

# 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图<sup>\*</sup>

温仲明<sup>1</sup> 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** 潜在植被的分布预测与制图对植被恢复规划具有重要的指导价值. 利用广义相加模型 (generalized additive model, GAM), 结合 GIS 空间分析技术和环境梯度分层采样技术, 为延河流域 24 个地带性物种建立了分布模型, 并在考虑群落内部物种种间关系及其分布概率的基础上, 对物种分布进行运算, 模拟预测了延河流域 37 种植物群落的分布状况和延河流域的潜在植被分布. 结果表明: 研究区植被分布预测值与实际调查值间的差异不显著, 预测的植被空间分布较好地反映了延河流域潜在的植被分布状况, 表明该模型具有较好的预测能力, 对于区域植被恢复的目标设定和恢复规划具有重要意义.

**关键词** 潜在植被 植被环境 广义相加模型 分布预测

**文章编号** 1001-9332(2008)09-1897-08 **中图分类号** Q948.3 **文献标识码** A

**Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in hilly area of Loess Plateau** WEN Zhong-ming, JIAO Feng, JIAO Ju-ying (Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shannxi, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(9): 1897-1904.

**Abstract:** The prediction and mapping of potential vegetation distribution is of instructive to the ecological restoration planning. By using generalized additive model (GAM) and in combining with GIS spatial analyst and environmental stratification sampling techniques, a distribution model for 24 dominant species in Yanhe River catchment was developed, and, based on the interspecific relationships in plant communities and the distribution probability, the spatial distribution of plant species was calculated, and the distribution of 37 plant communities and of the potential vegetation in Yanhe River catchment was predicted. The results showed that there were no significant differences between predictive values and actual data, and the predictive spatial distribution of vegetation could actually reflect the distribution of potential vegetation in Yanhe River catchment, suggesting that the established model had good ability for the vegetation distribution prediction, which was of significance to the goal-setting and planning of vegetation restoration.

**Key words:** potential vegetation; vegetation-environment; generalized additive model; distribution prediction

植被恢复是黄土高原地区生态环境建设及可持续发展的关键和核心. 长期以来, 虽然国家在该地区投入了大量人力、物力用于植被重建工作, 改善了局部地区的生态环境, 但从整体上看, 并没有取得预期效果, 植被恢复过程留下了较为沉重的教训, 如 20 世纪 80 年代该区大规模植树、种草的失败等<sup>[1]</sup>. 出现这些状况的核心, 就是没有弄清楚这些地区特别是黄河流域在当前气候条件下的潜在植被和过去气

候条件下的原生植被究竟如何<sup>[2]</sup>, 这个问题不解决, 生态恢复或生态建设的战略方向就无从把握<sup>[2]</sup>. 事实上, 类似的问题不仅在黄土高原地区存在, 世界上很多地区的生态恢复项目或工程, 都因自然植被的破坏或退化, 而无法找到可参照的自然植被系统<sup>[3-5]</sup>, 导致在植被恢复目标的确立、物种的选择、植被恢复规划或设计等方面存在困难<sup>[6]</sup>. 近年来, 许多研究者提出近自然恢复或自然恢复, 因其低成本和较高的生态效益, 受到越来越多的重视<sup>[7-8]</sup>. 由于其恢复潜力、效果评价等仍以自然植被作为比照<sup>[7,9]</sup>, 但生态恢复区的自然植被往往破坏严重, 不足以提供这样的信息. 因此, 有必要利用植被环境

<sup>\*</sup> 国家科技支撑计划项目 (2006BAD09B03)、国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB407203)、中国科学院“西部之光”人才培养计划项目 (2006HX01) 和国家自然科学基金资助项目 (40301029).

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. E-mail: zmw@ms.iswc.ac.cn  
2007-12-16 收稿, 2008-06-23 接受.

关系模拟和预测这些地区潜在植被的分布,以满足自然保护、生态恢复规划等方面的需要<sup>[6,10]</sup>。一般情况,潜在植被指在当前气候条件下,当植被与气候条件完全达到平衡时所能发育的自然植被。黄土高原的植被恢复向来受到众多学者的重视,关于植被与气候类型的关系<sup>[11-14]</sup>、植被分布与土壤类型间的关系<sup>[15]</sup>以及植被与降水资源的关系<sup>[16]</sup>进行了大量研究。此外,在潜在植被方面,赵传燕等<sup>[11]</sup>在分析草地盖度与温度、降雨环境因子关系的基础上,模拟了祖厉河流域的潜在植被分布;任国玉<sup>[12]</sup>利用干湿指数与植被分布的关系,对中国北方的本底植被进行了分析,其中包括对黄土高原地区本底植被的分析。以往的研究为深刻认识黄土高原地区植被与环境的关系、指导该区植被建设提供了很好的依据。但仍有部分问题还需进一步深入分析和探讨,如在黄土丘陵区,除气候因素外,地形对植被分布有何影响?能否建立一个分布式预测模型,将影响植被分布的主要环境因素都予以考虑等,这些问题的解决对提高该区潜在植被预测精度进而对植被恢复规划等具有重要意义。

