

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



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 30 卷 第 22 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价 ·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 ·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南 2 种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响 ·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园 4 种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京 PM _{2.5} 、NO _x 、CO 的动态特征及影响因素 ·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征 ·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便 DNA 的马鹿种群数量和性比 ·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征 ·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应

王盛萍¹, 张志强^{2,*}, 张建军³, 朱金兆^{2,3}, 郭军庭², 唐寅²

(1. 华北电力大学中加能源与环境研究院, 北京 102206; 2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 吉县 042200)

摘要:研究流域次生植被物种对地形因子的响应规律, 识别影响次生植被物种分布的主要地形因子, 是流域近自然植被生态恢复和重建的基础。采用 ArcGIS 空间分析模块和地形分析模块 TauDEM, 并与统计软件 SPLUS2000 中的 GRASP 工具相结合, 建立了位于黄土高原残塬沟壑区山西省吉县蔡家川流域次生植被各个物种分布基于地形因子的广义相加模型 (GAM)。模型中的地形因子包括: 海拔、坡向、坡度、平面曲率、坡位指数 (SPI)、地形湿度指数 (TWI)、单宽汇水面积 (SCA) 等。受试者操作特征曲线 (ROC) 测试中 AUC 值表明: 大部分测试物种 (约 62%) 拟合模型效果较好, 且模型较为稳定。总体来看, 研究流域次生植被物种分布体现了水分限制的空间分异特征: 阴坡各物种分布概率较大, 且随海拔升高而减小。影响研究流域次生植被物种空间分布的潜在重要因子为海拔和坡向, 而单宽汇水面积 (SCA) 和地形湿度指数 (TWI) 虽然是多个物种响应模型的预测因子, 但受高一级尺度海拔的影响, SCA 与 TWI 对物种分布的影响作用较小; 坡度影响作用最小。据此, 在流域植被恢复和防护林建设目标区选择及立地条件划分时应首先以海拔和坡向为依据, 单宽汇水面积 (SCA) 和地形湿度指数 (TWI) 则可以作为次一级立地分类依据, 而坡度则仅能作为最后一级的分类依据。

关键词: GAM 模拟; 地形因子; 次生植被物种; 响应变化

Modeling the effects of topography on the spatial distribution of secondary species in a small watershed in the Gully region on the Loess Plateau, China

WANG Shengping¹, ZHANG Zhiqiang^{2,*}, ZHANG Jianjun^{2,3}, ZHU Jinzhao^{2,3}, GUO Juntong², TANG Yin²

1 Sino-Canada Research Academy of Energy and Environmental Studies, North-China Electric Power University, Beijing 102206, China

2 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 National Field Research Station of Forest Ecosystem, Jixian 042200, China

Abstract: It is important to study how secondary species responds to topography-induced environmental changes and to identify dominant topographic factors that affect the spatial distribution of secondary species. The basic information is essential for prioritizing ecological restoration area.

By using the GRASP utilities of SPLUS2000, we developed the GAM model for each secondary species of Caijiachuan watershed on the basis of the topographic variables that was calculated by using both spatial analysis packages of ArcGIS9.2 and the TauDEM. The topographic indexes included elevation, aspect, slope, plan curvature, slope position index (SPI), wetness index (TWI), and specific catchment area (SCA). The vegetation information for thirteen selected secondary species was extracted from Quickbird imageries. To establish the GAM models, we used 1 to represent the presence of each specific species, and 0 to represent the absence. Generally, a total of 3927 sample points recording both topographic information and the corresponding vegetation information were employed to build the GAM models of the specific species. The results show that most of the established models performed well, with the AUC values being higher than 0.7. Moreover, the models were stable as the AUC values were similar between the validation and the cross-validation test. In spite of the small difference in the form of GAM models between the herbaceous species and shrub species, both elevation

基金项目: 国家“十一五”林业科技支撑计划资助项目 (2006BAD03A0202); 华北电力大学博士学位教师科研基金资助

收稿日期: 2010-02-24; **修订日期:** 2010-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

and aspect were influential in controlling spatial distributions of the secondary species. The spatial distribution of the secondary species generally follows the spatial pattern of the water availability, showing a higher probability of the occurrence of specific species on the shady slopes and lower elevation area. Due to the effect of large-scale topographic variables such as the elevation, both specific catchment area (SCA) and wetness index (TWI) that reflects micro-scale had less influence on the spatial distribution of the species. Slope was considered as the least importance. We conclude that vegetation restoration in the Loess area should follow the spatial distributions of secondary species and take into account the spatial variability of water availability. According to the potential of the topographic variables in affecting the spatial distribution of vegetation, both elevation and aspect should be considered as the principle factors in identifying the target area for vegetation construction and in site suitability assessment. Both specific catchment area (SCA) and wetness index (TWI) should be considered as the secondary factors, whereas slope should be considered as the last factor.

Key Words: GAM; topographic variables; spatial distribution; secondary species

植被建设是黄土高原生态恢复的主要手段。为改善区域恶劣的生态环境,有效控制土壤侵蚀,“三北防护林”和“退耕还林还草”等工程建设相继实施。但是,该区“小老树”、“低产低效林”等问题仍然普遍存在。尽管已有的关于植物物种生态学特性的认识可为植被建设树种选择或目标区选择提供定性参考依据,但仍然不能为植被空间配置提供定量依据。“适地适树”强调了立地与物种选择的匹配性,但其并非意味着“适地适林”^[1],从生态学角度看,有效的植被恢复应基于群落生态学原理。较多学者对于区域植被建设的水分限制特征形成共识,探讨了依据降水确定区域植被覆被率^[2]、确定地带性植被等^[3-4]。但是,流域尺度植被空间布局设置如何考虑水分限制分异等特征仍然没有确定性的方法,仅仅基于“适地适树”以及“水分限制”等认识并不能完全解决黄土高原植被恢复存在的许多问题。在植被恢复中,除遵循上述原则或资源限制以外,同时有必要以不受人为干扰的植被潜在分布作为参考依据。植被分布预测分析植被与环境的响应变化关系,是植物生态学的中心问题之一^[5],对于生态恢复目标区的选择、目标物种的选择、以及生态恢复潜力评价等均具有重要意义^[6],因此,应作为黄土高原植被恢复的重要内容加以探讨。

