

# 黄土高原多沙粗沙区植被适宜性空间分析与制图

温仲明<sup>1</sup>, 赫晓慧<sup>2</sup>, 焦峰<sup>1</sup>, Tim R. McVicar<sup>3</sup>, LingTao Li<sup>3</sup>, Tom G. Van Niel<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学中国科学院水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 郑州大学环境与水利学院, 450001, 郑州; 3. CSIRO Land and Water, GPO Box 1666, 2601, Canberra, ACT, Australia)

**摘要** 以黄土高原多沙粗沙区为研究区, 以植物自然分布为基础, 利用 DEM 地形分析方法, 对降雨、温度等因素的空间变化进行分析, 并结合物种的生态环境需求, 利用 GIS 空间分析功能, 对该区 38 个物种适宜性的空间变化进行分析, 并以此为基础, 评价立地对植物生长型的适宜性。结果表明: 利用 DEM 地形分析与 GIS 空间分析, 可以很好地将物种适宜性的空间变化表现出来; 利用 VB 编程, 结合 GIS, 将物种适宜性与立地适宜性的空间变化予以图形显示。随着数据的积累和数据采集手段的改进, 所采用的方法对于区域植被空间适宜性评价可提供积极的借鉴作用。

**关键词** 植被适宜性; 地形分析; 薄板样条法

## Mapping the vegetation suitability in the Coarse Sandy Hilly Area of the Loess Plateau, China

Wen Zhongming<sup>1</sup>, He Xiaohui<sup>2</sup>, Jiao Feng<sup>1</sup>, Tim R. McVicar<sup>3</sup>, LingTao Li<sup>3</sup>, Tom G. Van Niel<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, NWSUAF, CAS and MWR, 712100, Yangling, Shanxi; 2 School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, 450001, Zhengzhou: China; 3 CSIRO Land and Water, GPO Box 1666, 2601, Canberra, ACT, Australia)

**Abstract** Vegetation suitability mapping is valuable for the selection of species for implementing the Re-Vegetation Program in the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China. A Boolean model was introduced, which used thin plate smoothing spline interpolation method to model the distribution of precipitation and temperature, and analyzed the suitability of 38 species using GIS techniques as well as considering the requirement of these species for environmental conditions. Then we overlaid the single suitability map of 38 species, and got the frequency map of species for a specified site. Here high frequency means the higher suitability of a site for re-vegetation. The result showed that with combination of topographic analysis based on DEM and GIS functions the spatial changes of vegetation suitability can be modeled. These spatial changes on the screen using Visual Basic language and GIS functions was also demonstrated, thus helping decision makers to have an intuitionistic view of species and site suitability changes over large area. Although some more powerful models such as GLM and GAM were not employed due to the data limit, yet the method here still can provide some insightful implication for similar studies in this area.

**Key words** vegetation suitability; topographic analysis; thin plate smoothing spline interpolation

收稿日期: 2006-07-06 修回日期: 2006-11-07

项目名称: 国家自然科学基金项目“半干旱黄土丘陵区植被自然恢复与人工调控”(40301029); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目“陕北黄土高原退化生态系统自我修复能力评价研究”(B22012900); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“黄土高原水土保持的区域环境效应”(KZCX3-SW-421); 中国科学院水土保持研究所领域前沿项目“植被恢复重建与立地环境变化的模拟与评价”(SW04107)

第一作者简介: 温仲明(1969-), 男, 博士, 副研究员。主要研究方向: 土地利用及生态恢复重建等。E-mail: zmw@ms.iswc.ac.cn

黄土高原多沙粗沙区系我国北方农牧交错带, 具有典型的生态过渡带特征。该区丘陵起伏, 沟壑纵横, 地形变化对水热条件的空间变化具有明显的再分配作用, 使得立地环境条件多变, 对该地区人工植被恢复造成很大困难。自 20 世纪 50 年代以来, 该地区进行较大规模的人工植被恢复工程, 如“三北”防护林工程等, 但由于物种选择不当<sup>[1]</sup>或对物种适宜性的空间分布缺乏认识, 人工植被所引起的土壤水分生态问题, 如土壤干层, 也渐渐显露<sup>[2-5]</sup>, 对植被的持续发展及其效益的正常发挥产生重要影响。尽管目前有部分研究对物种的适宜性问题进行了探讨, 如贺康宁等<sup>[6]</sup>根据光合作用与土壤水分变化的关系, 确定了刺槐、柠条和苹果 3 个常见物种适宜的土壤水分环境; 徐春达等<sup>[7]</sup>根据土壤适宜性对黄土高原种植油松的可行性进行了分析, 但这些研究主要针对局部地区, 难以对区域植被恢复提供指导。笔者以该地区主要物种自然分布为基础, 利用 DEM 的地形分析方法, 对降雨、温度等因素的空间变化进行分析, 并结合物种生物学特性, 利用 GIS 空间分析功能, 对这些物种适宜性的空间变化进行分析, 为该地区人工植被恢复与重建提供科学的依据或为更深入的研究提供新的实验研究方法。

### 1 研究区概况

研究区为黄土高原多沙粗沙区(图 1), 涉及 72 个县, 42 个流域, 面积 11. 272 8 万 km<sup>2</sup>, 是黄土高原水土流失最为严重的地区, 黄河 55. 7% 的泥沙来源于此, 粗泥沙 (> 0. 05 mm) 占全流域的 73%<sup>[8]</sup>; 因此, 该区植被恢复重建对于控制水土流失、减少入黄泥沙、缓解下游压力, 具有非常重要的作用。

