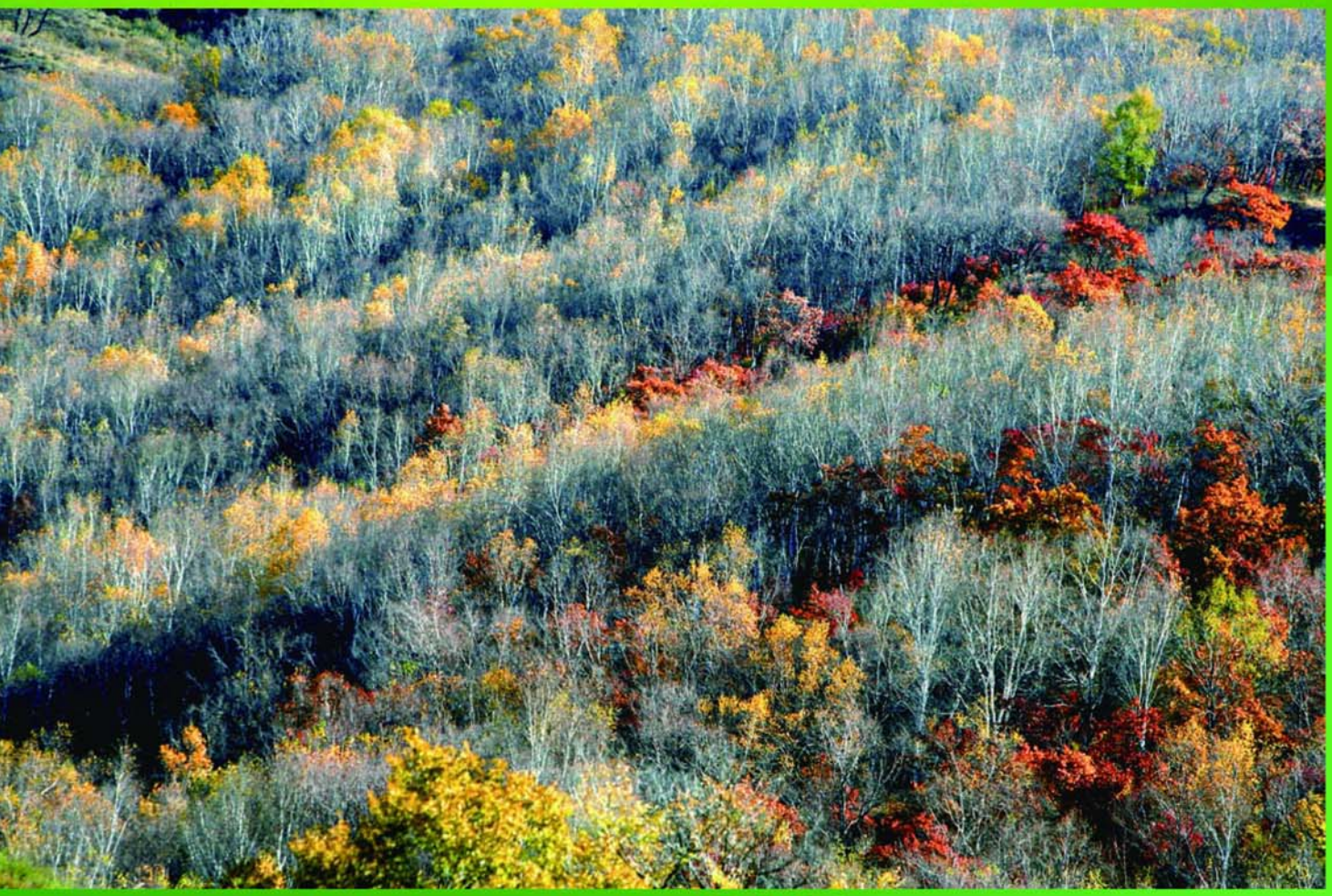
ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

（SHENGTAI XUEBAO）

第 31 卷 第 16 期　　2011 年 8 月　（半月刊）

目　　次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较…… 汪仲琼，王为东，祝贵兵，等（4489）
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟…… 郎　莹，张光灿，张征坤，等（4499）
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响……
…… 秦志敏，付晓青，肖润林，等（4509）
镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响…… 吴　坤，吴中红，邰付菊，等（4517）
条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较…… 蒋和平，郑青松，朱　明，等（4525）
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响…… 庞秋颖，陈思学，于　涛，等（4534）
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响…… 高菊生，曹卫东，李冬初，等（4542）
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析…… 杜　军，杨培岭，李云开，等（4549）
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长…… 徐伟伟，王国祥，刘金娥，等（4560）
基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价 …… 田耀武，黄志霖，肖文发（4568）
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响…… 张征田，庞振凌，夏　敏，等（4579）
印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构…… 周亚东，王春生，王小谷，等（4586）
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例…… 张　斌，袁　晓，裴恩乐，等（4599）
应用鱼类完整性指数（FAII）评价长江口沿岸碎波带健康状况 …… 毛成责，钟俊生，蒋日进，等（4609）
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析…… 朱国平，吴　强，冯春雷，等（4620）
水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价 …… 莫志鸿，冯利平，邹海平，等（4628）
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡 …… 王小彬，王　燕，代　快，等（4638）
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量…… 王永生，杨世琦（4653）
太湖沉积物有机碳与氮的来源…… 倪兆奎，李跃进，王圣瑞，等（4661）
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响…… 马　晶，孙　建，张　涛，等（4671）
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较…… 吕　进，曹婷婷，王丽萍，等（4680）
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化…… 兰存子，刘振生，王爱善，等（4689）
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征…… 韩　路，王海珍，陈加利，等（4699）
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略…… 乔　琦，秦新生，邢福武，等（4709）
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响 …… 多立安，王晶晶，赵树兰（4717）
CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系 …… 邵　璞，曾晓东（4725）
基于生态效率的辽宁省循环经济分析 …… 韩瑞玲，佟连军，宋亚楠（4732）

