

# 延河流域本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 分布预测 ——广义相加模型及其应用

温仲明, 赫晓慧, 焦 峰, 焦菊英

(西北农林科技大学、中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 物种分布预测, 对于物种的保护、利用和恢复具有重要意义。利用广义相加模型 (GAM, Generalized Additive Model) 对延河流域典型地带性物种本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 的空间分布预测进行研究, 以为该流域本氏针茅草地的保护、恢复等提供依据。结果表明, 本氏针茅分布的环境梯度较广, 在坡度、坡向、温度与降雨的各个梯度上都有分布, 除高平地 and 侵蚀剧烈的沟道外, 各种地形部位上亦可以存在。建立的广义相加模型表明, 本氏针茅的分布主要取决于年均蒸发量和温度季节变化两个因子, 而非单纯的降雨、温度因素。从其分布概率看, 本氏针茅在延河流域大部分地区都有可能分布, 但其分布集中区主要在中北部, 与实际观测相符。模型检验表明, 建立的模型满足统计要求。

**关键词:** 自然植被; 植被 环境关系; 广义线性模型; 广义相加模型

文章编号: 1000-0933 (2008) 01-0192-10 中图分类号: Q141, Q145, Q948 文献标识码: A

## The predictive distribution of *Stipa bungeana* in Yanhe River catchment: GAM model and its application

WEN Zhong-Ming, HE Xiao-Hui, JIAO Feng, JIAO Ju-Ying

Institute of Soil and Water Conservation, NWSUAF, CAS and MWR, Yangling, Shanxi Province 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0192 ~ 0201

**Abstract:** The predictive distribution of species is of great importance not only to the conservation, utilization and restoration of grassland with these species as the dominant species, but also to the predictive distribution of vegetation communities in ecological restoration practices. In recent years much progress has been made in predictive models for species; models like GLM (Generalized Linear Model), GAM (Generalized Additive Model) and VGAM (Vector Generalized Additive Model) become more and more popular and useful, provide greater impact in planning and decision-making in nature conservation and ecological restoration. Comparative studies showed that GAM, as a data-driven model, could give more accurate prediction of species distribution. This paper employs the non-parametric GAM model to explore the potential distribution of the *Stipa bungeana* in Yanhe River catchment. As per the data requirement of GAM, 3 topographic and 9 climatic indexes were first extracted and analyzed using ARCGIS and ANUSPLN, then a GAM model for *Stipa bungeana* was established using these data and GRASP (Generalized Regression and Spatial Prediction) module for

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB407203); 国家科技支撑课题 植被优化配置与可持续建设技术资助项目 (2006BAD09B03); 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目 (2006HX01); 国家自然科学基金资助项目 (40301029)

**收稿日期:** 2006-07-05; **修订日期:** 2007-10-30

**作者简介:** 温仲明 (1969 ~), 男, 陕西定边县人, 博士, 副研究员, 主要从事植被生态恢复重建等方面的研究工作。E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by “National Basic Research Program of China (No. 2007CB407203)”; The State Science and Technology Support Project: Vegetation Configuration Optimized and Sustained Management Construction Technology in Loess Plateau (No. 2006BAD09B03); The talent cultivation program “Western Light” of CAS (No. 2006HX01); National Natural Science Foundation of China (No. 40301029)

**Received date:** 2006-07-05; **Accepted date:** 2007-10-30

**Biography:** WEN Zhong-Ming, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in GIS and restoration ecology. E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

S-PLUS The gradient analysis in this model shows that the *Stipa bungeana* can distribute in a wide range of environments, in different gradients of slope, aspect, temperature and precipitation, in all land positions expected for high flat land and extensively eroded gullies. However it does not mean the distribution of *Stipa bungeana* is equally affected by each factor, or has an uniform distribution probability in the whole environmental range. The GAM modeling indicates the distribution of *Stipa bungeana* is mainly controlled by the average annual evaporation and temperature seasonality but not the rainfall and temperature as commonly reported. A map is produced in ARCVIEW using a lookup table generated in GRASP module, showing the distribution probability of the *Stipa bungeana* in Yanhe River catchment. From this map it can be seen that *Stipa bungeana* can distribute in most areas in Yanhe River catchment, and its distribution centre locates in the middle and north part of the catchment. This result is in agreement with the reported point distribution of *Stipa bungeana*, proves that the GAM model well fits *Stipa bungeana*. However, as this is the first time the model being used in the study of vegetation-environment relations in China, there are still problems that need further study.

**Key Words:** natural vegetation; species-environment relation; Generalized Linear Model; Generalized Additive Model

物种分布预测,对于物种的保护、利用具有重要意义。在实践中,物种预测在生态恢复目标的设定<sup>[1,2]</sup>、目标种的选择<sup>[3]</sup>、生态恢复潜力评价<sup>[1,4,5]</sup>等方面可提供重要依据。近年来,不少学者提出通过研究植被-环境关系,预测自然植被的空间分布格局<sup>[2,6~18]</sup>,以满足自然保护、生态恢复规划等方面的需要。如 CAWSEY 等建立了植被-环境关系的 GAM (Generalized Additive Model)模型,对澳大利亚新南威尔士州中部的自然植被的潜在空间分布预测进行研究<sup>[2]</sup>; Hettrich 等利用 CCA 和 GLM 方法,对德国易北河中游的漫滩地的植被分布做了预测<sup>[15]</sup>。近年来,随着新的统计建模方法和 GIS 工具的发展,植被分布预测研究在生态学中得到快速发展<sup>[10,11,19]</sup>,并广泛应用于自然保护、生态恢复决策及评价等各个方面<sup>[2,20~22]</sup>。但不论采用哪种途径,物种分布预测,都是自然植被预测的核心和基础。从预测方法看,广义相加模型 (GAM) 是物种或植被-环境关系模型研究方面最具潜力的模型之一,因其能够有效解决生态学中的非线性问题而受到许多生态学家的推崇。