近年来,随着统计建模方法和GIS工具的发展,潜在植被分布预测研究在生态学中得到快速发展,并广泛应用于自然保护、生态恢复决策及评价等研究领域<sup>[10,17-18]</sup>,建立了一些新的模型方法,如分类回归树<sup>[19]</sup>、神经网络系统(neural networks)<sup>[20]</sup>、贝叶斯途径(Bayesian approach)、生态位因子分析(ecological niche-factor analysis)、判别分析(discriminant analysis)、基于规则的遗传算法预测(genetic algorithm for rule-set prediction, GARP)<sup>[21]</sup>、广义线性模型(GLM)和广义相加模型(generalized additive model, GAM)等<sup>[18]</sup>。许多学者对这些方法和模型进行了分析评价<sup>[22-23]</sup>,一般认为,非参数模型的预测结果较参数模型好<sup>[24]</sup>。为此,本文选择黄土高原延河流域为研究区,针对黄土高原特殊的自然地理环境,综合考虑了影响植被分布的主要因素,采用目前具有较好预测效果的非线性建模途径——广义相加模型,模拟和预测了该流域的潜在植被分布,旨在为该区域植被恢复的规划、管理等提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

延河流域(36°23'—37°17' N, 108°45'—110°28' E)位于陕西省北部,地处黄河中游,是黄河中游河口镇-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4.3%,河网密度约4.7 km·km<sup>-2</sup>。该流域属大陆性季风气候,年均降水量约500 mm,年均气温约9℃,从东南向西北,气候、温度具有明显的梯度变化特征。流域植被分布从南向北依次为森林区、森林草原区和草原区,植被随环境梯度的变化明显。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 植被分布预测模型** 本研究采用物种分布预测-植物群落分布预测-植被分布预测的方法进行植被分布预测。物种分布预测对整个植被分布预测具有至关重要的作用。根据以往研究<sup>[10,23]</sup>,本文选择具有高度灵活性、能有效揭示数据中隐含的生态关系的广义相加模型(GAM),作为物种分布预测的模型。

GAM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。GAM模型在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具有突出能力,另外,它还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,而对其他因子通过光滑函数进行拟合,因此,GAM有时也被称为半参数模型。其数学形式为:

$$g_i[E(Y)] = \sum_i [f_i(X_i)] \quad (1)$$

式中: $g_i$ 为连接函数; $E(Y)$ 为响应变量的数学期望值; $f_i$ 为光滑函数; $X_i$ 为自变量。本文中的响应变量为物种出现频率,遵循二项式分布,取值为1(样方中出现某物种)或0(样方中未出现某物种),则某物种出现的概率可用逻辑联结函数(logistic link function) $P = \log[P/(1-P)]$ 表示, $P$ 为物种在样方中出现的概率。这样,式(1)可写为:

$$P = b_0 + f_1(X_1) + \dots + f_m(X_m)$$

式中: $P$ 为逻辑联结函数; $b_0$ 为回归方程常数项,或称截距。

**1.2.2 预测变量的选择** 地形变化对降雨、光照等具有强烈的再分配作用,从而形成小气候或生境<sup>[25]</sup>,而黄土高原地区的地形起伏较大,因此,除气候因素外,地形因素也将作为影响植被分布的重要预测变量。

根据现有研究<sup>[12,26]</sup>,气候因子选择年均最冷月气温、年均最热月气温、年均温、年均雨季总降水量、年均降水量、年均蒸发量、降水的季节变化、温度的季节变化8个指标表征气候对植被分布的影响。地

形因子选择坡度、坡向、高程和地形部位 4 个指标。

1.2.3 变量处理 由于植被空间预测的需要,气候因子指标值必须经过空间插值处理,形成具有连续分布的栅格数据模型。由于黄土高原地区地形的复杂性,本文采用 ANUSPLN 空间插值工具软件<sup>[27]</sup>(ANUSPLN 综合考虑了高程、坡度变化等因素,较 Kriging 方法在精度上有较大改进)对气候因子进行空间插值分析。本文利用延河流域及其周边 57 个气象站点的数据进行插值。地形因子中,坡度、坡向可从 DEM 直接生成,高程可从 DEM 直接读取;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 (lower slope)、中坡 (middle slope)、上坡 (upper slope)、穹顶 (ridge)、高平地 (high flat) 和细小沟谷 (narrow gully)。