关于植被分布模拟预测或植被-环境响应变化关系,国内外学者已做了大量研究。传统植被数量分类与排序作为植物生态学的重要内容,可有效揭示群落分布格局以及群落与环境的变化关系。应用典范对应分析(CCA),相关研究^[7]探讨识别了贺兰山西坡植被影响群落分布的不同环境梯度。并有研究^[8]应用CA排序对黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被群落与土壤养分、水分以及地形因子等环境梯度进行了相关分析。此外,主成分分析(PCA)、主坐标分析(PCOA)、除趋势对应分析(DCA)、典范对应分析(CCA)以及除趋势典范对应分析(DCCA)等亦被广泛应用于植被群落演替阶段划分、植被区划、景观生态学、植被与环境关系等领域。近年来,潜在植被分布研究亦日益引起学者广泛关注,被认为是区域植被恢复的目标方向^[5-6]。除了布尔运算方法以外,分类回归树、神经网络、逻辑斯蒂回归模型、贝叶斯方法、广义线性模型(GLM)和广义相加模型(GAM)等被广泛应用于植被预测模拟研究^[9]。此外,一些相对成熟的物种分布模型,如:生态位因子分析(ENFA)、生物气候分析(BIOCLIM)、GARP模型、HABITAT模型、DOMAIN模型以及MAXENT等被普遍应用于物种适宜性模拟及预测^[10-12]。相关研究^[5]曾界定不同草地覆盖度的生境空间,并根据生境空间的边界函数对草地植被潜在分布进行模拟预测;并有研究^[6]运用广义相加模型建立了延河流域24种地带性物种的分布模型和种群潜在分布格局;此外,有研究^[10]应用GARP模型、DOMAIN模型、BIOCLIM模型以及ENFA模型分别模拟并比较了黄土高原区典型植被群落潜在分布,为植被恢复目标区设定及恢复规划提供了重要参考依据。

流域作为防护林体系建设的中间尺度^[13],其建设的有效性对于植被恢复具有重要意义,有必要基于次生植被物种分布的认识指导流域植被建设,为流域植被恢复、生态恢复提供科学依据。由于黄土高原区域降水空间分布因海拔变化的变异特征较小^[14],在流域尺度研究中地形相对于降水等气候因子更具有重要意义。

地形因子集中反映了流域尺度空间分异特征,被证明足以有效揭示植被生境适宜性,并可有效反映植被空间分布格局^[15-16]。与此同时,地形作为流域尺度相对便于获得的环境变量,基于地形进行植被潜在分布格局模拟与预测理论上更具有吸引力^[17]。国内外学者基于地形因子对植被潜在分布格局已进行了成功模拟与预测^[18-20]。

黄土高原植被受人干扰影响较大,虽然未能判断研究流域植被是否达演替终态,但其中次生植被物种一定程度反映了环境变化的响应特征,探讨物种分布与环境因子梯度变化关系具有重要意义。因此,本研究针对黄土残塬沟壑区小流域次生植被物种分布,采用地形因子对其进行模拟预测,研究目的在于:(1)分析流域次生植被物种分布与地形因子变化响应关系;(2)识别影响流域次生植被物种分布的主要地形因子;(3)探讨次生植物物种分布特征对于流域植被恢复的指导意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于晋西黄土残塬沟壑区、吕梁山南端山西吉县蔡家川流域(E110°39'45"—E110°47'45", N 36°14'27"—N 36°18'23"),属于暖温带落叶阔叶林向森林草原的过渡地带,流域面积 40.1 km²,海拔变化范围 904—1592 m。流域多年平均降水 579 mm,降水季节性较强,约 70% 降水集中分布于 6 月至 9 月份,多年平均水面蒸发 1729 mm,年均气温 10℃。流域土壤为褐土,黄土母质。除刺槐、油松、侧柏等人工林以外,流域上游及中游分布有大面积次生植被,包括:辽东栎、白桦、山杨等,灌丛主要有荆条、黄刺玫、沙棘、虎榛子、绣线菊以及丁香等,而下游则多为疏林、荒草地和农地等。

1.2 GAM 模型

研究采用广义相加模型 (generalized additive modeling, GAM), 基于 SPLUS2000 软件平台,应用其中 GRASP (generalized regression and spatial prediction)^[21] 模块对各物种在特定地形条件下出现的概率进行模拟预测。其中,响应变量为次生植物各物种出现及缺失 (分别记为 1 和 0), 预测变量为相应地形因子。

GAM 为非参数统计模型,是 GLM 模型 (generalized linear modeling) 的扩展形式。GLM 模型通过联结函数 $g(\cdot)$ (如:逻辑函数 logit 或对数函数 logarithm) 将传统回归模型拓展应用于具有其它分布特征 (如:二项分布、泊松分布、伽马分布、负二项分布) 的研究数据 (模型如式 1), 而 GAM 模型虽然仍通过联结函数建立响应变量与预测变量的线性关系,但其函数组分为更具灵活性和包容性的非参数平滑函数, GAM 模型如式 (2) 所示。由于 GAM 无需指定特定形式的参数模型 (如: $ax + bx^2$), 对变量的数据类型和统计分布特征适应性更为广泛^[22-23], 具有处理环境影响因子与响应因子间非线性或非单调函数关系的能力^[24], 并使得拟合统计模型与生态学理论更具有有一致性^[25]。