本氏针茅是延河流域分布较广的优良牧草之一,预测其分布对于本氏针茅草地恢复、保护和利用具有重要意义。本文将采用目前植被-环境关系模型研究方面的最近研究成果,采用广义相加模型 (GAM) 对本氏针茅在延河流域的分布进行预测研究,以推动该模型在复杂丘陵地区的应用。

## 1 研究区概况

本研究选择的研究区为延河流域,位于 36°23'~37°17'N, 108°45'~110°28'E 之间,属黄河中游河口镇—龙门区间的一级支流,由西北向东南,流经志丹,安塞,延安,在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河。延河流域全长 286.9 km,总面积 7687 km<sup>2</sup>,平均坡度为 4.3‰,河网密度约为 4.7 km/km<sup>2</sup>。本流域属大陆性气候,年降雨量 500 mm 左右,年平均气温 9℃,但从东南向西北,气候、温度具有明显的梯度变化特征。相应地,延河流域植被分布也呈现渐次变化,从南向北依次为森林区、森林草原区和草原区。可以满足模型要求的梯度变化。

## 2 研究方法

### 2.1 广义相加模型 (GAM) 概述

在近 30 多年中,统计学的一个重要发展,就是在回归分析中提出了广义线性模型 (Generalized Linear Model, GLM) 和广义相加模型 (generalized additive model, GAM)。这些模型提出后,因其能够处理多种数据分布类型,且与传统的线性模型和方差分析具有较好的衔接而在生态学中得到广泛应用<sup>[23]</sup>。

广义线性模型 (GLM) 是线性模型的扩展,其特点是不强行改变数据的自然度量,数据可以具有非线性和非恒定方差结构<sup>[24]</sup>。GLM 模型主要是通过联结函数  $g(\cdot)$  (link function), 建立响应变量 ( $Y$ ) 的数学期望值  $\mu = E(Y)$  与线性组合的预测变量  $LP$  之间的关系。其数学形式如下:

$$g(E(Y)) = LP = \beta_0 + X^T \beta \quad (2)$$

<http://www.ecologica.cn>

式中,  $\mu_i$ 、 $X_i$  的含义与 (1) 相同。对于第  $i$  个观测值, 其对应的数学形式可以表达如下:

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} \quad (3)$$

与传统的线性模型不同, GLM 模型中  $Y$  的分布可以是任何形式的指数分布 (如高斯分布即正态分布、泊松分布、二项式分布), 联结函数可以是任何单调可微函数 (如对数函数 logarithm 或逻辑函数 logit)。 $Y$  的方差通过方程函数  $V(\mu)$  依赖于其数学期望值  $\mu = E(Y)$ , 这里  $Var(Y) = \phi V(\mu)$ ,  $\phi$  为比例 (或者称为离差) 参数 [23, 25, 26]。

GAM 是 GLM 模型的半参数扩展 (semiparametric extensions) [24], 其假设函数是相加的, 函数的组成成分为光滑函数 (Smooth Functions)。GAM 也是通过联结函数, 建立响应变量的数学期望值与预测变量的一个光滑函数的关系。其数学形式为:

$$g_i(E(Y)) = \sum_i f_i(X_i) \quad (4)$$

假如以物种的出现或缺失为观测变量, 则响应变量遵循二项式分布, 即其取值为 0 或 1, 则某物种出现的概率可用逻辑联结函数 (Logistic link function) 来表示  $P = \log\{P/(1-P)\}$ 。这样, 其 GAM 就可以写为  $P = b_0 + f_1(X_1) + \dots + f_m(X_m)$ 。

GAM 模型的优点, 在于其解决响应变量与预测因子间的高度非线性和非单调关系方面的突出能力。GAM 模型是基于数据的模型 (Data-driven), 而不是基于模型本身 (not model-driven), 数据决定着响应变量和预测因子之间的关系, 而不是假设的响应变量与预测因子间的某种参数关系 [23]。同时, GAM 模型可以同时针对不同的变量, 采取不同的策略建模。如可对部分预测因子进行线性拟合, 而对其它因子通过光滑函数进行拟合, 所以 GAM 有时也称为半参数模型。正因为如此, GAM 模型具有高度的灵活性, 且能有效揭示数据中所隐含的生态关系, 提高对生态系统的理解。

## 2.2 GAM 模型预测变量需求及处理

利用 GAM 模型进行植被分布预测, 对数据具有较为严格的要求。一般地, 不仅要求适当的样本数据以建立模型, 同时需要选择相应的预测变量, 且要求这些预测变量数据具有空间属性, 即所有的预测变量都能转为具有相同分辨率的栅格数据模型。预测变量包括两类, 分别为气候因子和地形因子。其中气候因子主要指温度和降雨, 是控制地带性植被分布的主要因素 [27]。根据对植被生长发育的影响, 选择了年均最冷月气温 (temp\_cold), 年均最热月气温 (temp\_hot), 年均温 (temp\_avg), 年均雨季总降雨量 (rain\_789), 年均降雨量 (rain\_y), 年均蒸发量 (ET0), 降雨季节变化 (rain\_sea), 温度季节变化 (tem\_sea) 8 个指标来表征气候对植被分布的影响。各因子指标计算方法如下:

$$\text{年均最冷月气温 (temp\_cold)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} \text{1月平均温度}}{21} \quad (5)$$