1.2.4 植被数据的采集与处理 为在延河流域获取具有代表性的能满足植被分布预测与制图需要的植被样本数据,本文采用环境梯度分层采样技术进行采样。首先根据降水、温度的梯度变化,将延河流域划分为 17 个环境梯度单元,然后根据每个梯度单元内的栅格数量,确定相应的样点数量。样地的设置采用典型取样法,对林地样方一般设为 10 m × 10 m、草本样地为 2 m × 2 m。每个乔木群落内设置 1 个灌木样方、10 个草本样方,每个灌木群落内设置 10 个草本样方。采集植物样本时,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。数据采集时间为 2005、2006 年的 7—9 月。由于人力、时间的限制,部分样本来源于 2004 年的调查数据。所有调查数据经过数据质量校验,实际采用的样本数为 145 个。建立物种分布模型时,模型需要的响应变量为二元数据,即物种存在用 1 表示、物种不存在用 0 表示。

1.2.5 植被分布预测 采用 S-PLUS 统计软件中的 GRASP (generalized regression analysis and spatial prediction) 分析模块<sup>[28]</sup>生成查找表 (look up table) 和模型,在 ArcView 的 GRASP 模块中对各栅格专题图进行模型运算以实现物种分布的空间预测 (图 1)。其中,查找表标明了各预测变量中栅格数据的范围,保证对每个栅格都进行相应的模型运算,实现对物种在延河流域全区的预测制图。

在模型建立时,选择逐步回归建模,并分析各预测变量之间的相关性,将相关性较大的预测变量剔除,从而解决了预测变量间的共线性问题。在从物种

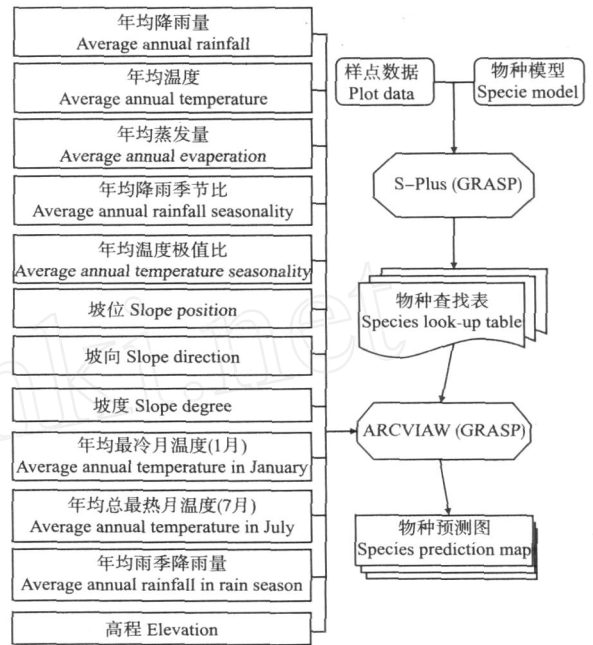


图 1 物种分布的预测流程图

Fig 1 Flow chart of species distribution prediction

预测到群落预测时,主要依据群落建群种的重要性大小进行运算,判定群落的空间分布概率。重要值表示每一个物种的相对重要性,其计算公式为:  $N = (RD + RF + RP) / 3$  式中:  $N$  为重要值;  $RD$  为相对密度;  $RF$  为相对频度;  $RP$  为相对优势度。

1.2.6 预测结果的验证 植被分布预测结果的可靠性,必须通过现状数据验证后才能在实践中得以应用。由于本文中潜在植被分布的模拟结果是基于局部分布的自然植物群落的预测结果,通过遥感数据进行验证存在一定困难,原因是遥感影像解译不能达到群落或物种水平,不能得到与预测结果相对应的信息,另外,遥感影像提供的现状数据会导致大部分区域的植被信息与预测分布区域 (这些区域地表覆盖多不是植被) 的不符。因此,本文采取野外实测数据对分布预测结果进行验证。验证数据采集时间为 2008 年 3 月,共采集样点 40 个,每个样点除记录植被信息外,还记录样点的地理坐标信息,以便从植被预测图上提取相同地点的相应预测值。当实测值与预测值相符时记录为 1、不相符记录为 0,用二项分布检验预测精度。