设置 GAM 模型参数时,选择响应变量为 quasi 二项分布,为避免变量间共线性,以相关性小于 60% 的预测变量进行模型模拟,预测变量平滑函数自由度设置为 4,并以逐步回归机制,采用 F 检验,在显著水平 α 为 0.05 条件下选择确定最佳拟合模型。GRASP 除可产生基于各环境因子的物种分布拟合模型,输出各植物物种随环境因子的响应变化曲线,同时,可分析预测变量对模拟预测影响的大小,并可将预测模型导入查询表,在 Arcview 平台下进行空间预测。

$$g(E(Y)) = \alpha + X^T \beta \quad (1)$$

$$g(E(Y)) = \sum s(x_i) \quad (2)$$

式中, α 、 β 分别相当于线性回归模型中的截距和回归系数矩阵, X^T 表示预测变量矩阵, $E(Y)$ 为响应变量 Y 的期望, $g(\cdot)$ 表示联结函数, 而 $s(\cdot)$ 表示平滑函数。

1.3 数据获取

1.3.1 植被数据

GAM 模型的有效建立有赖于大量植被数据的获取。野外样方调查能保证植被样方的精确空间定位及地形相关信息,但调查较为耗时费力,且不能保证足够的样本数量,模拟预测一定程度将受严重影响。因此,研

究中植被信息根据遥感解译生成的土地利用与植被分布数据提取。于 2003 年暑期开展样线、样地等野外调查,并获取蔡家川流域 2003 年 10 月 21 日 QuickBird 影像,人机交互判读室内校核野外调查地类图斑,并于 2004 年 5 月和 2004 年 10 月至 11 月现地抽样调查进行验证。研究中各地类与植被分布解译总体精度可达 87%。QuickBird 空间分辨率全色波段影像为 0.61m,从遥感影像上可清晰分辨目标区植物种信息,解译数据同时记录了各小班树种组成、主要灌木、优势种、郁闭度等。为减少人为干扰影响,提取流域次生树种山杨、辽东栎、栎树以及灌木树种丁香、荆条、沙棘、胡枝子、黄刺玫等 10 余种植物种空间分布信息。具体信息提取步骤如下:将上述植被空间分布矢量数据转变为栅格数据,栅格单元 25m×25m,以 1 和 0 分别记录各栅格单元某植物种存在或不存在信息;以 100m 为间距,生成流域规则矢量点位数据;将生成的规则矢量点位数据图层与上述物种分布栅格数据图层叠置,确定各规则点位对应的植物种空间分布属性。由此,提取蔡家川流域 3927 个点位的数据信息,各点位分别记录不同植物种存在及不存在的相关信息,作为 GRASP 模拟分析的响应变量。表 1 为各物种提取信息记录。

表 1 蔡家川流域次生植被各物种提取信息记录

Table 1 Info on the selected species for GRASP analysis of Caijiachuan catchment

物种 Species	存在 Presence	不存在 Absence	物种 Species	存在 Presence	不存在 Absence
山杨 <i>Populus davidiana</i>	653	3274	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i> Koidz	1790	2137
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm	100	3827	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn	687	3240
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	361	3566	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i> Decaisne	1386	2541
黄栌 <i>Cotinus coggygris</i> var. <i>cinered</i>	1691	2236	黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> Lindl.	1592	2335
丁香 <i>Syringa oblata</i>	733	3194	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz	294	3633
杆柳 <i>Periploca sepium</i> Bunge	143	3784	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L.	378	3549
悬钩子 <i>Rubus corchorifolius</i> L. f.	31	3896			

1.3.2 地形因子

除海拔、坡度、平面曲率、坡向以外,研究同时选取坡位指数(SPI)、地形湿度指数(TWI)以及单宽汇水面积(SCA)作为 GAM 分析的预测变量。其中,地形湿度指数用以表示恒定水流条件下变动源产流区的空间分布和范围^[26],反映了地表趋于饱和的灵敏度^[27],而单宽汇水面积则反映了栅格单元潜在地表径流强度^[28]。借助上述各项地形因子指标,研究试图反映各栅格单元潜在土壤水分条件、地表水文条件及光照条件。坡度、坡向以及平面曲率等地形因子直接采用 ArcGIS9.2 空间分析模块(Spatial analysis)基于栅格单元为 25m×25m 的流域 DEM 提取。坡向从指北针方向顺时针依次定义为:北、东北、东、东南、南、西南、西、西北。坡位指数和地形湿度指数采用 Topographic Position Index 模块提取,依据高程残差分析,将流域大致划分为沟谷,下坡,中坡,上坡,山脊 5 类;而单宽汇水面积(SCA)则根据 TauDEM 模块(<http://www.engineering.usu.edu/dtarb/taudem>)提取,计算为上坡汇水单元格数目与单元格大小乘积。为有效反映各植物物种随 SCA 变化的响应曲线,GRASP 分析中 SCA 仅取值表示为上坡汇水单元格数。表 2 表示了 GRASP 分析各地形因子取值大小。

2 结果

2.1 拟合 GAM 模型及检验

根据上述模型参数设置,建立研究流域次生植被物种分布模型,拟合模型如表 3 所示。由于地形湿度指数与平面曲率显著相关(复相关系数 R^2 为 0.66),为避免共性影响,模型建立时设置选择以其中的地形湿度指数作为预测变量。从表中可以看出,各物种 GAM 拟合模型预测变量具有一定差异。辽东栎、荆条以及悬钩子拟合模型保留了几乎所有测试的预测变量,而绣线菊则仅保留海拔、地形湿度指数(TWI)等变量。与其他地形因子如:坡度、坡向、平面曲率相区别,海拔几乎进入所有物种的 GAM 拟合模型。分别采用方差分析