$$\text{年均最热月气温 (temp\_hot)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} \text{7月平均温度}}{21} \quad (6)$$

$$\text{年均温 (temp\_avg)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{1} \sim \text{12月平均温度})}{21 \times 21} \quad (7)$$

$$\text{年均雨季总降雨量 (rain\_789, mm)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{7} \sim \text{9月平均降雨})}{21} \quad (8)$$

$$\text{年均降雨量 (rain\_y, mm)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{1} \sim \text{12月平均降雨})}{21} \quad (9)$$

$$\text{年均蒸发量 (ET}_0, \text{mm)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{1 ~ 12月平均蒸发量})}{21} \quad (10)$$

$$\text{降雨季节变化 (rain\_sea, mm)} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{7, 8, 9月总降雨}) + \sum_{1980}^{2000} (\text{12, 1, 2总降雨})}{21 \times 24} \quad (11)$$

$$\text{温度季节变化 (tem\_sea, )} = \frac{\sum_{1980}^{2000} (\text{所有最高温}) + \sum_{1980}^{2000} (\text{所有最低温})}{21 \times 24} \quad (12)$$

在取得各指标因子的值后,因植被空间预测的需要,气候因子指标值必须经过处理,形成具有连续分布的栅格数据模型。进行空间表面分析的方法较多,如 kriging、Sp line等。由于黄土高原地区地形的复杂性,本文采用 ANUSPL N空间插值工具进行空间插值分析,因为 ANUSPL N将高程变化等因素予以考虑,较 Kriging等空间插值方法在精度上有较大改进<sup>[28]</sup>。气候数据处理流程如图 1所示。图中的 DEM 栅格大小为 5m ×5m,共利用了 57个气象站点数据。

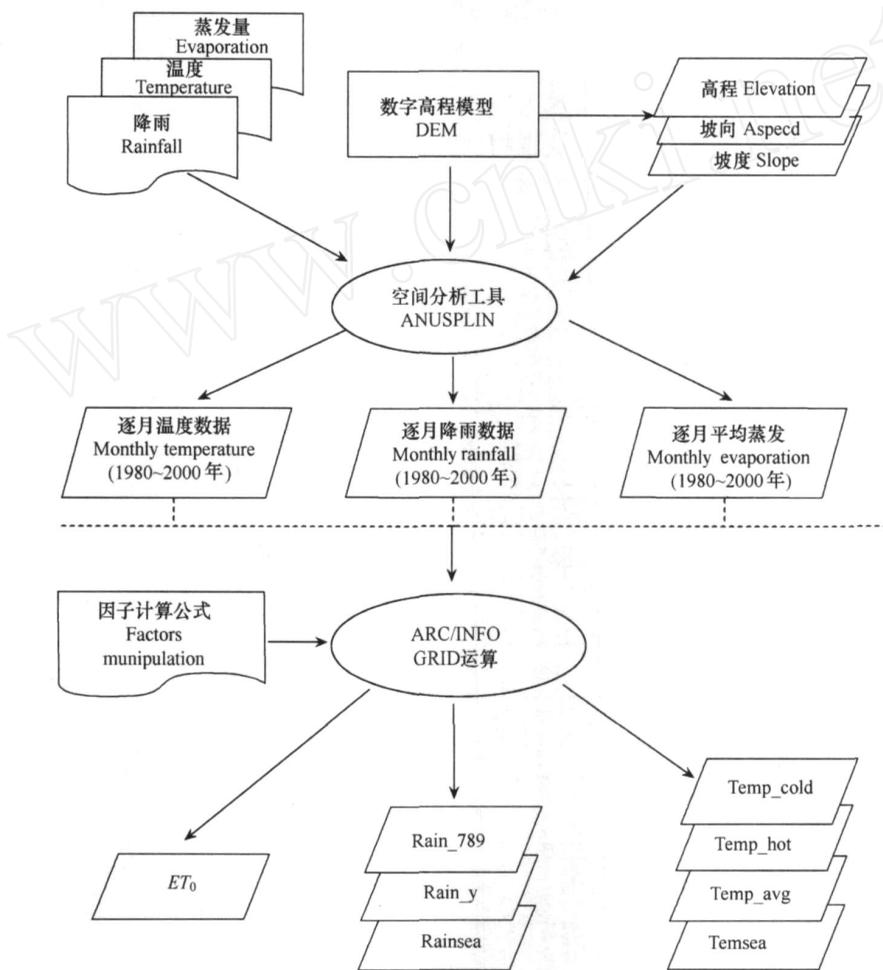


图 1 气候数据处理流程图

Fig 1 The flowchart of climatic data processing

地形主要指地形的起伏变化,其通过对降雨、光照等的再分配而形成局部小气候或生境,延伸了部分物种的分布,因此,地形是局部植被分布的重要影响因素。依据地形因子的重要性,本文选择坡度 (slope),坡向

(aspect), 高程 (elevation), 地形部位 (position) 4 个地形因子参与模型的建立。地形因子中, 坡度、坡向可从 DEM 直接生成, 高程从 DEM 直接读取。地形部位本文采用高程残差分析, 并结合坡度, 将延河流域的地形部位划分为 7 类, 即河道与沟间平地 (Drainage and flat land)、下坡位 (Lower slope)、中坡 (Middle slope)、上坡 (Upper slope)、峁顶 (Ridge)、高平地 (High flat) 和细小沟谷。