专论与综述

土壤食物网中的真菌／细菌比率及测定方法 …… 曹志平，李德鹏，韩雪梅（4741）
生态社区评价指标体系研究进展…… 周传斌，戴　欣，王如松，等（4749）

问题讨论

不同胁迫条件下化感与非化感水稻 *PAL* 多基因家族的差异表达 …… 方长旬，王清水，余　彦，等（4760）

研究简报

钦州湾大型底栖动物生态学研究 …… 王　迪，陈丕茂，马　媛（4768）
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征 …… 董凯凯，王　惠，杨丽原，等（4778）
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析…… 刘晓梅，布仁仓，邓华卫，等（4783）
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究…… 隋旭红，张建军，文万荣（4791）
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N_2O 排放及影响因子 …… 石兰英，牟长城，田新民，等（4799）

期刊基本参数：CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 35 * 2011-08

封面图说：在长白山麓低海拔地区的晚秋季节，成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片，共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在，整个山梁层林尽染，秋意浓浓。

彩图提供：陈建伟教授　国家林业局　E-mail：cites.chenjw@163.com

邵璞,曾晓东. CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系. 生态学报,2011,31(16):4725-4731.
Shao P, Zeng X D. Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors. Acta Ecologica Sinica,2011,31(16):4725-4731.

CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系

邵 璞[1,2],曾晓东[1,*]

(1. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029;2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:作为陆面模型里植被的特征量,叶面积值数(LAI)和植被覆盖度在陆地-大气相互作用的相关研究里被广泛应用。LAI 的模拟是动态植被模式(DVM)的核心任务之一,需要对模拟的 LAI 与气候因子间的时空关系进行评估以更好的了解模式性能以及理解植被-大气反馈过程。用 1950—1999 年的气象数据驱动通用陆面模式的动态植被模式(CLM3.0-DGVM)模拟得到的全球潜在植被的 LAI 和 2001—2003 年 MODIS 观测资料衍生出的 LAI 数据进行对比,并在此基础上研究当前气候条件下不同植物功能型(PFT)的 LAI 与不同气候因子在年际尺度上的时空关系,包括运用 Moran 系数理论分析空间自相关性、运用逐步回归算法构建空间最优一阶线性回归方程、分析模式 LAI 与气候因子间的滞后相关性。研究表明:1)以 MODIS 衍生数据作参照,改进后的 CLM3.0-DGVM 能较好地模拟不同 PFTs 的 LAI 年最大值的空间分布型,但是在物候模拟即 LAI 的季节循环上存在不足;2)植物 LAI 的分布具有正的空间自相关性。对潜在植物 LAI 和气候因子进行拟合时不同气候因子对不同 PFTs 的方差贡献不一样,一般降水最大、风速最小。这反映了陆地生态系统和气候间复杂的相互关系;3)模式模拟的 LAI 和气候因子有显著的 1—2a 的滞后相关,其中光照、降水和 LAI 的滞后相关性波动较大,而温度、比湿的较小,风速的不明显。这些基于 CLM3.0-DGVM 的结论在自然界的植物-气候相互作用系统中具有普遍意义:不同地区不同植物受不同气候因子的影响不一样;找出不同 PFT 的主要气候影响因子和理解其中最关键的生物物理和生物化学过程是至关重要的。进一步工作需要用更精确和更高分辨率的气候数据以及局地观测的 LAI 对 DGVM 做评估,同时 DGVM 本身也需要继续改进(例如加入农作物和灌溉过程的模拟)。

关键词:动态植被模式;MODIS 卫星数据;叶面积指数;空间回归;时间滞后相关

Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors

SHAO Pu[1,2], ZENG Xiaodong[1,*]

1 *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

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

Abstract: Leaf area index (LAI) and fractional vegetation cover are widely used to characterize vegetation in land models for land-atmosphere interaction studies. The prediction of LAI is one of the core tasks of Dynamic Vegetation Models (DVMs), and the spatiotemporal relationship between the climate and simulated LAI or other vegetation variables simulated by DVMs needs to be evaluated and better understood. In this work, the Dynamic Global Vegetation Model in the Community Land Model version 3.0 (CLM3.0-DGVM) is utilized to address this issue by evaluating the simulated LAI using the new plant function type (PFT) LAI parameters derived from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data developed by The National Center for Atmospheric Research. The Moran's autocorrelation index is used to

基金项目:"973"计划重点项目(2009CB421406);国家"863"计划重点项目(2009AA122100);国家自然科学基金委重点项目(40830103)