表 2 蔡家川流域地形因子取值

Table 2 Topographic variables for GRASP analysis of Caijiachuan catchment

变量 Variable	类型 Type	均值/范围 Mean/range
海拔 Elevation	—	1174/900—1583
坡向 Aspect	北,东北,东,东南,南,西南,西,西北	—
坡度 Slope	—	22/0—41
平面曲率 Curvature	—	0/ -5—4
坡位指数 SPI	沟谷,下坡,中坡,上坡,山脊	—
地形湿度指数 TWI	—	0.008/0—0.03
单宽汇水面积 SCA	—	299/1—62667

表 3 蔡家川流域次生植被物种 GAM 拟合模型

Table 3 Fitted GAM model for the selected species of Caijiachuan catchment

物种 Species	拟合 GAM 模型 Fitted GAM model	D^2	AUC	
			交叉验证 Cross validation	单一验证 Validation
山杨 <i>Populus davidiana</i>	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(SCA, 4) + Aspect	0.216	0.801	0.821
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i> Koidz	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect + SPI	0.382	0.871	0.879
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, A) + Aspect	0.300	0.805	0.883
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	Probability ~ s (Elevation, 4) + (SCA, A) + Aspect	0.100	0.707	0.724
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect + SPI	0.115	0.679	0.735
虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i> Decaisne	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect + SPI	0.231	0.793	0.804
黄栌 <i>Cotinus coggygris</i> var. <i>cinere</i> d	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect + SPI	0.084	0.664	0.679
黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> Lindl.	Probability ~ s (Elevation, 4) + s (SCA, 4) + Aspect	0.053	0.631	0.646
丁香 <i>Syringa oblata</i>	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + Aspect + SPI	0.221	0.811	0.82
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + (SCA, 4)	0.111	0.696	0.734
杠柳 <i>Periploca sepium</i> Bunge	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect	0.111	0.638	0.758
绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L.	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(TWI, 4)	0.196	0.805	0.818
悬钩子 <i>Rubus corchorifolius</i> L. f.	Probability ~ s(Elevation, 4) + s(Slope, 4) + s(TWI, 4) + s(SCA, 4) + Aspect + SPI	0.489	0.822	0.965

以及受试者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线)交叉验证评价模型模拟性能(表 3)。其中,方差分析根据式(3)计算, D^2 反映了模型可解释的偏差;ROC 曲线(图 1)则反映了模型敏感度与特异性之间的平衡度,曲线下面积 AUC 独立于特定的临界值,被作为判断模型模拟精度的重要指标,AUC 变化在 0.5 至 1 之间,AUC 越大,则模型模拟精度越高^[29]。从表中可以看出,尽管各物种拟合模型 D^2 均较小,部分物种如:沙棘、荆条、黄栌、黄刺玫、胡枝子以及杠柳 D^2 甚至小于 0.15,表明仍存在有除地形以外的较大误差来源。但是,从 ROC 曲线看,流域各测试物种 GAM 模型预测判断效果整体较好,大部分测试物种(约 62%) AUC 值可达 0.7 以上,表明模型模拟性能较好^[30]。GAM 模型为数据驱动模型,不同数据测试将可能产生不同模拟结果,为此,应用交叉验证与单一验证辅助检验模型模拟稳定性。可以看出,除悬钩子、栎树、胡枝子

以及杠柳以外,其余物种交叉验证结果与单一验证结果较为接近,表明 GAM 拟合模型较为稳定。

$$D^2 = (ND - RD) / ND \quad (3)$$

式中, D^2 表示模型可解释的偏差, ND 表示拟合模型仅剩截距时的偏差,而 RD 则表示剩余偏差,当 D^2 为1时模型可完全解释响应变量。

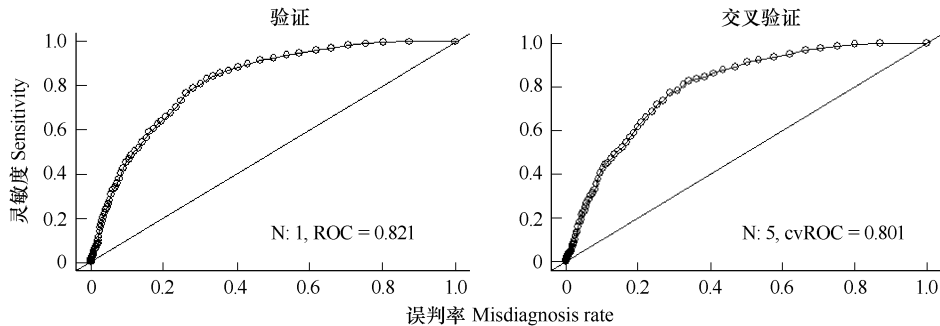


图1 蔡家川流域山杨(*Populus davidiana*) GAM 拟合模型 ROC 曲线示例

Fig. 1 ROC Curve for modelling *Populus davidiana* of Caijiachuan catchment with GAM model

2.2 物种随地形因子响应变化

根据各物种 GAM 拟合模型,对物种模拟预测随地形因子的响应变化进行分析(图2)。总体来看,各物种与地形因子响应关系如下:

山杨(*Populus davidiana*) 与海拔、坡度呈正相关关系。随海拔升高,分布逐渐增大,而后从海拔约1150m处表现出一定的平稳趋势;与地形湿度指数呈一定程度的负相关关系,随地形湿度指数增大,分布逐渐下降;而坡向上则表现出阴坡(North、NorthEast、NorthWest)分布较大。

辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz) 随海拔升高分布逐渐增大,而后从海拔约1150m处增大趋势减弱;与坡度呈一定程度正相关关系;阴坡分布最大,且主要分布于沟谷及下坡坡位。物种分布随其余因子变化趋势较不明显。

栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm) 与坡度呈正相关;随海拔升高分布逐渐增大,随后从海拔约1200m处分布呈下降趋势;物种整体在阳坡和半阳坡分布最大,而随地形湿度指数和单宽汇水面积则变化趋势相对较不明显。

沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.) 表现出在一定海拔(约1100m)范围分布较大的趋势;阴坡、半阴半阳坡均有一定分布。物种随单宽汇水面积变化趋势较不明显。

荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*) 随海拔升高,分布逐渐减少;各坡向有不同程度的分布,其中阴坡(North)分布相对较大。物种随其余地形因子变化趋势较不明显。

虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne) 与海拔、坡度呈正相关,随海拔、坡度上升,分布概率增大;阴坡和半阴坡均有一定的分布。物种随其余地形因子变化趋势较不明显。

黄栌(*Cotinus coggygris* var. *cinerea*) 随海拔升高分布逐渐增大,随后从海拔约1200m处稍显一定程度下降趋势;半阴坡、阴坡分布相对较大。物种随单宽汇水面积变化趋势较不明显。

黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.) 随海拔升高分布逐渐增大,而后从海拔约1150m处呈逐渐下降趋势;半阴坡及阴坡分布相对较大。物种随单宽汇水面积变化趋势较不明显。

丁香(*Syringa oblata*) 与坡度呈正相关关系;随海拔升高分布逐渐增大,随后从海拔约1200m处表现出一定的平稳趋势;而随地形湿度指数增加则呈现分布缓慢减小趋势;阴坡和半阴坡分布概率相对较大。

胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.) 随海拔升高分布逐渐增多,随后从海拔约1200m处表现出一定的平稳趋势;物种随其余因子变化趋势较不明显;

杠柳(*Periploca sepium* Bunge) 随海拔升高,分布逐渐增多;阴坡和阳坡均有较大分布。物种随其余因子

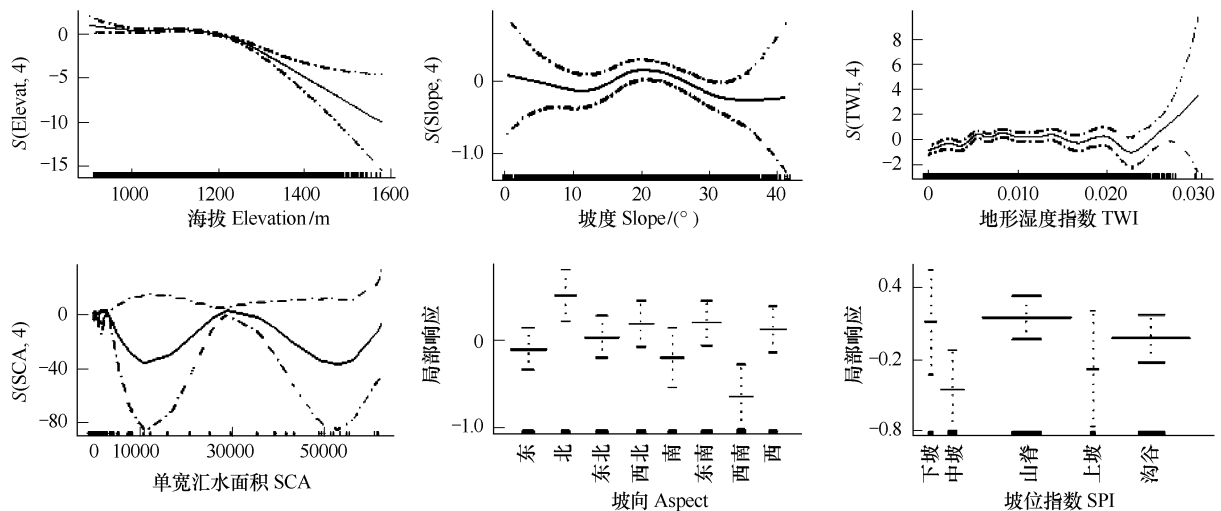


图2 蔡家川流域荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*) GAM 拟合模型随地形因子响应变化曲线

Fig. 2 Partial response curve of GAM model of *Vitex negundo* var. *heterophylla* to each selected topographic variables of Caijiachuan catchment

变化趋势较不明显。

绣线菊 (*Spiraea salicifolia* L.) 随海拔升高仍表现有分布显著增多的趋势,随后从海拔约 1350m 处稍显下降趋势;与地形湿度指数变化趋势较不明显。

悬钩子 (*Rubus corchorifolius* L. f.) 随海拔升高分布逐渐增大,而随坡度增加分布逐渐减小;不同坡向均有一定程度的分布概率,随其余因子变化趋势较不明显。

2.3 各地形因子贡献率分析

GRASP 同时提供了不同预测因子对物种模拟预测的影响作用分析。表 4 反映了蔡家川流域次生植被各物种不同预测因子潜在影响作用,表示为单独应用各预测因子模型可解释的偏差。尽管不同物种 GAM 拟合模型包含有不同预测变量,但总体来看,在所有检测物种中,海拔显示了其对物种分布的潜在重要影响,且不同物种模拟预测中各因子的影响作用表现有不同排序。其中,辽东栎、山杨,以及丁香、黄刺玫、悬钩子分布预测除受海拔的绝对影响以外,坡向影响作用也相对较大,其次为单宽汇水面积 (SCA) 和地形湿度指数 (TWI),但二者绝对值较小,而坡位、坡度影响作用最小。栎树、杠柳等物种呈现海拔、单宽汇水面积 (SCA)、地形湿度指数 (TWI)、坡向等影响作用依次减小的特征,坡度影响作用仍然最小。而沙棘、荆条、虎榛子、胡枝子、绣线菊等则整体显示海拔的绝对影响作用,其余因子虽然也呈现不同程度的影响作用,但绝对值甚小。分析认为,上述各物种地形因子影响作用的差异总体体现了不同生活型植被对生境环境要求的差异。区别于低矮灌木,乔木树种以及高大灌木往往水分需求较高,对生境条件要求也更为苛刻,这导致该类物种分布模拟预测时往往主导影响因素较多。而低矮灌木则对生境条件要求相对较宽,通常可分布于流域大部分区域,特别是当流域面积较小时更不易辨析出物种主要分布区域,因此,模拟预测时具有重要潜在影响作用的因子相对较少。