### 2.3 植被数据采集与处理

取得满足空间分析需要的植被样本数据, 是物种分布预测的基础。为保证在不同空间位置不同环境梯度上, 都能取得相应的样本数据, 本文采用环境梯度分层采样技术, 根据降雨、温度的梯度变化, 将延河流域划分为 17 个环境梯度单元 (较小的环境梯度单元合并到临近的单元内), 然后在不同的梯度单元内, 根据每个梯度单元内的栅格数量, 确定相应的需采集的样本数量进行采样。采样记录包括样地号、地点名称、样地面积、样地主要植被类型、海拔、坡度、坡向、地形、样地经纬坐标、植物种类及数量、多度、盖度、频度。由于人力和时间的限制, 本研究部分样本来源于前期调查数据, 经过数据质量校验, 本文实际采用的样本数为 145 个。

### 2.4 植被预测模型的建立

GAM 模型作为统计学中新发展的一种的模型, 目前仅有 S-PLUS、STATISTIC 等少数几个软件平台提供建模方法, 但这些软件工具仅提供模型的基本形式, 建立的模型无法与 GIS 等空间工具建立联系, 无法利用模型进行空间预测。针对这一问题, Lehmann 2002 年利用 S 语言开发了专用的程序模块 GRASP (Generalized Regression and Spatial Prediction), 在 GAM 建模时生成查找表 (lookup table), 然后通过查找表与 GIS 建立关系, 利用模型对各预测变量 (GR DS) 进行运算, 实现物种的空间分布预测<sup>[6]</sup>。该程序分为两部分, 一部分是

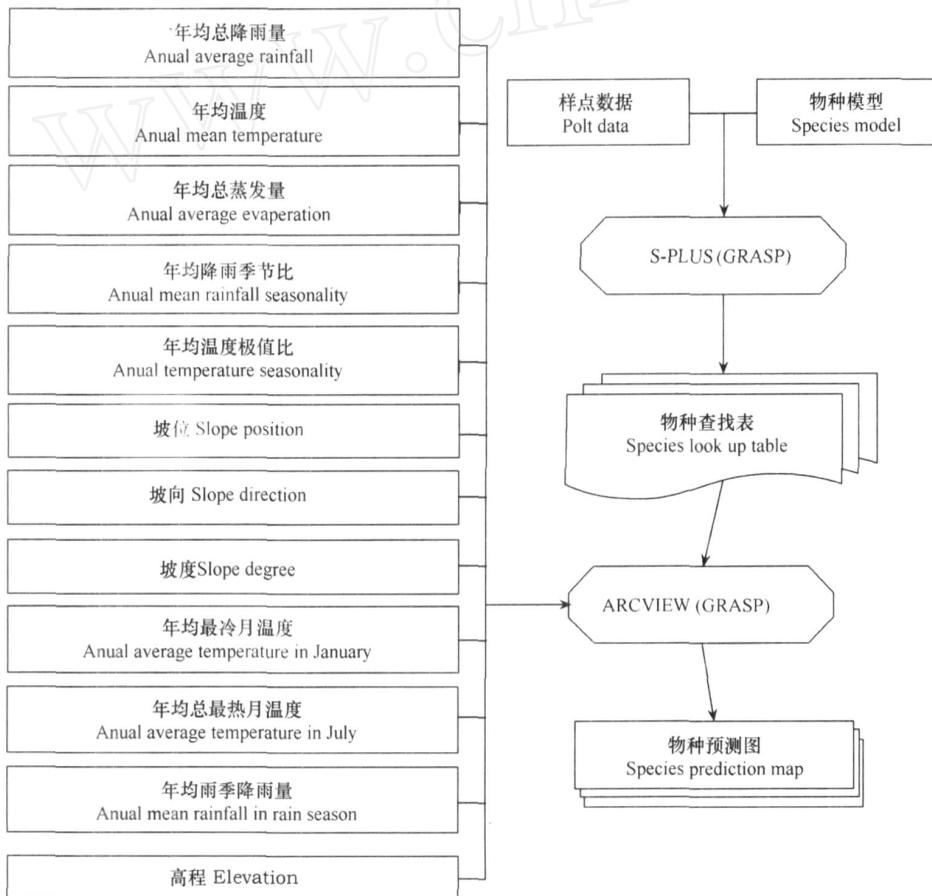


图 2 物种分布预测流程

Fig 2 Flowchart of predicting species distribution

基于 S-PLUS的,用于模型建立及模型结果输出,一是基于 ARCVIEW的(插件),利用各预测变量的栅格数据模型,进行植被空间分布的预测制图(图2)。GRASP在 S-PLUS中提供了良好的界面,用于数据输入、参数设定、输出结果选择等。本文建立 GAM模型时,有如下设定:(1)提供变量间相关分析,以在建模时剔除相关性较高的因子,从而解决变量间的共线性问题;(2)采用逐步回归方法建模;(3)选择生成查找表,以在 ARCVIEW中利用 GRASP插件进行物种分布预测。

### 3 结果与分析

#### 3.1 物种分布环境梯度空间分析

分析物种分布的主要环境梯度范围或空间,对于理解物种分布格局及建模分析具有重要意义。图3表示本氏针茅在各个环境梯度上的分布状况,例如,从坡度图中可以看出,坡度为0处共有12个样点且全部出现本氏针茅,在坡向图中可以看出南坡共有39个样点,其中36个样点出现本氏针茅等。同理,从图中可总结出本氏针茅分布的环境梯度:本氏针茅在研究区生长范围很广,在坡度、坡向、温度与降雨的各个梯度上都有分布;除高平地 and 侵蚀剧烈的沟道外,各种坡位上都可以存在。本氏针茅在坡度和温度各个梯度上的分布比较均衡,但当降雨增多时有减少趋势,随年温差的增高分布也增多,与蒸发量则有着较为复杂的关系。