收稿日期:2010-08-30; **修订日期**:2010-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdzeng@mail.iap.ac.cn

determine the degree of clustering of the simulated annual LAI maximum (LAIx) in the absence of ancient agricultural practices and modern industrialization. Then the stepwise regression algorithm is applied to construct an optimal multivariate linear regression equation for each PFT between LAIx (dependent variable) and climatic factors (independent variables). In this way the dominant and secondary factors as well as their statistical significance can be quantified. Furthermore, the temporal relationship between LAIx and five climatic factors for each PFT at interannual time scales under current climatological condition is investigated using time-lagged correlation analysis. The conclusions from these model-data analyses are: (1) the modified CLM3.0-DGVM is able to simulate well the mean LAIx value for each PFT and reproduce the global biogeographic patterns of LAI, but it still has deficiencies in the simulation of PFT phenology (i.e. LAI seasonal cycle); (2) there is a positive spatial autocorrelation of LAIx within each PFT. The spatial distribution pattern of LAIx is strongly influenced by the climatic factors, and this effect differs for different PFTs. Generally, solar radiation and precipitation are the first-order impact factors, followed by specific humidity; (3) the interannual trends of LAIx simulated by CLM3.0-DGVM has a significant 1-year or 2-year lag relationship with some climatic factors, mainly because LAIx is calculated from previous year's net primary production in this model. Among the five climatic factors, solar radiation and precipitation have larger correlations with the LAIx in the subsequent one or two years than temperature and specific humidity, while the wind has a negligible correlation with LAIx. The implications of these characteristics of LAI and LAI-climate relations revealed in this DGVM for the general vegetation-climate interactions in nature are: different climatic factors have different effects on different plants in different regions, the biogeographic pattern of vegetation is a composite of individualistic responses to climatic factors of different plants which implies that terrestrial ecosystem exhibits complex behavior at different spatiotemporal scales; and for each PFT, it is crucial to identify the dominant climatic factor and understand the main biophysical and biogeochemical processes. Work is still needed to further evaluate the DGVM using more accurate and higher-resolution climatic data and *in-situ* LAI data. In addition, the DGVM needs to be further improved (e.g., by including crops and irrigation).

Key Words: dynamic global vegetation model; MODIS; LAI; spatial regression; time lag correlation

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是表征植物冠层结构和植物群落生产力的重要指标,直接影响植物对光能的截获和利用,间接影响冠层阻抗,同时作为决定地表反照率的重要参数直接影响地表和大气间的相互作用[1]。动态植被模型(DVM)能够模拟 LAI 的季节变化和年际变化,是研究土壤-植被-大气系统中水循环、物质交换、能量传输等的重要工具[2]。目前 DVM 大都根据光合、呼吸等生理过程产生的净初级生产力(NPP)和植物比叶面积的经验关系计算 LAI 的值,因此 LAI 受到光合、呼吸等多种过程的经验公式及氮限制因子、最大光合作用速率、比叶面积等多个参数共同影响,误差和不确定性都较大。专门针对 DVM 模拟 LAI 能力的验证工作较少,已有工作集中在对 DVM 模拟的植被特征如分布、NPP 和 LAI 等的气候态的验证上。本文以动态植被模式 CLM3.0-DGVM(Community Land Model 3.0 Dynamic Global Vegetation Model)为例考察 DVM 对 LAI 时空变化的模拟能力,以期对现有 DVM 的发展提供意见,并在此基础上分析 LAI 与不同气候因子间的时空关系,从而揭示植被-气候相互作用的规律。

1 数据

1.1 模式数据

CLM3.0-DGVM 是美国国家大气研究中心(NCAR)联合多个国家的研究者开发的气候系统模式 CCSM3 中通用陆面模式 CLM3.0 所包含的一个能模拟全球或者单点植被动态变化的子模式。CLM3.0-DGVM 及其修改版本的技术细节和基本的模拟性能在相关文献里已有详细叙述[3-6]。它模拟的植物功能型(Plant Function Type, PFT)包括 7 种树、3 种草和 2 种灌木。驱动模式的气象数据来源于 Qian 等[7]对 NCEP 再分析资料修正后的气象数据,时间分辨率为 3h,水平分辨率为 T62 高斯格点(全球共有 192×94 个格点)。该数据

对原始的 NCEP 再分析资料里虚假的降水、温度、辐射、比湿的长期变化趋势和月变化均有较好的修正,而气压和风速直接用观测值进行插值。用观测资料驱动 CLM3.0 进行的数值模拟表明该资料可被用来进行长期的数值模拟和气候评估。Zeng[6]用该数据驱动修改后的 CLM3.0-DGVM 进行离线模拟,结果表明改进的模式可较好地模拟全球植物的分布,消除了一些原模式模拟的全球植被分布的主要偏差,并较好地反映植物分布与温度、降水的关系。本文中 CLM3.0-DGVM 模拟用 1950—1999 年的气象数据循环驱动,所用空间分辨率均为 1.875°×1.875°(经度×纬度),从裸土初始化,模拟时间为 600a,取最后 50a 的值作为分析数据。