3 讨论

3.1 各地形因子的尺度效应

研究流域面积较小,海拔梯度变化仅涉及 900 至 1592m。依据植物物种生态学特性,流域海拔变化似乎并不足以揭示物种分布随海拔梯度的响应变化特征。然而,在流域物种分布模拟预测中,海拔显现了其绝对主导控制因素。海拔变化可影响土壤水分变化、土壤深度变化,对于梯度变化较大的山地生态系统,海拔同时可影响气候特征变化。预测因子中坡度、坡位指数等虽然也部分反映流域土壤水分条件的差异,但正如有关研究^[23]所指出,海拔的绝对尺度往往较坡度、坡位等要大,使得海拔梯度的影响作用往往代替或掩盖了其余

表 4 蔡家川流域各预测因子潜在影响作用

Table 4 Potential contribution (Alone) of topographic variables for modeling selected species with GAM model

物种 Species	海拔 s(Elevation, 4)	坡度 s(Slope, 4)	地形湿度指数 s(TWI, 4)	单宽汇水面积 s(SCA, 4)	坡向 Aspect	坡位指数 SPI
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i> Koidz	1373.44	16.60	64.27	91.27	202.51	54.96
山杨 <i>Populus davidiana</i>	307.23	21.07	62.24	66.12	239.24	NA
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm	101.13	3.50	66.08	79.70	32.29	NA
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	265.80	NA	NA	49.99	52.84	NA
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	172.56	5.68	29.37	22.84	25.42	9.55
虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i> Decaisne	948.09	54.01	22.41	50.00	68.11	NA
黄栌 <i>Cotinus coggygris</i> var. <i>cinered</i>	325.18	NA	NA	38.65	87.78	6.48
黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i> Lindl.	165.58	NA	NA	43.24	94.44	NA
丁香 <i>Syringa oblata</i>	416.38	22.91	75.21	NA	201.59	NA
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	186.22	6.11	NA	28.12	NA	NA
杠柳 <i>Periploca sepium</i> Bunge	48.11	11.46	22.17	32.36	13.75	NA
绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> L.	462.08	NA	35.54	NA	NA	NA
悬钩子 <i>Rubus corchorifolius</i> L. f.	106.05	13.43	19.89	14.42	25.10	3.89

注:“NA”表示值为空或不存在

梯度因子。尽管本研究流域海拔变化并不有效反映气候特征变化,但海拔总体传递了流域土壤水分条件的梯度变化信息,这对于受水分限制的黄土高原区域植被来说具有至关重要的生态意义,研究中荆条、沙棘、黄栌、黄刺玫、栎树、绣线菊等均表现出随海拔上升分布下降的趋势。因此,海拔被识别为影响流域次生植被物种分布的潜在重要影响因素。与海拔相区别,地形湿度指数(TWI)与单宽汇水面积(SCA)直接反映了地表水文条件,对物种分布理论应具有重要影响,然而模型模拟并未有效揭示其对大部分物种的潜在重要影响作用。虽然大部分物种 GAM 模型包含了 TWI 与 SCA 地形因子(表 3),但二者潜在贡献绝对值往往相对较小(表 4)。对此,研究认为部分与不同因子的尺度效应相关。TWI 与 SCA 同样仅反映小尺度环境梯度特征,当存在有海拔这一较大绝对尺度时,很可能被海拔的环境梯度效应所掩盖,导致其对物种分布模拟的潜在重要影响作用较不容易识别。而坡向与海拔梯度变化相似,反映的是较大绝对尺度的环境梯度信息,直接影响了立地的光照条件,从而影响土壤水分变化等特征。因此,对于水分条件要求更为严格的乔木树种或高大灌木,其物种分布模拟往往体现了坡向的潜在重要影响作用,这与有关研究结论具有相似性^[31]。

3.2 模型模拟误差来源及不确定性

GAM 模型的有效建立依赖于对物种分布的真实反映,“伪”不分布数据(Pseudo-absence)的采用对模型模拟往往具有重要影响^[32-33]。研究中所采用的 Pseudo-absence 数据基于 Quickbird 遥感影像解译生成的土地利用与植被分布矢量数据提取。解译时不同土地利用与植被分类的总体精度高达 87%,并且同一斑块内可详细辨认树种组成、主要灌木、优势种、郁闭度等(Quickbird 遥感影像全色波段空间分辨率可达 0.61m),因此,从数据基础来看,可保证 Pseudo-absence 数据对流域现状植被分布的真实反映。另一方面,研究中草地、农地以及幼林地等土地利用因人为干扰而未出现次生物种或灌木树种,尽管这很可能影响对物种分布规律的辨识,但该类土地利用占流域面积范围较小,仅约 26%,因此,认为其对植物种(次生乔木、灌木)分布的影响较为有限,对模型模拟误差影响相对较小。模型模拟误差主要来源于部分物种分布与地形未能有效对应。研究中地形因子基于栅格单元为 25m×25m 的 DEM 提取。尽管 Quickbird 遥感影像分辨率较高,但植物种信息的提取基于解译生成的矢量数据,该矢量数据逐一记录面积大小不等的各小班信息,这意味着物种分布信息的提取势必受斑块均质这一前提假设所干扰。虽然灌木树种的选取一定程度可保证物种分布在斑块内的相对均一性,并且该均质假设对于面积较小小班植被分布与 DEM 地形的有效对应影响较小,但对于面积较大的小班,信息提取(也即植被分布)将因为忽略考虑斑块内异质性而产生较大不确定性,这进而将导致物种分布不

