75	森林
茂名站	21.52	111.36	荒漠草原	宝天曼站	33.5	111.98	森林
锦州站	41.82	121.2	农田	尖峰岭站	18.52	108.7	森林
栾城站	37.88	114.68	农田	秦岭站	33.49	109.48	森林
禹城站	36.83	116.57	农田	秭归站	30.82	110.98	森林
桃源站	28.92	111.5	农田	祁连山站	38.84	99.62	森林
洛阳站	34.64	112.48	农田	湛江站	20.27	110.19	森林
德州站	37.34	116.49	农田	冰砬山站	42.4	124.96	森林
廊坊站	39.6	116.58	农田	鸡公山站	32.05	114.1	森林
张家口站	40.33	115.5	农田	栖兰山站	24.58	121.42	森林
多伦站	42.53	116.23	农田	溪头站	23.67	120.8	森林
纳木错站	30.77	90.99	农田	花莲站	-	-	森林
安塞站	36.86	109.32	农田	北东眼山站	24.07	121.13	森林
长武站	35.2	107.74	农田	莲花池站	23.53	120.55	森林
通榆站	44.57	122.88	农田	盘锦站	40.92	122.33	湿地
盈科站	38.86	100.41	农田	崇明东滩站 1	31.52	121.85	湿地
寿县站	32.51	116.77	农田	崇明东滩站 2	31.58	121.8	湿地
大理站	25.7	100.18	农田	崇明东滩站 3	31.52	121.87	湿地
定西站	35.56	104.59	农田	盐城站	33.6	120.56	湿地
呼中站	51.67	123.17	森林	三江站	47.58	133.5	湿地
大兴安岭站	50.83	121.51	森林	台北站	25.11	121.47	湿地
帽儿山站	45.38	127.53	森林				

台湾花莲站经纬度无法查获

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.24 Dec., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures ZHAO Qiguo, HUANG Guoqin, MA Yanqin (7615)

Fundamentals of Ecology: promoting ecology from tradition to modern; To Commemorate The 100th Anniversary of E. P. Odum's Birthday BAO Qingde, ZHANG Xiufen (7623)

Food chain length theory: a review ZHANG Huan, HE Liang, ZHANG Peiyu, et al (7630)

Autecology & Fundamentals

Foraging and bed site selection of Tianshan argali (*Ovis ammon karelini*) in Central Tianshan Mountains in Summer LI Ye, YU Yuqun, SHI Jun, et al (7644)

Inhibition of pine coneworm, larvae *Dioryctria pryeri*, on herbivore-induced defenses of *Pinus tabulaeformis* ZHANG Xiao, LI Xiuling, LI Xingang, et al (7651)

Response of periphyton to nutrient level and relationships between periphyton and decay degree of *Potamogeton crispus* WEI Hongnong, PAN Jianlin, ZHAO Kai, et al (7661)

Correlative study between chemical constituents and ecological factors of *Notopterygii Rhizoma* Et Radix of endangered plateau plant HUANG Linfang, LI Wentao, WANG Zhen, et al (7667)

Induced changes in soil microbial transformation of nitrogen in maize rhizosphere by 4-year exposure to O₃ WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (7679)

Changes of digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper CHEN Xiaoxiao, GAO Yetian, WU Hongxi, et al (7690)

Population, Community and Ecosystem

Population dynamics and density of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) in different habitats ZHENG Sining (7699)

Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China LI Zhongwen, YAN Wende, ZHENG Wei, et al (7707)

Landscape, Regional and Global Ecology

Assessing the spatial representativeness of eddy covariance flux observation stations of terrestrial ecosystems in China WANG Shaoqiang, CHEN Diecong, ZHOU Lei, et al (7715)

The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China LI Haidong, SHEN Weishou, CAI Bofeng, et al (7729)

Effects of higher resolution image and spatial grain size on landscape pattern in a small watershed of the farming-pastoral zone ZHANG Qingyin, FAN Jun (7739)

The changes of soil organic carbon and carbon management index in alpine steppe CAI Xiaobu, YU Baozheng, PENG Yuelin, et al (7748)

Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen at small scale in subalpine meadow and *Picea meyeri* forest in Luya Mountain WU Xiaogang, GUO Jinping, TIAN Xuping, et al (7756)

Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China SUN Weijun, FANG Xi, XIANG Wenhua, et al (7765)

The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China JIANG Yiliang, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al (7774)

Net nitrogen mineralization in soils of Napahai wetland in Northwest Yunnan XIE Chengjie, GUO Xuelian, YU Leichao, et al (7782)

- Variation of soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantations after controlled burning in the red soil region and its ecological evaluation YANG Shangdong, WU Jun, TAN Hongwei, et al (7788)
- The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al (7798)
- Long-term dynamic simulation on forest landscape pattern changes in Mount Lushan LIANG Yanyan, ZHOU Nianxing, XIE Huiwei, et al (7807)
- Species habitat correlation analysis in temperate-subtropical ecological transition zone YUAN Zhiliang, CHEN Yun, WEI Boliang, et al (7819)
- Responses of Qilian junipers radial growth of different ecological environment and detrending method to climate change in Qinghai Province ZHANG RuiBo, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al (7827)
- Resource and Industrial Ecology**
- The pattern of ecological capital in Daxiaoxinganling, Heilongjiang Province, China MA Lixin, QIN Xuebo, SUN Nan, et al (7838)
- Research and implementation of mobile data collection system for field survey of ecological environment SHEN Wenming, SUN Zhongping, ZHANG Xue, et al (7846)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- A remote sensing urban ecological index and its application XU Hanqiu (7853)
- Research Notes**
- Genetic diversity and DNA fingerprint of *Pleioblastus* by ISSR HUANG Shujun, CHEN Liguang, XIAO Yongtai, et al (7863)
- Comprehensive evaluation on photosynthetic and fluorescence characteristics in seedlings of 4 drought resistance species LU Guangchao, XU Jianxin, XUE Li, et al (7872)
- Stock difference of *Coelomactra antiquata* based on nuclear (ITS2) and mitochondrial (16S rRNA) DNA sequence and secondary structure MENG Xueping, SHEN Xin, ZHAO Nana, et al (7882)
- The mechanism of the characters of inorganic carbon acquisition to temperature in two *Ulva* species XU Juntian, WANG Xuwen, ZHONG Zhihai, et al (7892)
- Research on changes of dynamic characteristics of rainfall though *Platyclusus Orientalis* plantation canopy in Beijing Mountain Area SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jianhui, et al (7898)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 丁 平 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 24 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 24 (December, 2013)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元