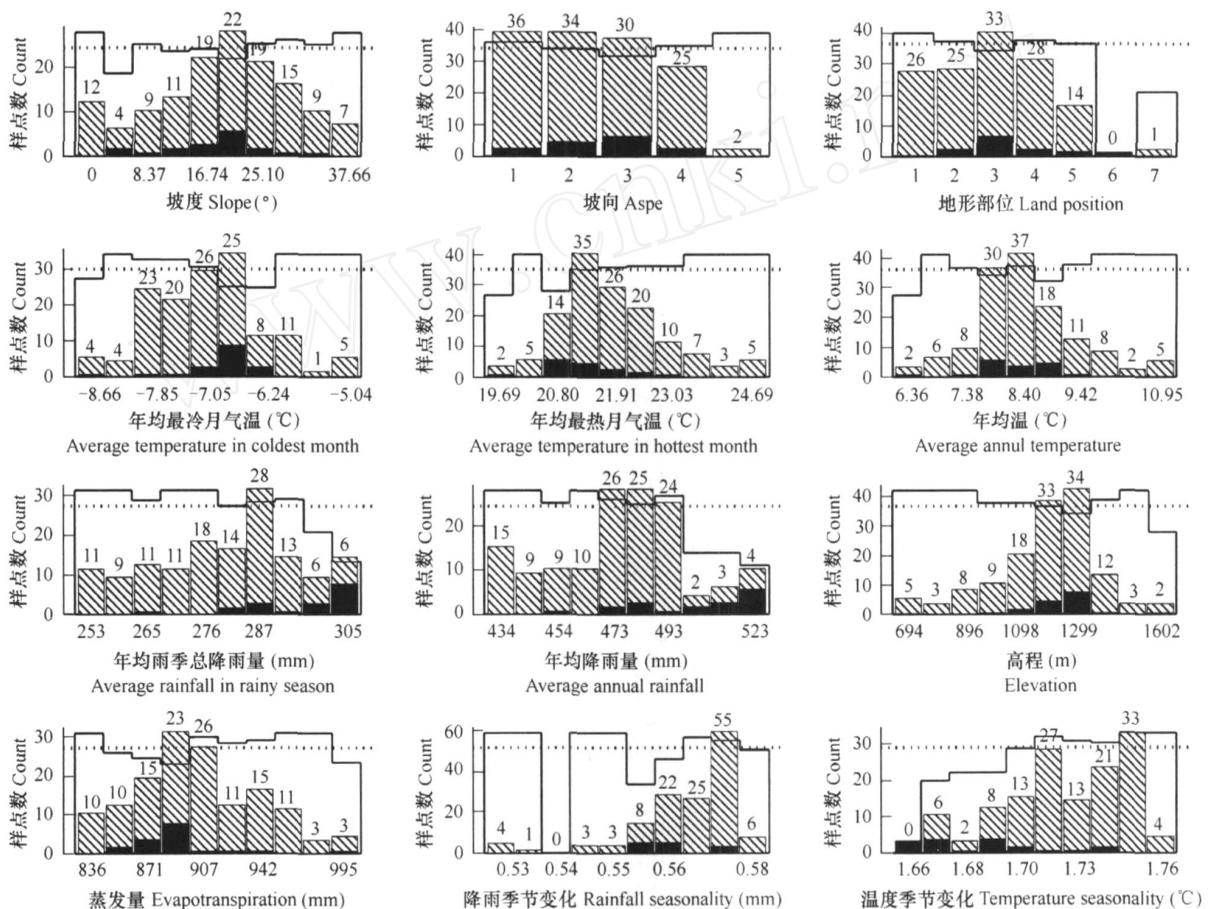


图3 本氏针茅在各环境梯度上的分布柱状图

Fig 3 Environment distribution of *Stipabungeana*

柱状图中整个条柱表示该梯度的采集的所有样点,其中黑色部分为物种在该环境梯度上的出现样点数,标注在条柱上方;实线代表存在样点与缺失样点数的比例,虚线代表存在样点数载各个环境梯度上的平均值 Entire histogram bars represent the distribution of all plots, where darker areas represent the number of plots occupied by the species in each bar This number is also written on top of each bar The plain line is the ratio between occupied and not occupied plots and the dashed lines correspond to the overall mean proportion of occupied plots

#### 3.2 GAM模型及检验

在分析本氏针茅分布环境梯度的基础上,采用逐步回归法进行 GAM模型的建立,结果如图4所示。模型

表明,在延河流域,本氏针茅的分布主要取决于年均蒸发量和温度的季节变化两个因子。其中蒸发量与本氏针茅的空间分布的关系较为复杂,而与温度季节变化则呈正相关性。但就模型而言,不同的预测变量对模型的贡献率是不一样的。一般地,预测变量在方程中的自由度愈高,该变量在模型中的作用愈大。而相同自由度时,本文给出了贡献率分析的信息(表 1),当从模型中剔除(Drop)蒸发变量时,模型变化为 2,但剔除温度季节比时,模型变化为 8,同时假设模型仅包括单个变量(alone)时,蒸发对模型贡献率为 15.5,而温度季节比为 29.7,因此,温度季节比在模型中的贡献率更大。