能与分辨率为 25m 的 DEM 有效对应。尽管此时物种受大尺度地形因子,如海拔、坡向等干扰较小但物种对小尺度地形因子如:SCA 与 TWI 的响应变化将受到影响,这也部分解释了前文中 SCA 与 TWI 在模型模拟中影响作用相对较小等原因。研究认为,采样间距的增大一定程度将有助于减少斑块信息均质的干扰,从而有助于减少物种分布信息提取的不确定性,这有待于进一步改善数据质量以进行验证探讨。

3.3 对流域植被建设的指导意义

研究中次生植被物种对地形因子的响应总体体现了水分限制影响植被分布的特征。坡向直接反映了光照条件的生境差异。尽管部分物种从其生态学特性看具有喜光特性,如黄栌、黄刺玫等,但模拟预测中包括其在内的较多物种具有阴坡或半阴坡分布较大等响应特征,这体现了因辐射不同所影响的水分差异对物种分布的重要影响。从具有绝对潜在影响作用的海拔梯度因子看,较多物种模拟预测时也呈现随海拔升高分布下降的趋势,其中包括荆条、沙棘、栎树、黄刺玫、黄栌、绣线菊等,反映了物种分布对于低海拔地段所具有的良好土壤水分生境的依赖性。研究认为:黄土高原植被建设或植被恢复必须遵循同次生植被或潜在植被相似的分布规律,以水分限制为核心确定植被的最佳覆盖率及空间格局。

研究中地形因子贡献率分析总体揭示了海拔对物种分布的绝对影响作用,其次为坡向,地形湿度指数与单宽汇水面积影响作用相对较小,而坡度则影响作用甚小。这对于植被建设具有重要指导意义。如前文所述,海拔与坡向相对于坡度、平面曲率等往往具有较大的绝对尺度,往往会掩盖或代替其余因子影响,其生态意义更为显著,因此,流域植被建设,如:流域防护林空间配置目标区选择应以海拔因子和坡向因子作为首选依据,这证实了以往防护林空间配置研究中以海拔和坡向作为立地分类的合理性。受高一级尺度因子如:海拔、坡向的影响,单宽汇水面积(SCA)与地形湿度指数(TWI)贡献率相对较小,但二者仍进入较多物种的 GAM 模拟模型,表现了其对物种分布的一定的潜在影响。因此,SCA 与 TWI 可以作为局地尺度因子有效辅助识别不同立地环境特征,流域防护林空间配置目标区的选择及立地划分此时可以以 SCA 和 TWI 作为低一级的分类依据。而坡度因子则对物种分布预测影响作用整体最小,仅能作为立地划分或目标区域选择的最后一级分类依据。

4 结论

研究对黄土残塬沟壑区小流域蔡家川次生植被进行了物种分布模拟预测。通过提取流域各地形因子包括:海拔、坡向、坡度、坡位指数(SPI)、单宽汇水面积(SCA)、地形湿度指数(TWI)、平面曲率等,并基于遥感影像 Quickbird 生成的植被分布矢量数据提取次生植被物种空间分布信息,采用 SPLUS2000 的 GRASP 模块建立了 GAM 物种分布预测模型,研究流域较多物种模型模拟 AUC 值可达 0.7 以上,模型模拟性能较好,且较多物种交叉验证与单一验证结果较为接近,模型较为稳定。

尽管不同物种 GAM 模型包含有不同预测因子,且各因子在不同物种中具有不同影响作用,但整体来看,研究流域影响次生植被分布的潜在重要影响因子为海拔和坡向,较多物种呈现阴坡分布较大,且随海拔升高分布下降的趋势特征;单宽汇水面积(SCA)与地形湿度指数(TWI)也具有一定程度潜在影响作用,但绝对值较小;而坡度因子则影响作用甚小。研究认为,物种分布对各地形因子的响应模拟总体反映了水分限制影响黄土高原区域植被分布的重要特征,黄土高原植被建设必须遵循相似于次生植被的潜在分布格局,充分考虑流域水分条件的空间分异。研究指出,在流域植被建设或防护林建设过程中,目标区选择或立地划分应以海拔和坡向作为首选依据,单宽汇水面积(SCA)和地形湿度指数(TWI)等可作为次一级分类依据,而坡度对物种分布生态意义较小,仅能作为最后一级分类依据。

References:

- [1] Liang Y M. Discussing issues about establishing vegetation on Loess Plateau according to the law of community. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999, 19: 26-31.
- [2] Wu Q X, Zhao H Y. Hydro-ecologica effects of forest and suitable index of vegetation coverage. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20: 32-34.