1.2　MODIS 衍生数据

MODIS 卫星数据产品包含了叶面积指数(MYD15 和 MOD15),本工作中采用的时间跨度为 2001—2003 年,最小空间分辨率为 1km,时间尺度有日、旬和月的,但是该产品并没有区分植物种类。原始的 MODIS 植被分类采用的是 IGBP 的分类方案,和 CLM 的分类系统不对应。NCAR 的 Lawrence 利用 MODIS 土地覆盖数据(MYD12 和 MOD12)按照 CLM 所用的 PFT 分类方案对第四代 MODIS LAI 数据[8]进行处理,得到了空间分辨率为 0.5°×0.5°的 12 个月的 LAI 气候态数据。和 NCAR2004 年公布的前一代 LAI 气候态数据相比它的准确度有了很大提高[9]。该数据主要用作气候系统模式或者地球系统模式数值模拟时给大气提供较准确的地表边界条件,在不包含 DGVM 时陆面模式读取该数据自动插值得到每天的 LAI 值。而在本工作中该数据作为检验模式模拟效果的参照物。在后面进行空间回归分析时对该数据进行空间插值处理,使它和模式输出的格点分辨率一致。

2　结果和分析

2.1　模式结果验证

MODIS 衍生数据和模式模拟的 LAI 年最大值(LAIx)在全球的空间分布型类似,但是具体的大小和空间变异性有一定差别。以温带阔叶落叶树(BDM)为例比较两组数据中植物在生长茂盛期所处的月份及对应的 LAI 值(图 1),可见两种数据 LAIx 的空间分布型相似。根据格点经纬度计算得到两者的 Mantel 相关系数(该系数用于评价两个矩阵之间的相关关系)达到了 0.57($P<0.01$),说明模式能较好的模拟 BDM 的 LAIx 的空间分布。将模式模拟的 12 种 PFTs 的 LAIx 的均值大小(Avg)及其标准偏差(Std)和 MODIS 衍生数据进行对比(表 1),可以发现温带阔叶常绿树(BEM)的 Avg 比 MODIS 衍生数据小得多,可能的原因之一是模式模拟的该种 PFT 的分布范围比观测大很多,生态学上认为植物的生态分布范围要小于其生理分布范围,目前的模式还不能体现这一点。同时从表 1 可以看出模式模拟的 LAIx 的空间差异(Std)一般大于 MODIS 观测值,这可能是因为模式中植物的生物气候参数在全球均取同一个值,在不同生物气候区缺乏变化,使得 LAIx 在空间分布上缺乏渐变。

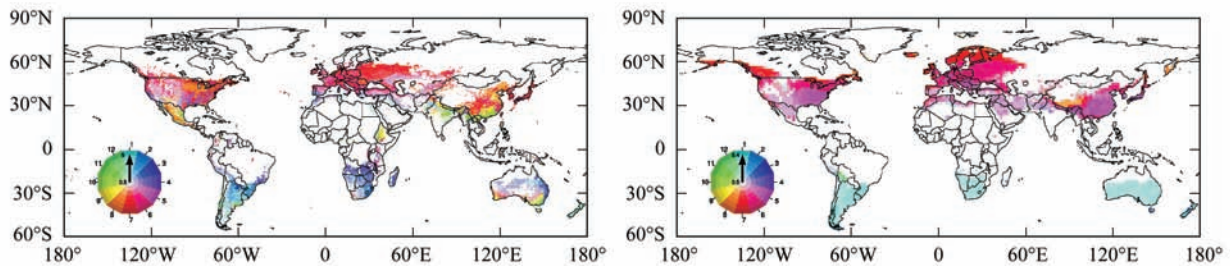


图 1　MODIS 衍生数据和 CLM3.0-DGVM 模拟的温带阔叶落叶树 LAI 年最大值的对比

Fig.1　Comparison of annual LAI maximum for broadleaf deciduous temperate tree between MODIS derived data and CLM3.0-DGVM simulation

左图是 MODIS 衍生数据,右图是模式模拟最后 50a 的 LAI 年最大值的平均值,单位均为 m^2/m^2;12 种颜色表示达到最大值的 12 个月份,颜色深浅表示 LAI 值的大小

MODIS 衍生数据里的 PFTs 比模式能够模拟的 PFTs 多 3 种,分别为寒带针叶落叶树、常绿阔叶灌木和农

作物,对应的主要分布区在西伯利亚东北部、地中海沿岸和温带森林地区。这 3 个地区模拟的 LAIx 和衍生数据的差异较大。现在大多数 DGVMs 包括 CLM3.0-DGVM 只考虑了气候和土壤等环境因素对潜在植被的影响,忽略了放牧、城市化等人为因素对植物的影响,这些过程的参数化方案还有待发展。图 1 里中国东部、美国中部和东欧地区的 LAI 大小的差异主要是由于人类活动的影响。南半球的差异主要体现在植物生长茂盛期所处月份不同,模式中 BDM 在南半球 1 月份达到最大值,而卫星观测到的要晚 1—2 个月。和观测到的 LAI 达到年最大值的月份(即植物生长茂盛期)对比,能看出 CLM3.0-DGVM 对植物物候的模拟能力存在不足。这主要是因为 CLM3.0-DGVM 中每日的 LAI 值是根据 LAIx 乘以一个物候因子得到[3],而目前的物候方案过于简单,物候因子的计算方法有待进一步改进。以上这些均是模式本身需要改进和发展的地方。此外,模式驱动数据本身的准确性以及作为参照的 MODIS 原始数据的精确性对模式结果的验证也存在一定影响,这些都使得模式模拟的 LAIx 时空分布与 MODIS 衍生数据在客观上存在着一定程度的差异。

表 1 CLM3.0-DGVM 模拟数据和 MODIS 衍生数据中 12 种 PFTs 的 LAI 年最大值的统计对比

Table 1 Annual LAI maximum statistics (including the Moran's Index) **for each PFT using CLM-DGVM results and MODIS derived data**