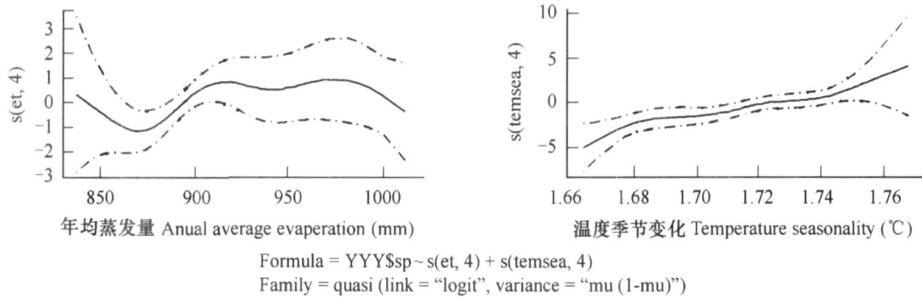


图 4 本氏针茅模型(formula)方程及响应变量曲线图

Fig 4 *Stipa bungeana* model's equation and partial response curves of species response variable graph

实线代表响应变量方程的拟合曲线,虚线代表方程的置信度 Real line represents response variable equation's fitting curves and broken line represents equation's believe degree

选择出的模型通过两种方法检验,第一个是计算方差值,即方差分析(F检验),检验结果为总自由度为 144,剩余残差为 6.32,对应自由度 135.1,零模型拟合下的离差(Null deviance,相当于通常线性模型中的残差平方和,可以度量模型的拟合优度)为 104.55,表明模型可以较好的拟合本氏针茅的空间分布。第二个方法是使用 ROC 检验,对模型进行交叉验证,

表 1 预测变量贡献率分析

Table 1 Contributions of predictors to the model

GRASP CONTR BUTDN (模型贡献率分析)			
PREDICTORS(预测变量): S(et, 4)蒸发量 / S(temsea, 4)温度季节变化			
	Drop (剔除)	alone (仅含单变量)	Model(模型)
S(et, 4)	9.504637	15.47818	2.076866
S(temsea, 4)	23.75614	29.73116	8.897094

ROC 检验是使用 ROC 曲线来表示模型敏感度(Sensitivity)与特异性(Specificity)之间的平衡度,ROC 值一般介于 0.5~1 之间,当值等于 0.5 时表明模型无法诊断优劣,值愈大,表明模型愈优。图 5 表明,无论是交叉验