## 2 结果与分析

### 2.1 延河流域地带性物种分布模型的建立

根据以往对延河流域植被演替规律的研究<sup>[29-31]</sup>,结合本研究的野外调查数据,选择 24 个地

表 1 延河流域主要地带性物种的分布预测模型

Tab 1 GAM models for zonal species in Yanhe River catchment

物种 Species	变量 Variable			模型 Model	总自由度 Total freedom	残差自由度 Residual freedom	剩余残差 Residual
	R	Et	P				
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + P + A	144	118.30	9.93
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(Et, 4) + s(TS, 4)	144	135.14	6.32
百里香 <i>Thymus mongolicus</i>	433.7 ~ 481.9	913.8 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(Et, 4)	49	44.02	5.95
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(Et, 4) + s(S, 4) + A	144	127.22	13.34
丛生隐子草 <i>Cleistogenes caespitosa</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(RS, 4)	142	133.07	14.00
河朔莠花 <i>Wikstroemia chamaedaphne</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + P + A	142	109.67	21.23
冷蒿 <i>Aristida frigida</i>	433.7 ~ 485.7	884 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + P + A	63	42.13	3.57
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(T, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + P	142	125.37	11.08
草木樨状黄耆 <i>Astragalus melitoides</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4)	144	139.18	15.30
苔草 <i>Carex stenophylla</i>	453.7 ~ 532.7	837.3 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + P + A	119	89.25	24.11
灌木铁线莲 <i>Clematis fruticosa</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(Et, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + A	142	125.32	12.89
绣线菊 <i>Spiraea trilobata</i>	444.7 ~ 532.7	852.2 ~ 917.8	P <sub>1</sub> ~ P <sub>4</sub> 、 P <sub>6</sub> ~ P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + P + A	75	46.65	4.40
铁杆蒿 <i>Aristida gnolinii</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(RS, 4) + s(S, 4) + P + A	144	126.10	8.32
芨芨草 <i>Aristida giraldii</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(TS, 4) + A	144	135.05	14.36
荆条 <i>Vitex negundo</i>	467.7 ~ 512.4	836.1 ~ 887.2	P <sub>1</sub> ~ P <sub>3</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(T, 4) + s(Et, 4) + s(S, 4) + P	34	19.35	8.43
丁香 <i>Syringa pekinensis</i>	453.7 ~ 532.7	852.2 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + P + A	112	86.44	22.88
酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	433.7 ~ 512.6	836.1 ~ 954.5	P <sub>1</sub> ~ P <sub>4</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + P + A	95	62.63	8.56
狼牙刺 <i>Sophora vicifolia</i>	433.7 ~ 532.7	836.1 ~ 1012	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(Et, 4) + A	144	138.77	16.08
虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	489.3 ~ 532.7	878.1 ~ 912.6	P <sub>1</sub> ~ P <sub>4</sub> 、 P <sub>6</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + s(TL, 4) + P + A	36	4.40	3.50
黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	462.5 ~ 532.7	852.2 ~ 970.7	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub> 、 P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(TS, 4) + s(S, 4) + P	102	76.53	12.83
延安锦鸡儿 <i>Caragana purshanii</i>	480 ~ 532.7	837.3 ~ 912.6	P <sub>1</sub> ~ P <sub>4</sub> 、 P <sub>6</sub> ~ P <sub>7</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + P + A	68	40.08	1.06
鸡爪槭 <i>Acer palmatum</i>	480 ~ 532.7	837.1 ~ 912.6	P <sub>1</sub> ~ P <sub>4</sub> 、 P <sub>6</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + s(TL, 4) + P + A	66	39.58	1.02
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	500.6 ~ 532.7	852.2 ~ 906.4	P <sub>1</sub> ~ P <sub>5</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + P + A	19	7.55	1.59
子 <i>Cotoneaster multiflorus</i>	80 ~ 532.7	837.3 ~ 912.6	P <sub>1</sub> ~ P <sub>6</sub>	gam(formula = YYY \$sp ~ s(R, 4) + s(T, 4) + s(Et, 4) + s(RS, 4) + s(S, 4) + P + A	69	41.58	2.25

P<sub>1</sub>: 沟间平地 Drainage and flat land; P<sub>2</sub>: 下坡 Lower slope; P<sub>3</sub>: 中坡 Middle slope; P<sub>4</sub>: 上坡 Upper slope; P<sub>5</sub>: 峁顶 Ridge; P<sub>6</sub>: 高平地 High flat; P<sub>7</sub>: 细小沟谷 Narrow gully. R: 年均降雨量 Average annual rainfall (mm); Et: 年均蒸发量 Average annual evaporation (mm); T: 年均温度 Average annual temperature (°C); RS: 降雨季节变化值 Rainfall seasonality (mm); TS: 温度季节变化值 Temperature seasonality (°C); TL: 最冷月平均温度 Average lowest temperature (°C); S: 坡度 Slope; A: 坡向 Aspect YYY \$sp: 物种出现频率的响应变量 Corresponding variable of species frequency; s: 光滑函数 Spline function; 模型中的 4 为预测变量在进行光滑函数处理时的自由度 4 in GAM model was the freedom of variable in the spline function