	NEB	BDB	NEM	BEM	BDM	BET	BDT	DBsh	DMsh	C3-A	C3-NA	C4
N	1493	1874	1275	888	1592	1084	1082	1293	1634	1094	1440	1004
Avg1	2.46	2.64	2.14	1.96	2.54	5.08	3.62	0.19	0.27	0.45	0.93	0.81
Avg2	3.44	3.02	2.72	4.16	2.36	4.71	2.91	0.19	0.16	0.21	0.40	0.30
Std1	1.22	1.51	1.30	1.39	1.49	2.88	2.00	0.63	0.39	1.16	1.29	1.09
Std2	0.91	1.14	1.07	0.93	1.05	0.84	0.94	0.79	0.41	0.83	0.80	0.65
Moran'I	0.711	0.772	0.445	0.707	0.654	0.763	0.730	0.235	0.144	0.388	0.203	0.356

12 种 PFTs 分别是寒带针叶常绿树(NEB),寒带阔叶落叶树(BDB),温带针叶常绿树(NEM),温带阔叶常绿树(BEM),温带阔叶落叶树(BDM),热带阔叶常绿树(BET),热带阔叶落叶树(BDT),寒带阔叶落叶灌木(DBsh),温带阔叶落叶灌木(DMsh),C3 极地草(C3-A),C3 非极地草(C3-NA),C4 草(C4);分析数据不包含南极洲; N 为模式数据中存在相应 PFT 的全球格点数; Avg1 和 Avg2 分别为用 1950—1999 年气候驱动 CLM3.0-DGVM 得到的和 MODIS 衍生数据中 LAI 年最大值的均值,Std1 和 Std2 为对应的标准偏差;Moran'I 表示对模式模拟的 LAI 年最大值进行空间自相关分析得到的 Moran 系数,均通过基于随机检验的显著性检验($P<0.01$)

2.2 LAI 与气候因子的空间相关

LAIx 反映了当前气候和环境条件下植物每年能够生长到的最佳状态。因为驱动模式的气象数据之间没有直接的因果关系,假设各个气候因子是相互独立的,近似认为 LAIx 与气候因子间是一种一阶线性关系,在此基础上可建立如下回归方程:

$$Y = \rho Y + \beta_1 X + \beta_0 + \varepsilon \tag{1}$$

式中,Y 表示 LAIx,X 表示能够解释 Y 变量的气候因子,ρ 是 Y 的空间自回归系数,β_1是气候因子的回归系数,β_0是常数项,ε 是随机误差项。用传统统计学方法拟合和解释变量空间变化的前提条件之一就是因变量在统计上必须独立且均匀分布[10],而生态学上植物尤其是树存在明显的聚集性分布,因此首先需要对模式数据进行空间自相关分析。Moran 系数理论是研究空间自相关最经典、应用最广的方法[11]。与相关系数类似,Moran 系数的范围也是-1—1。-1 暗示有强烈的负的空间自相关,0 意味着变量在空间上随机、独立排列,1 则表示存在着正的强空间自相关。对 CLM3.0-DGVM 模拟得到的 LAIx 数据进行空间自相关性分析,得到 12 种 PFTs 的 Moran 系数(Moran'I)(表 1),可知各种 PFT 的 LAI 均具有较强的空间自相关性。其中每种 PFT 存在格点两两之间的空间权重按照其经纬度由 CSISS(Center for Spatially Integrated Social Science)基于 ESRI 公司的 MapObjects LT2 技术开发的免费软件 GeoDa 进行计算,从而构建出对应的空间权重矩阵。Moran 系数在线性模型中的检验参照 Cliff[12]的检验方法。

分析可知不同年份及气候条件下各种 PFT 的空间自相关性的强弱不断发生变化,其 Moran 系数大小和正负都有可能发生改变。由表 1 可知,当前气候条件下热带阔叶常绿林(BET)的 Moran 系数最大,即 BET 的 LAIx 分布具有很强的正的空间聚集性,其生长茂盛的地区相对集中,而且集中的地区面积较大,反之亦然;温

带灌木(DMsh)的 Moran 系数最小,其 LAI 在空间上比较离散,且不同地区大小差异较小。

基于因变量 LAI 的空间自相关性,构造“最优”线性回归方程的方法采用了基于加权最小二乘法的逐步回归法。X 中备选的气候因子有五种,分别是光照、降水、温度、比湿、风速(气压受海拔影响较大,对植物作用不明显,因此忽略不计)。为消除空间自相关采用了广义差分迭代法(统计软件采用 SPSS),将回归方程变量滞后一期(1a)可改写为:

$$Y_i - \rho Y_{i-1} = \beta_0(1-\rho) + \beta_1(X_i - X_{i-1}) + \varepsilon \tag{2}$$

式中,Y_{i-1}、X_{i-1}分别表示 Y_i和 X_i滞后 1a 的空间序列($i=0,1,\cdots$)。先对 Y_i和 X_i做逐步回归,通过求期望值和模拟值之间残差的滞后一期的序列和残差的相关系数估计 ρ 值,然后将 ρ 代入方程(2)做逐步回归。利用杜宾-瓦森检验(DW 检验)得到的 DW 值分析回归结果的自相关性,DW 值接近 2 认为结果没有空间自相关性,此时得到的回归方程即为所求的“最优”线性拟合方程,如果 DW 值和 2 相差较大,则对 Y_{i-1}和 X_{i-1}重复上面的分析,直至 DW 值接近 2。最终拟合得到的一阶线性回归方程的各项系数见表 2。