- [3] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26: 339-345.
- [4] Yu W D, Min Q W, Li X G. The features of precipitation in the Loess Plateau and its possible impacts on vegetation distribution. *Resource Science*, 2002, 24: 55-60.
- [5] Zhao C Y, Feng Z D, Nan Z R, Li S B. Modelling of potential vegetation in Zulihe River Watershed of the West-central Loess Plateau. *Acta Geographic Sinica*, 2007, 62: 52-61.
- [6] Wen Z M, Hao X H, Jiao F, Jiao J Y. The predictive distribution of *Stipa bungeana* in Yanhe River catchment: GAM model and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28, 192-201.
- [7] Zheng J G, Dong D P, Zhao D H, He M Z, Li X R. Relationship between vegetation community characteristics and its environmental factors in the west slope of Helan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28: 4559-4567.
- [8] Bai W J, Jiao J Y, Ma X H, Wen Z M, Jiao F. Classification and ranking of the forae naturally recuperating on the farming-withdrawn land in the Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25: 1317-1322.
- [9] Franklin J. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 1995, 19: 474-499.
- [10] Zou S B. Potential Vegetation Modeling in the Chinese Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [11] Xu X T, Yang Y, Wang L S. Geographic Distribution and Potential Distribution Estimation of *Pseudotaxus Chienii*. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(5): 1134-1145.
- [12] Zhang Z D, Zang R G. Predicting potential distributions of dominant woody plant key stone species in a natural tropical forest landscape of Bawangling, Hainan Island, south China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1079-1091.
- [13] Wang S P, Zhang Z Q, Zhang H Y, Sun G. Restoration ecology and ecohydrology sciences: the basis for construction of protection forests on the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 30(9): 2475-2483.
- [14] McVicar T R, Van Niel T G, Li L T, Hutchinson M F, Mu X M, Liu Z H. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences. *Journal of Hydrology*, 2007, 338: 196-220.
- [15] Fontaine M, Aerts R, Özkan K, Mert A, Gülsoy S, Stiel H, Waelkens M, Muys B. Elevation and exposition rather than soil types determine communities and site suitability in Mediterranean mountain forests of southern Anatolia, Turkey. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247: 18-25.
- [16] Badano E I, Cavieres L A, Molina-Montenegro M A, Quiroz C L. Slope aspect influences plant association patterns in the Mediterranean matorral of central Chile. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62: 93-108.
- [17] Janet F. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of bio-spatial pattern in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 1995, 19: 474-499.
- [18] Hirsch B. Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models. *Ecological Modelling*, 2003, 168: 267-282.
- [19] Garcia-Aguirre M C, Ortiz M A, Zamorano J J, Reyes Y. Vegetation and landform relationships at Ajusco volcano Mexico, using a geographic information system (GIS). *Forest Ecology and Management*, 2007, 239: 1-12.
- [20] Hu Z W, Shen Z H, Lu N, Zhao J, Li D X, Chen H, Wang G F. Impacts of topography on the spatial pattern of the age of forest community. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31, 814-824.
- [21] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, 2002, 157: 189-207.
- [22] Austin M P, Meyers J A. Current approaches to modeling the environmental niche of eucalypts: implication for management of forest biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 1996, 85: 95-106.
- [23] Shen Z H, Zhao J. Prediction of the spatial patterns of species richness based on the plant-topography relationship: an application of GAMs approach. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27: 953-963.
- [24] Guisan A, Thomas C, Edwards Jr, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modeling*, 2002, 157: 89-100.
- [25] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modeling. *Ecological Modeling*, 2002, 157: 101-118.
- [26] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24: 43-69.
- [27] Del Barrio G, Alvera B, Puigdefabregas' J, Diez C. Response of high mountain landscape to topographic variables: Central Pyrenees. *Landscape Ecology*, 1997, 12: 95-115.

- [28] Moore I D, Turner A K, Wilson J P, Jenson S K, Band L E. GIS and land surface-subsurface process modelling//Goodchild M F, Parks B O, Steyaert L T eds. Geographic Information Systems and Environmental Modeling. New York: Oxford University Press, 1993.
- [29] Fielding A, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 1997, 24(1): 38-49.
- [30] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240: 1285-1293.
- [31] Resler L, Butler D, Malanson G P. Topographic shelter and conifer establishment and mortality in an alpine environment, Glacial National Park, Montana. Physical Geography, 2005, 26: 112-125.
- [32] Zaniewski A E, Lehmann A McC, Overton J. Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns. Ecological Modeling, 2002, 157: 261-280.
- [33] Tsoar A, Allouche O, Steinitz O, Rotem D, Kadmon R. A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution. Diversity and Distribution, 2007, 13(4): 397-405.

参考文献:

- [1] 梁一民. 从植物群落学原理谈黄土高原植被建造的几个问题. 西北植物学报, 1999, 19: 26-31.
- [2] 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标. 水土保持通报, 2000, 20: 32-34.
- [3] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. 植物生态学报, 2002, 26: 339-345.
- [4] 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 黄土高原地区降水资源特征及其对植被分布的可能影响. 资源科学, 2002, 24: 55-60.
- [5] 赵传燕, 冯兆东, 南忠仁, 李守波. 黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究. 地理学报, 2007, 62: 52-61.
- [6] 温仲明, 赫晓慧, 焦峰, 焦菊英. 延河流域本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 分布预测——广义相加模型及其应用. 生态学报, 2008, 28: 192-201.
- [7] 郑敬刚, 董东平, 赵登海, 何明珠, 李新荣. 贺兰山西坡植被群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2008, 28: 4559-4567.
- [8] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 温仲明, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序. 西北植物学报, 2005, 25: 1317-1322.
- [10] 邹松兵. 中国黄土高原潜在植被模拟. 兰州大学, 2006.
- [11] 徐晓婷, 杨永, 王利松. 白豆杉的地理分布及潜在分布区估计. 植物生态学报, 2008, 32(5): 1134-1145.
- [12] 张志东, 臧润国. 海南岛霸王岭热带天然林景观中主要木本植物关键种的潜在分布. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1079 - 1091.
- [13] 王盛萍, 张志强, 张化永, 孙阁. 黄土高原防护林体系建设的恢复生态学与生态水文学基础. 生态学报, 2009, 30(9): 2475-2483.
- [20] 胡志伟, 沈泽昊, 吕楠, 赵俊, 李道兴, 陈华, 王功芳. 地形对森林群落年龄及其空间格局的影响. 植物生态学报, 2007, 31: 814-824.
- [23] 沈泽昊, 赵俊. 基于植物-地形关系的物种丰富度空间格局预测——GAMs 途径的一种应用. 生态学报, 2007, 27: 953-963.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 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	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 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 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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