带性物种,并建立了相应的物种分布预测模型(表1)。该模型清楚地反映了影响研究区物种分布的主要环境要素,如百里香(*Thymus mongolicus*)在延河流域的空间分布主要受蒸发量的影响;铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)的空间分布与降雨的季节变化和坡度都呈复杂的非线性关系,但与坡向和坡位呈线性变化;长芒草(*Stipa bungeana*)的分布主要取决于年均蒸发量和温度的季节变化。通过该模型也可明确影响物种分布的主要环境要素的梯度范围,如百里香主要分布地区的降雨量为433.7~481.9 mm,蒸发量为836.1~1 012 mm,其主要分布于坡面、梁峁和沟间平地。

2.2 延河流域主要地带性物种的分布预测与制图

基于研究区物种分布模型,按照图1所示的流程对上述24个物种的空间分布进行了预测,但限于篇幅,此处只列出4个主要物种的空间分布图(图2)。

图2的图例(物种分布概率)中白色部分表示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;越接近蓝色部分表示物种的出现概率越大;越接近红色区域表示物种在区域出现的概率越低。整体而言,长芒草在延河流域

大部分区域都可能出现,但主要分布在研究区中北部;百里香主要分布在研究区北部海拔较高处;而辽东栎(*Quercus liaotungensis*)与侧柏(*Platycladus orientalis*)则对环境的要求非常严格,仅分布在研究区南部降水较丰富的地区。本研究结果与邹厚远<sup>[32]</sup>对黄土高原植被区划及植物区系的研究结果一致,表明本文建立的物种模型能较好地预测该区物种的实际空间分布。

2.3 延河流域主要植物群落的分布预测与制图

由于自然界的植物都是成群地在一起生长,故预测植被分布时必须考虑植物成群分布(即构成群落)的特点,要以群落为基础上进行植被分布预测才更有意义。因此,本文在物种分布的基础上,进一步考虑了植物群落的种间关系等因素,尤其考虑群落中优势种和伴生种及其对群落结构的影响,然后利用物种分布图,预测了研究区37个主要植物群落的空间分布。限于篇幅,本文仅以4个植物群落的空间分布图为例进行分析。从图3可以看出,铁杆蒿-大针茅(*Stipa grandis*)群落主要分布在延河流域的中北部,而荆条(*Vitex negundo*)狼牙刺(*Sophora viciifolia*)群落则主要分布在延河流域中下游的沟谷地带,酸枣(*Ziziphus jujuba*)-莨花(*Wikstroemia*

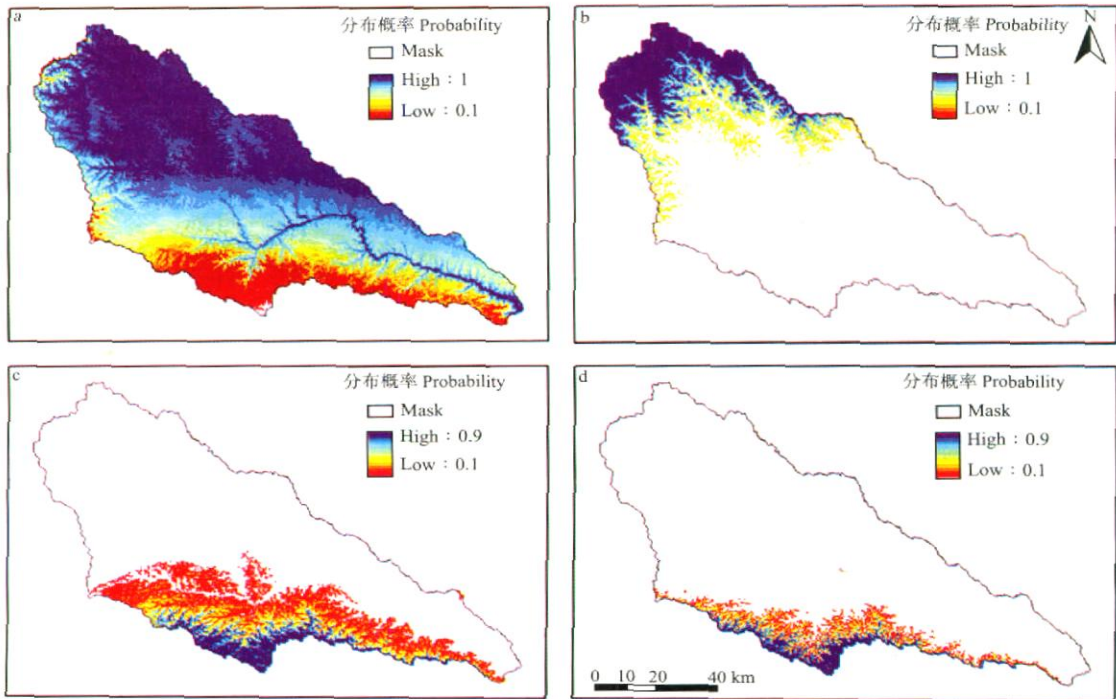


图2 延河流域长芒草(a)、百里香(b)、辽东栎(c)和侧柏(d)的空间分布预测

Fig 2 Spatial distribution prediction of *S. bungeana* (a), *B. ischaemum* (b), *Q. liaotungensis* (c) and *P. orientalis* (d) in Yanhe River catchment