表 2　模拟的 LAI 年最大值和气候因子拟合的空间回归系数

Table 2　Fitted spatial regression coefficients between simulated annual LAI maximum and climatic factors

	NEB	BDB	NEM	BEM	BDM	BET	BDT	DBsh	DMsh	C3-A	C3-NA	C4
常数项 Intercept	0.987	0.717	2.660	2.262	0.706	6.612	2.569	0.648	0.541	1.147	1.010	0.819
光照 Light	-0.019^2	-0.018^2	-0.019^1	-0.016^2	-0.023^2	-0.025^4	-0.010^5	-	-	-	0.003^1	0.010^1
降水 Precipitation	0.001^3	0.001^3	0.001^2	0.002^1	0.001^1	0.002^1	0.001^1	0.001^1	—	—	0.000^2	—
温度 Temperature	—	—	-0.036^3	-0.031^3	—	-0.311^2	-0.224^2	—	-0.009^1	-	-	-0.059^2
比湿 Humidity	496.7^1	674.1^1	—	—	149.2^3	157.9^3	129.6^3	—	10.45^2	-	38.23^3	
风速 Wind	-0.166^4	-0.204^4	—	—	-0.089^4	-0.184^5	-0.172^4	-0.082^2	-0.030^3	-0.158^1	—	—

表头字母缩写代表的 PFT 参见表 1; 光照、降水、温度、比湿、风速的单位分别是 W/m^2、mm/a、℃、kg/kg、m/s; 表中所列系数均通过了显著性检验($P<0.01$); —表示逐步回归中被排除的气候因子; 数字的右上标表示所剩气候因子中该因子对 LAI 方差贡献的排序; 0.000 表示绝对值小于 0.001 的数字

从表 2 可以看出在寒带比湿对 NEB 和 BDB 的 LAI 的方差贡献最大(分别为 23.7% 和 29.8%),且与 LAI 正相关,这可能是由于寒带年均气温较低、冻土分布面积较大,相对突出了比湿和其他气候因子对植物的协同影响。温带树、热带树、寒带灌木和降水的拟合关系最好(温带针叶常绿林除外,它和光照的回归关系最显著),且系数均为正;温带灌木和温度的负相关关系可用来构造最优回归方程;极地草比较特别,用风速的负值来预报它的 LAI 值和期望值的差异最小;而非极地草和光照的正相关关系最明显。总的来说,按照相对最优预报因子(即右上标为 1 的因子)的数目来看的话降水对植物的拟合效果最好(5 个)、其次为光照(3 个)、比湿(2 个)。温度和风速虽然都只对其中一种 PFT 拟合效果最优,但是如果固定了某种 PFT 的最优回归因子,温度对剩余 LAI 方差的贡献比风速高得多。

2.3　LAI 和气候因子的滞后相关

已有研究表明 MODIS 观测得到各种植物类型的 LAI 随季节变化对温度的响应相当显著,而与降水的相关性较低;常绿林和落叶林的 LAI 与温度和降水都有较好的相关性[13]。由 2.2 节分析可知同一个气候因子在同一时间段对不同 PFTs 的影响具有多样性。实际上根据分析,不同年份不同气候因子的这种“最优”回归的系数的大小正负均会发生变化,并且它们对 LAI 的影响还有滞后效应。Braswell 等[14]分析了时间跨度为 8 年的全球 12 种生物群系的 NDVI 和当年、之前两年的温度的相关关系,指出植物 NDVI 和温度有滞后两年的正相关,而且不同生物群系的相关形态差别很大。

对模式数据各种 PFT 的 LAIx 的全球平均值与温度、降水等 5 种气候因子进行时间滞后分析,滞后期从 0 到 11a(图 2),可见在年际尺度上,光照和热带植物、温带灌木、非极地草有明显的负相关,而且这种负相关在随后 4—7a 仍然显著;降水有利于温带、寒带植物的 LAIx,并且这种有利性会持续 2—4a;温度和寒带植物的 LAIx 有滞后 2—6a 的正相关;比湿对寒带树、热带树、灌木的影响和温度类似,但是和温带植物、草的滞后相