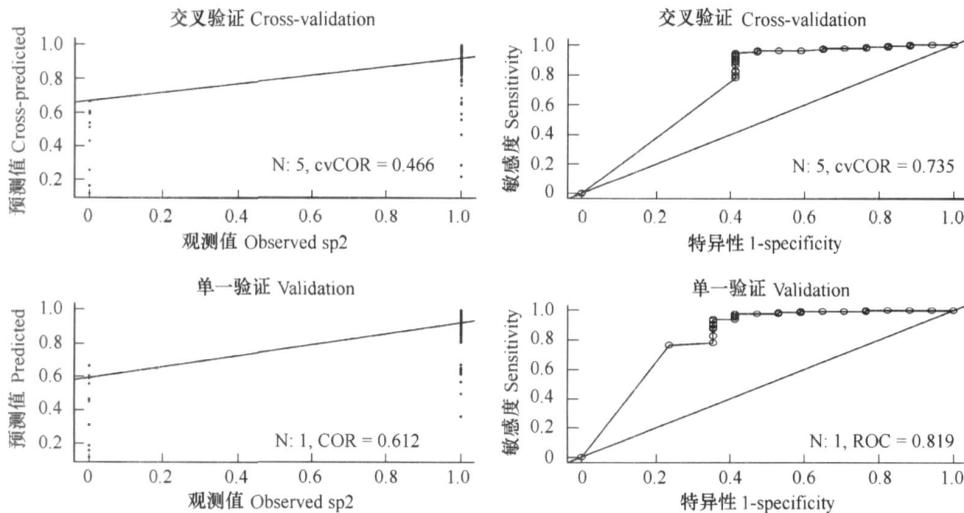


图 5 长芒草的模型交叉验证图

Fig 5 Cross-validation of GAM model for *Stipabungeana*

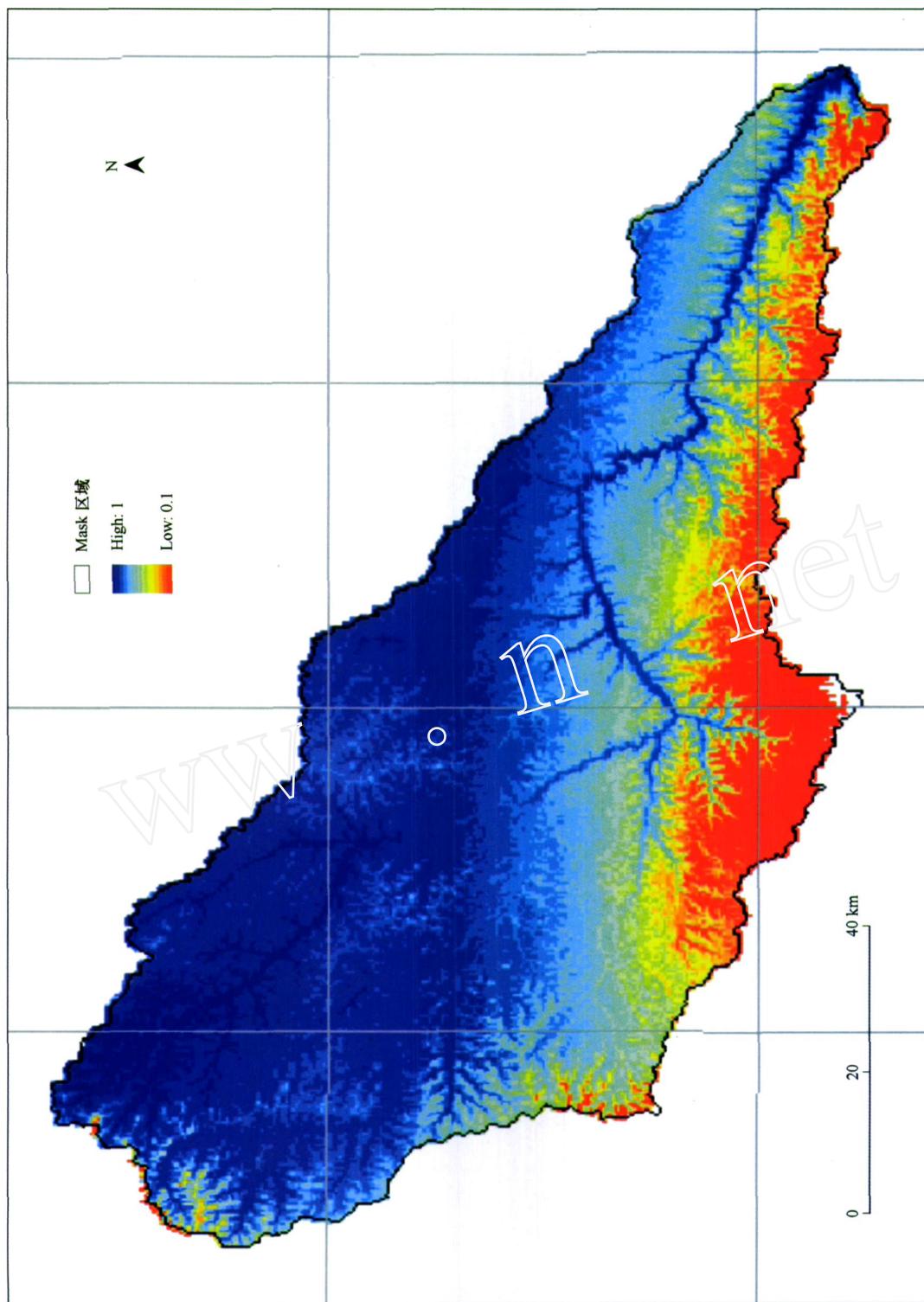


图 6 长芒草空间分布预测图  
Fig.6 Predictive distribution of *Stipa bungeana*

证 (cross-validation) 还是单一验证 (validation), 模型都提供了较高的 ROC 值 ( $ROC = 0.74$ ,  $ROC = 0.82$ ), 而且两值之间差别较小, 表明模型诊断结果良好, 并有着良好的稳定性。

### 3.3 物种分布预测

物种空间分布预测, 是在模型建立的基础上, 利用模型生成的查找表 (lookup table) 和预测变量的栅格专题图来预测每个物种的空间分布概率 (流程见图 2)。本文以本氏针茅为例, 进行了物种的分布预测制图, 结果如图 6 所示。图中数据大小表示物种分布概率的大小; 白色部分表示模型中由于物种在该环境梯度中不存在而被数据限制的部分, 标示为掩膜 (mask) 区域; 蓝色部分是模型预测本氏针茅出现概率最大的区域, 接近于 1, 为本氏针茅分布的环境梯度中心区。红色区域表示该区域出现本氏针茅的概率非常低, 几近于 0, 颜色渐变区表明本氏针茅空间分布的变化趋势。整体而言, 本氏针茅在全区大部分区域都可能出现, 但主要分布在研究区中北部。

## 4 结论与讨论

物种分布受到众多环境因素的影响。H·沃尔特专著《世界植被》<sup>[27]</sup> 表明, 地球表面的植被, 主要由大气候决定的。这种由大气候决定的植被称为地带性植被。除由大气候决定的地带性植被外, 也有局部气候决定的超地带植被<sup>[27]</sup> 或非地带植被, 这些局部气候往往由于大的地貌或局部地形变化而形成, 延伸了部分物种的分布。H·沃尔特认为, 这种群落生境的变化可以补偿气候的变化。为进一步说明各环境因素对物种分布的影响, Austin 等依据环境因子对植物生理过程的影响, 将环境梯度因子分为 3 类<sup>[29-31]</sup>, 即资源性因子、直接因子和间接因子。所谓资源性因子, 就是可供植物直接利用的因子, 如  $H_2O$ 、N、P、 $CO_2$  等。这些因子也是构成植物有机体的重要组成部分; 直接因子指被植物不能直接利用, 但却能对植物生理过程产生影响的因子, 如土壤酸碱度; 而间接因子则主要指既不能直接为植物所利用, 也不对植物生理过程产生直接影响, 但却能通过对其它环境因子的作用而对植被分布产生影响, 如地形可通过对降雨、温度等的再分配而影响植被分布。

但就某一个物种而言, 不同的环境因素对其分布的影响途径和方式也是不一样的。本文采用利用近年来物种分布预测研究中备受关注的广义相加模型, 对延河流域典型地带性物种本氏针茅的空间分布进行了预测。结果表明, 本氏针茅的分布主要取决于年均蒸发量和温度季节变化, 而非单纯的降雨、温度因素。从其分布区域看, 本氏针茅延河流域大部分地区都有可能分布, 但其分布集中区主要在中北部。这与本氏针茅报道的分布范围及物种地带性分布规律是一致的<sup>[32]</sup>, 表明建立的模型是比较符合实际情况。

作为植被-环境关系研究的一个新途径, GAM 可以较好地处理物种分布与环境因素间的非线性关系, 本文的研究结果也表明所建立的 GAM 模型是比较理想的。但是另一方面, GAM 模型在我国植被分布预测系研究中的应用比较少, 无论在数据采集还是模型建立等方面, 仍有很多问题需要进一步探讨。