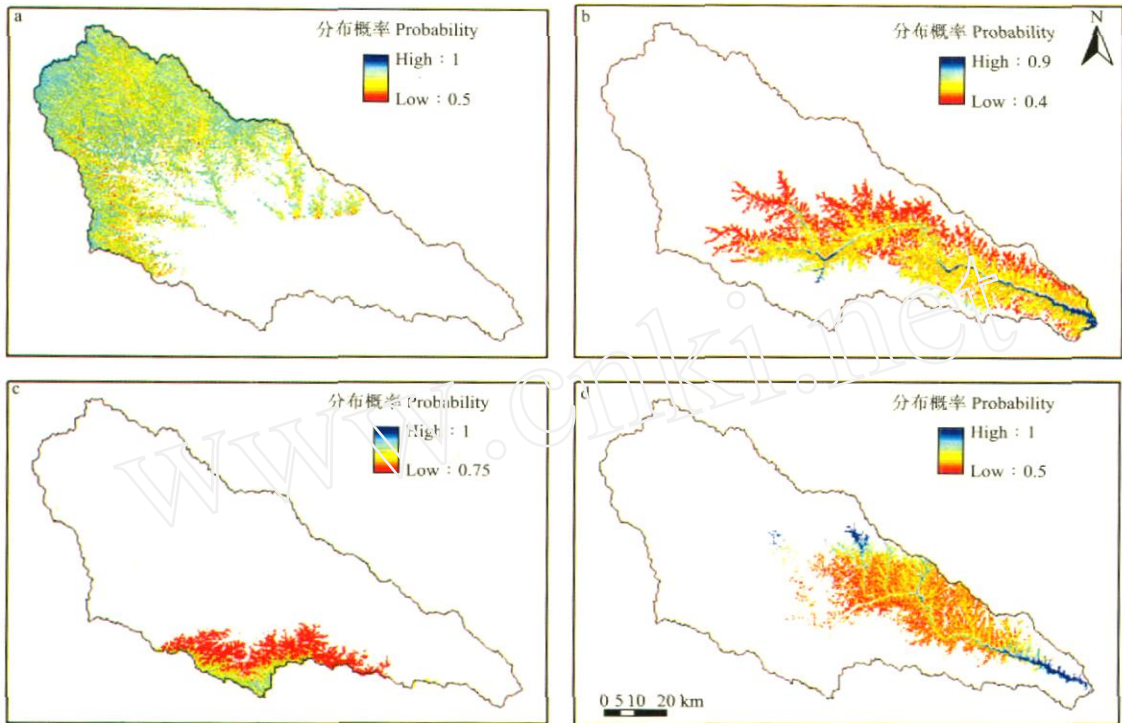


图 3 延河流域铁杆蒿-大针茅群落 (a)、荆条-狼牙刺群落 (b)、子 绣线菊群落 (c) 和酸枣-蕺花群落 (d) 的空间分布预测  
 Fig 3 Spatial distribution prediction of *A. gmelinii*-*S. grandis* (a), *V. negundo*-*S. vicifolia* (b), *C. multiflorus*-*S. trilobata* (c) and *Z. jujuba*-*W. cham aedaphne* (d) in Yanhe River catchment

*cham aedaphne*) 群落主要分布在延河流域中下游的坡面和梁峁, 子 ( *Cotoneaster multiflorus* ) 绣线菊 (*Spirea trilobata*)-丁香 (*Syringa pekinensis*) 群落主要分布在延河流域的南部边缘地带.

2.4 延河流域潜在植被分布的预测与制图

潜在植被分布的预测原则为: 首先根据植被演替规律, 确定延河流域不同区域的地带性植物群落; 然后, 根据单个群落类型的分布概率决定各群落重叠区域的取舍, 即对各群落分布范围的重叠区域, 将分布概率较高的植物群落保留, 作为重叠区域分布可能性最大的群落. 据此, 本文预测了延河流域潜在植被的分布 (图 4). 图 4 中每个栅格中出现的植物群落, 仅为该栅格中潜在分布概率最大的物种, 该栅格中当然也有可能出现其他物种. 由图 4 可以看出, 辽东栎林、侧柏及荆条、酸枣、狼牙刺等主要分布在延河流域南部地区; 在自然恢复状态下, 灌木主要分布在中部地区的沟道等隐域生境; 铁杆蒿、长芒草、大针茅、白羊草和百里香等草本群落则主要分布在延河流域北部的显域生境.