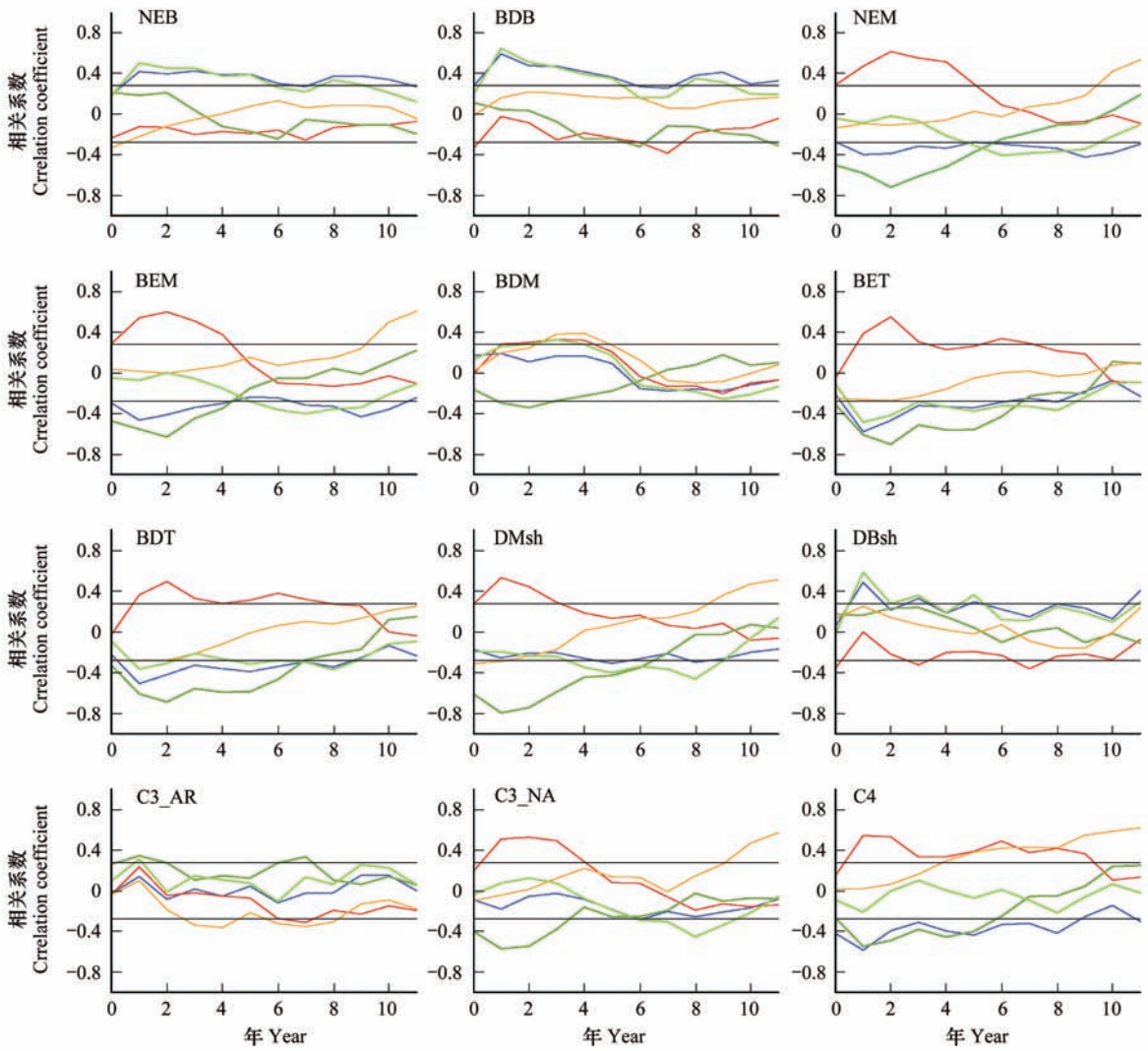


图 2 LAI 年最大值和 5 种气候因子的滞后相关关系

Fig. 2 Time lag correlation functions for annual LAI maximum versus climatic factors

蓝线→温度,红线→降水,深绿线→光照,黄线→风速,浅绿线→比湿,两条直线代表能通过显著性检验的最小相关系数,超过它们表示通过 T 检验($P<0.05$),PFTs 的缩写参见表 1

关不显著;风速和 LAIx 没有明显的相关性。

由此可知植物的 LAI 对气候的响应滞后于气候的年际变化,一般滞后 2a 的时候 LAI 和气候因子的相关系数达到最大。其中降水和光照与 LAI 的年际变化相关性波动较大,温度、比湿和风速与 LAI 的滞后相关变化比较平缓。温带阔叶落叶树、寒带灌木和极地草受气候的滞后影响较小。草和气候的滞后关系容易发生正负波动,说明了草固有生长时间尺度较小。这种模式中滞后 1a 以上的相关的主要原因可能是模式里 LAIx 的计算和上一年的 NPP 息息相关。全球尺度上 NPP 和 LAI 有很强的同期相关,这点从生态学理论上可以得到解释[15]。另外深层土壤提供给植物利用的水份的滞后变化也使得这种相关可能持续 2a 以上。

3 结论和讨论

本文用 CLM3.0-DGVM 模拟的潜在植被的 LAI 和 MODIS 卫星观测的衍生数据进行对比,证明 CLM3.0-DGVM 能较好模拟植物的 LAI 年最大值,但是在 LAI 月变化的模拟上存在不足。在此基础上对模拟的 LAI 与不同气候因子的空间回归关系进行了分析,阐明了不同 PFTs 的 LAI 的分布具有正空间自相关性。对潜在植被的 LAI 和气候因子进行空间拟合时,不同气候因子对 PFTs 的拟合效果不一样,反映了植物和气候间复杂的

相互关系。一般来说,用降水做自变量对植物的拟合效果最好,其次为光照、比湿。给定了某一种最优的回归因子后,温度对剩余 LAI 的方差的贡献比风速高得多。最后分析了 LAI 和气候因子间的时间滞后相关关系,发现模式中植物 LAI 和气候之间有显著的 1—2a 滞后相关,其中和光照、降水的相关性波动较大,而温度、比湿波动较小,风速和 LAI 的相关性不明显。