## References:

- [ 1 ] Choi, Young D. Theories for ecological restoration in changing environment: Toward 'futuristic' restoration. *Ecol Res*, 2004, 19 (1): 75-81.
- [ 2 ] Cawsey EM, Austin M P, Baker B L. Regional vegetation mapping in Australia: a case study in the practical use of statistical modelling. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11, 2239-2274.
- [ 3 ] Rosenthal, Gert. Selecting target species to evaluate the success of wet grassland restoration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 98 (1-3): 227-246.
- [ 4 ] Herault, Bruno, Honnay, Olivier, Thoen, Daniel. Evaluation of the ecological restoration potential of plant communities in Norway spruce plantations using a life-trait based approach. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42 (3): 536-545.
- [ 5 ] Penuela M C, Drew A P. A model to assess restoration of abandoned pasture in Costa Rica based on soil hydrologic features and forest structure. *Restoration Ecology*, 2004, 12 (4): 516-524.
- [ 6 ] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, 2002, 157 (2-3): 189-207.
- [ 7 ] M , Nygaard B, Ejm R, *et al*. A biotope landscape model for prediction of semi-natural vegetation in Denmark. *Ecological Modelling*, 2001, 139 (2-3): 221-233.

- [ 8 ] Remm Kalle Case-based predictions for species and habitat mapping *EcologicalModelling*, 2004, 177 (3-4): 259.
- [ 9 ] Waldhardt R, Simmering D, Otte A. Estimation and prediction of plant species richness in a mosaic landscape *Landscape Ecology*, 2004, 19 (2): 211-226.
- [ 10 ] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling *EcologicalModelling*, 2002, 157 (2-3): 101-118.
- [ 11 ] Guisan A, Zimmernann N E. Predictive habitat distribution models in ecology *EcologicalModelling*, 2000, 135 (2-3): 147-186.
- [ 12 ] Ohmann J L, Gregory M J. Predictive mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest- neighbor imputation in coastal Oregon, U. S A. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32 (4): 725-741.
- [ 13 ] Zaniwski A E, Lehmann A, Overton J M. Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns *EcologicalModelling*, 2002, 157 (2-3): 261-280.
- [ 14 ] Gullison J J, Bourque C P A. Spatial prediction of tree and shrub succession in a small watershed in Northern Cape Breton Island, Nova Scotia, Canada *EcologicalModelling*, 2001, 137 (2-3): 181-199.
- [ 15 ] Hettrich A, Rosenzweig S. Multivariate statistics as a tool for model-based prediction of floodplain vegetation and fauna *EcologicalModelling*, 2003, 169 (1): 73-87.
- [ 16 ] Guisan, Antoine, Thuiller, Wilfried. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models *Ecology Letters*, 2005, 8 (9): 993-1009.
- [ 17 ] Kawakita M, Minami M, Eguchi S, *et al*. An introduction to the predictive technique AdaBoost with a comparison to generalized additive models *Fisheries Research*, 2005, 76 (3): 328-343.
- [ 18 ] Higgins Steven I, Richardson David M, Cowling Richard M, *et al*. Predicting the Landscape-Scale Distribution of Alien Plants and Their Threat to Plant Diversity *Conservation Biology*, 1999, 13 (2): 303-313.
- [ 19 ] Guisan, Antoine, Edwards, Jr Thomas C, Hastie, Trevor. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene *EcologicalModelling*, 2002, 157 (2-3): 89-100.
- [ 20 ] Robertson M P, Peter C I, Villet M H, *et al*. Comparing models for predicting species' potential distributions: a case study using correlative and mechanistic predictive modelling techniques *EcologicalModelling*, 2003, 164 (2-3): 153-167.
- [ 21 ] Moisen, Gretchen G, Frescino, Tracey S. Comparing five modelling techniques for predicting forest characteristics *EcologicalModelling*, 2002, 157 (2-3): 209-225.
- [ 22 ] Anderson R P, Lew D, Peterson A T. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models *Ecological Modelling*, 2003, 162 (3): 211-232.
- [ 23 ] Guisan A, Edwards Jr T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene *EcologicalModelling*, 2002, 157 (2-3): 89-100.
- [ 24 ] Hastie T J, Tibshirani R J. *Generalized Additive Models*: Chapman & Hall, 1990.
- [ 25 ] Hastie T J, Tibshirani R J. *Generalized Additive Models*: Chapman & Hall, 1990.
- [ 26 ] Lane P W. Generalized linear models in soil science *European Journal of Soil Science*, 2002, 53 (2): 241-251.
- [ 27 ] Heinrich Walter. *Vegetation of the Earth*. Beijing: Science Press 1984.
- [ 28 ] Boer E P J, de Beurs K M, *et al*. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, 3 (2): 146-154.
- [ 29 ] Austin M P. Searching for a model for use in vegetation analysis *Vegetatio*, 1980, 42, 11-21.
- [ 30 ] Austin M P. Continuum concept, ordination methods and niche theory *Annu Rev Ecol Syst*, 1985, 16, 39-61.
- [ 31 ] Austin M P, Heyligers P C. Vegetation survey design for conservation: gradsect sampling of forests in Northeast New South Wales *Biol Conserv*, 1989, 50, 13-32.
- [ 32 ] Zou H Y. A Study on Correlation between Vegetation Division and Construction of Forest and Grasslands in Loess Plateau of Northern Shannxi *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7 (2): 96-101.

#### 参考文献:

- [ 27 ] H·沃尔特著,中国科学院植物研究所译. 世界植被. 北京: 科学出版社, 1984.
- [ 32 ] 邹厚远. 陕北黄土高原植被区划及与林草建设的关系. *水土保持研究*, 2000, 7 (2): 96~101.