2.5 模拟结果的验证

本文共实测样点数据 40 个, 与预测结果 (图 4) 相符的样点数为 33 个, 二项分布概率  $P = 0.164$

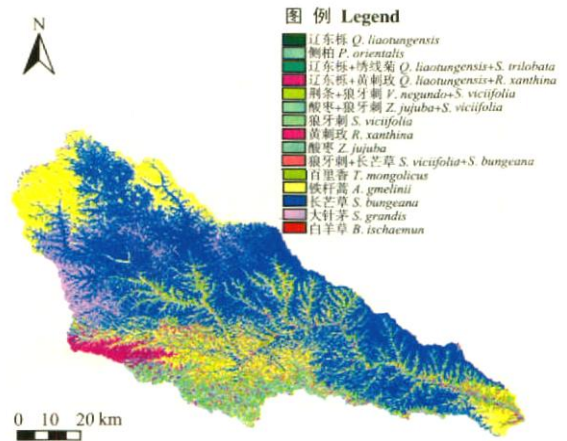


图 4 延河流域潜在植被分布预测  
 Fig 4 Prediction of potential vegetation in Yanhe River catchment

> 0.05. 说明预测值与实测值间的差异不显著, 即本研究的预测值比较符合实际分布.

3 结 语

通过环境变量 (如气温、降水、土壤类型等) 与典型调查所得的植被类型资料之间的某种数学关系来认识更大范围空间内的植被分布状况, 是 20 世纪 70 年代以来生态学发展中的一个重要领域<sup>[33]</sup>, 其

在生态恢复目标的设定<sup>[6]</sup>、目标种的选择<sup>[34]</sup>、恢复过程预测<sup>[35]</sup>、生态恢复潜力评价<sup>[36]</sup>及全球变化对植被的影响评价<sup>[33,37]</sup>等方面得到了广泛应用。近年来,一些新的植被分布预测制图方法广泛应用于植被-环境关系的研究中。其中,广义相加模型以其高度的灵活性、并能有效揭示数据中所隐含的生态关系而在生态学研究中得到成功应用<sup>[6]</sup>。

本文采用广义相加模型在延河流域的案例分析结果表明,该模型预测的结果比较理想,与实际调查的植被分布较吻合。本文的植被分布预测并非简单地利用已有资料加以数字化,而是利用物种空间分布信息与环境变量之间统计的或机制的数学关系进行模拟,这对植被恢复格局规划、植被类型配置等具有重要的应用价值。但该模型在我国植被生态应用方面的研究还较少,本文仅起抛砖引玉之作用,希望有更多研究能够开展起来,为生态恢复重建提供依据。

#### 参考文献

- [1] Zhao C-Y (赵传燕), Feng Z-D (冯兆东), Nan Z-R (南忠仁), et al. Modelling of potential vegetation in Zulihe River watershed of the west-central Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2007, **62** (1): 52-61 (in Chinese)
- [2] Ren G-Y (任国玉). On baseline vegetation in Northern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24** (6): 1287-1293 (in Chinese)
- [3] Hobbs RJ, Kristjansson LJ. Ecological management and restoration: Assessment, setting goals and measuring success. *Ecological Management and Restoration*, 2003, **4**(suppl 1): 2-3
- [4] Wilkins S, Keith DA, Adam P. Measuring success: Evaluating the restoration of a grassy eucalypt woodland on the Cumberland Plain, Sydney, Australia. *Restoration Ecology*, 2003, **11**: 489-503
- [5] Austin MP. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, 2007, **200**: 1-19
- [6] Cawsey EM, Austin MP, Baker BL. Regional vegetation mapping in Australia: A case study in the practical use of statistical modelling. *Biodiversity and Conservation*, 2002, **11**: 2239-2274
- [7] Prach K. Spontaneous succession in Central-European man-made habitats: What information can be used in restoration practice? *Applied Vegetation Science*, 2003, **6**: 125-129
- [8] Prach K, Pysek P. Using spontaneous succession for restoration of human-disturbed habitats: Experience from Central Europe. *Ecological Engineering*, 2001, **17**: 55-62
- [9] Prach K, Pysek P, Bastl M. Spontaneous vegetation succession in human-disturbed habitats: A pattern across seres. *Applied Vegetation Science*, 2001, **4**: 83-88
- [10] Guisan A, Zimmernann NE. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, **135**: 147-186
- [11] Wang YF, Xiao XM. Climatic gradient of main vegetation types in the Loess Plateau region. *Acta Botanica Sinica*, 1993, **35**: 291-299
- [12] Li B (李斌), Zhang J-T (张金屯). Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(1): 82-89 (in Chinese)
- [13] Niu JM (牛建明). Relationship between main vegetation types and climatic factors in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(1): 47-52 (in Chinese)
- [14] Ni J (倪健). Development of Kira's indices and its application to vegetation-climate interaction study of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(2): 161-170 (in Chinese)
- [15] Xiang H (相辉), Yue M (岳明). Quantitative classification and environmental interpretation on forest communities in Loess Plateau of the north of Shaanxi Province. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2001, **21**(4): 726-731 (in Chinese)
- [16] Yu W-D (余卫东), Min Q-W (闵庆文). The features of precipitation in the Loess Plateau and its possible impacts on vegetation distribution. *Resources Science* (资源科学), 2002, **24**(6): 55-60 (in Chinese)
- [17] Austin MP. Spatial prediction of species distribution: An interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 2002, **157**: 101-118
- [18] Guisan A, Edwards JTC, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene. *Ecological Modelling*, 2002, **157**: 89-100
- [19] Moisen GG, Freeman EA, Blackard JA, et al. Predicting tree species presence and basal area in Utah: A comparison of stochastic gradient boosting, generalized additive models, and tree-based methods. *Ecological Modelling*, 2006, **199**: 176-187
- [20] Manel S, Dias JM, Omerod SJ. Comparing discriminant analysis, neural networks and logistic regression for predicting species distributions: A case study with a Himalayan river bird. *Ecological Modelling*, 1999, **120**: 337-347
- [21] Anderson RP, Lew D, Peterson AT. Evaluating predictive models of species' distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 2003, **162**: 211-232
- [22] Miska L, Jan H. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology*, 2005, **67**: 299-315
- [23] Austin MP, Belbin L, Meyers JA, et al. Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: Role of artificial data and theory. *Ecological*