将 CLM3.0-DGVM 模拟得到的植物和气候间的相关关系和传统生态学和气候学上的植物生物气候学理论对照,可知模式能够抓住植物 LAI 变化的基本特征,揭示植物特征对气候响应的普遍规律,为解释生态系统中的各种复杂现象提供了一条基于物理和数学过程的途径。但是植物和环境之间的互动非常复杂,自然界中除了气候因子以外还有许多重要的环境因子对植物的 LAI 有重要影响,例如 CO_2浓度、人类活动、病虫害等,这些都是目前的 DGVMs 还无法模拟的。本文中模式模拟没有考虑 CO_2浓度变化、人类活动、不同环境因子及其组合对植物 LAI 的影响,仅就若干可获取的气候因子对 LAI 的时空分布的影响进行了初步的分析。而且模式模拟 LAI 用的是 1950—1999 年的气候数据,而 MODIS 衍生数据来源于 2001—2003 年的 MODIS 产品,进一步的验证还要考虑此期间气候变化以及气象数据本身的准确性对 LAI 的影响。目前最迫切需要的是对 DGVMs 本身进行完善和发展(例如模拟农作物和灌溉),然后结合更准确的气象数据、更细致的局地观测对植被 LAI 的时空变化及其原因做深入的研究。

References:

[1] Dan L, Ji J J, Ma Z G. The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang Autonomous Region and its response to climate change. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3582-3592.

[2] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. Reviews of Geophysics, 2002, 40(2): 1006, doi: 10.1029/2001rg000103.

[3] Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, Oleson K W. The Community Land Model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): technical description and user's guide//NCAR Technical Note NCAR/TN-459+ IA. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2004: 54-54.

[4] Bonan G B, Levis S. Evaluating aspects of the community land and atmosphere models (CLM3 and CAM3) using a dynamic global vegetation model. Journal of Climate, 2006, 19(11): 2290-2301.

[5] Zeng X D, Zeng X B, Barlage M. Growing temperate shrubs over arid and semiarid regions in the Community Land Model - Dynamic Global Vegetation Model. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22: GB3003, doi:10.1029/2007GB003014.

[6] Zeng X D. Evaluating the dependence of vegetation on climate in an improved Dynamic Global Vegetation Model. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(5): 977-991.

[7] Qian T T, Dai A G, Trenberth K E, Oleson K W. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: forcing data and evaluations. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7: 953-975.

[8] Myneni R B, Hoffmana S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassyc J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R, Running S W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 214-231.

[9] Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM3.0). Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2007, 112(G1): G01023010, doi: 10.01029/02006JG000168.

[10] Xie H L, Liu L M, Li B, Zhang X S. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: a case study in Ongniud Banner, Inner Mongolia. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(4): 389-400.

[11] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. Biometrika, 1950, 37(1/2): 17-23.

[12] Cliff A D, Ord J K. Spatial Processes: Models and Applications. London: Pion Limited, 1981: 63-65.

[13] Wang F M, Tian Q J. Response to temperature and precipitation of vegetation MODIS-LAI. Remote Sensing Information, 2006, (2): 34-46.

[14] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, Moore B III. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. Science, 1997, 278(5339): 870-873.

[15] Dan L, Ji J J, He Y. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112: D02S90, doi: 10.1029/2006JD007721.

参考文献:

[1] 丹利, 季劲钧, 马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应. 生态学报, 2007, 27(9): 3582-3592.

[10] 谢花林, 刘黎明, 李波, 张新时. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例. 地理学报, 2006, 61(4): 389-400.

[13] 王凤敏, 田庆久. 植被 MODIS-LAI 的温度降水响应. 遥感信息, 2006, (2): 34-46.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 16 August, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination ····· WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
Light response of photosynthesisand its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions ····· LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field ····· QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves ····· WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fuju, et al (4517)
Comparative physiological responses of cadmium stress on *Enteromorpha clathrata* and *Enteromorpha linza* ····· JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
Effects of salt stress onglucosinolate contents in *Arabidopsis thaliana* and *Thellungiella halophila* rosette leaves ····· PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field ····· GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia ····· DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
Seed characteristics and seedling growth of *Spartina alterniflora* on coastal wetland of North Jiangsu ····· XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model ····· TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats ····· ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current ····· ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in theYangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area ····· ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary ····· MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
Population age structure of Antarctic krill *Euphausia superba* off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey ····· ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province ····· MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems ····· WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
The nitrate-nitrogen leachingamount in paddy winter-spring fallow period ····· WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake ····· NI Zhaokui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
Effect of partial solar eclipse on airborneculturable bacterial community in Urumqi ····· MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in *Laodelphax striatellus* (Fallen) and *Nilaparvata lugens* (Stål) ····· LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear (*Helarctos malayanus*) in captivity ····· LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)
Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River ····· HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, *Bretschneidera sinensis* ····· QIAO Qi, QIN Xinsheng, XING Fuwu, et al (4709)
Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress ····· DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors ····· SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency ····· HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)

Review and Monograph

The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement ····· CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
Indicators for evaluating sustainable communities: a review ····· ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)

Discussion

Differential expression of *PAL* multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions ····· FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)

Scientific Note

Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay ····· WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration ····· DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics ····· LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
Study on sap flow in forest of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* by using the TDP method ····· SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
N_2O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China ····· SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

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 31 卷　第 16 期　（2011 年 8 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 16　2011

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　冯宗炜
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
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

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 FENG Zong-Wei
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 70.00 元