- Modelling*, 2006, **199**: 197-216
- [24] Segurado P, Ara Új MB. An evaluation of methods for modelling species distributions *Journal of Biogeography*, 2004, **31**: 1555-1568
- [25] Heinrich W. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (中国科学院植物研究所), trans *Vegetation of the Earth* Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)
- [26] Li B (李斌), Zhang J-T (张金屯). GIS-based study of vegetation-climate relationship in Loess Plateau *Environment Science and Technology* (环境科学与技术), 2003, **26**(5): 25-26 (in Chinese)
- [27] Boer EPJ, de Beurs KM, Hartkamp AD. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, **3**: 146-154
- [28] Lehmann A, Overton JM, Leathwick JR. GRASP User's Manual New Zealand: Landcare Research, 1999
- [29] Wen ZM (温仲明), Yang Q-K (杨勤科), Jiao F (焦峰). Impacts of soil and water conservation on regional vegetation succession: A case study of Loess Plateau *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2005, **3**(1): 32-37 (in Chinese)
- [30] Wen ZM (温仲明), Jiao F (焦峰), Liu B-Y (刘宝元). Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in forest-steppe zone on Loess Plateau *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2025-2029 (in Chinese)
- [31] Wen ZM (温仲明), Jiao F (焦峰), He X-H (赫晓慧), et al. Spontaneous succession and its impact on soil nutrient on abandoned farmland in the northern edge of the forest zone on the Loess Plateau *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2007, **16**(1): 16-23 (in Chinese)
- [32] Zou H-Y (邹厚远). A study on correlation between vegetation division and construction of forest and grasslands in Loess Plateau of northern Shanxi *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2000, **7**(2): 96-101 (in Chinese)
- [33] Chen Y-F (陈育峰). Research on the response of vegetation to climate change *Progress in Geography* (地理科学进展), 1997, **16**(3): 24-28 (in Chinese)
- [34] Rosenthal G. Selecting target species to evaluate the success of wet grassland restoration *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, **98**: 227-246
- [35] DeGruchy MA, Matthes U, Gerrath JA, et al. Natural recovery and restoration potential of severely disturbed talus vegetation at Niagara Falls: Assessment using a reference system. *Restoration Ecology*, 2001, **9**: 311-325
- [36] Penuela MC, Drew AP. A model to assess restoration of abandoned pasture in Costa Rica based on soil hydrologic features and forest structure. *Restoration Ecology*, 2004, **12**: 516-524
- [37] Liu H-M (刘华民), Wu S-H (吴绍洪). The study on the potential natural vegetation and future prospect *Progress in Geography* (地理科学进展), 2004, **23**(1): 62-70 (in Chinese)

---

作者简介 温仲明,男,1969年生,博士,副研究员.主要从事植被生态恢复重建研究,发表论文 30余篇. E-mail: zmw@ms.iswc.ac.cn

责任编辑 杨弘

---