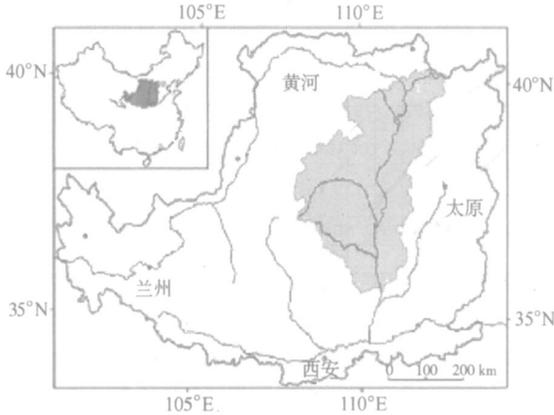


图 1 研究区位置及其范围

Fig. 1 Location and scope of study area

从 650mm(西南)到 200mm(西北)不等, 且 60% 的降雨量发生在夏季(7—9 月)。由于降雨量较低, 且变化较大, 水分是该区植被恢复重建的重要限制因子。同时该地区地形破碎、地形起伏较大, 地形对降雨、温度等气候因子具有强烈的再分配作用, 决定了该区植被生存环境的复杂性和多样性。根据邹厚远<sup>[9]</sup>、陈云明等<sup>[10]</sup>的研究, 该区植被界的自然分布自东南向西北依次为森林区、森林草原区和典型草原区。

### 2 研究方法

#### 2.1 模型选择

植被适宜性评价, 目前有不同的模型可供选择<sup>[11-12]</sup>。图 2 对主要模型进行了分类, 并对模型选择原则进行了分析。一般地, 选择什么样的模型, 不仅取决于研究目的, 也取决于物种对环境因子的需求、数据的可获得性以及数据的格式、尺度等是否满足区域空间分析要求。该模型为概化模型, 具有不考虑干扰和动态变化、不考虑气候变化和面向区域或大尺度等特点。根据项目拥有的数据基础, 选择布尔模型对植被的适宜性进行评价, 所有物种的评价均以栅格数据为基础。图 2 给出了模型选择过程和原则。其中植被适宜性评价因子分类借鉴了 Austin<sup>[13]</sup>对影响植物分布环境因子分类的研究, 分为 3 类: 1) 资源性因子类, 可供植物直接利用的因子, 如 CO<sub>2</sub>, N, P 等; 2) 直接因子类, 植物不能直接利用, 但却对植物生理过程产生影响的因子, 如 pH; 3) 间接因子类, 不对植物生理过程产生影响, 但却通过对其他环境因子的影响而对植物的分布产生影响, 如地形对降雨、温度等因子。

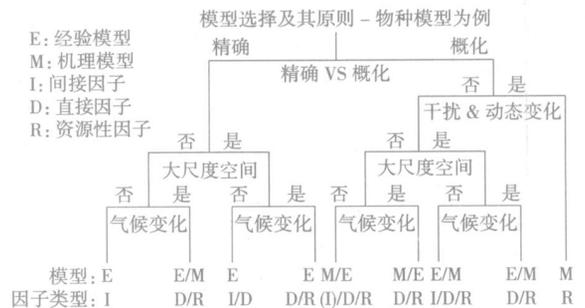


图 2 植被适宜性评价模型及其选择原则

Fig. 2 Criteria for selection of models for vegetation suitability assessment

#### 2.2 评价因子选择与处理

虽然 Austin 对植被分布的影响因子进行了分类, 但这些因子对植被分布的影响却具有明显的尺

该区横跨半湿润、半干旱和干旱区, 平均降雨量

度效应。根据 H·沃尔特<sup>[14]</sup>在《世界植被》中表述, 在宏观尺度上, 对植被分布具有控制作用的主要是气候因素, 如温度、降雨等, 但在局部地区, 地形变化对植被的分布具有更为重要的作用, 它们往往通过对水、热条件的再分配而影响物种分布。因此, 将降雨、温度和地形列为主要的评价指标。此外, 土壤是植被发生发育的基础, 对物种分布亦有重要影响。故在考虑上述因素的基础上, 参考现有研究并考虑数据的可获得性, 选择了年均降雨量(R)、7月份平均温度(D)、地形因子(I)、土壤 pH(D)、土壤全氮(R) 5 个具有代表性的环境因子。其中: I 为间接因子类; D 为直接因子类; R 为资源性因子类。尽管其他一些环境变量也对植被的分布变化有所影响, 但针对较大尺度而言, 这些因子的作用非常有限, 暂

不予考虑。

年均降雨量与 7 月份平均温度主要根据研究区内以及边缘的气象站数据(多沙粗沙区及其周边共 100 站点), 利用薄板样条法(thin plate smoothing spline interpolation, 用 ANUSPLIN 软件实现)进行插值<sup>[15-16]</sup>, 形成空间栅格数据。土壤 pH 值与土壤全氮含量数据来源于黄土高原土壤资源<sup>[17]</sup>, 然后以黄土高原 1:50 万土壤图(矢量图)为基础, 将相应的属性值加入, 形成专题图, 然后将其转为栅格数据(栅格大小为 100 m)。地形对降雨、光照等因素具有强烈的二次分配作用。根据研究区地形特征, 将其划为 6 种类型: 梁峁(LM)、阳坡(SFS)、阴坡(NFS)、低平地(FB)、陡沟坡(SSG)、石质山地(RM)。最后各图均转为栅格数据图(图 3)。

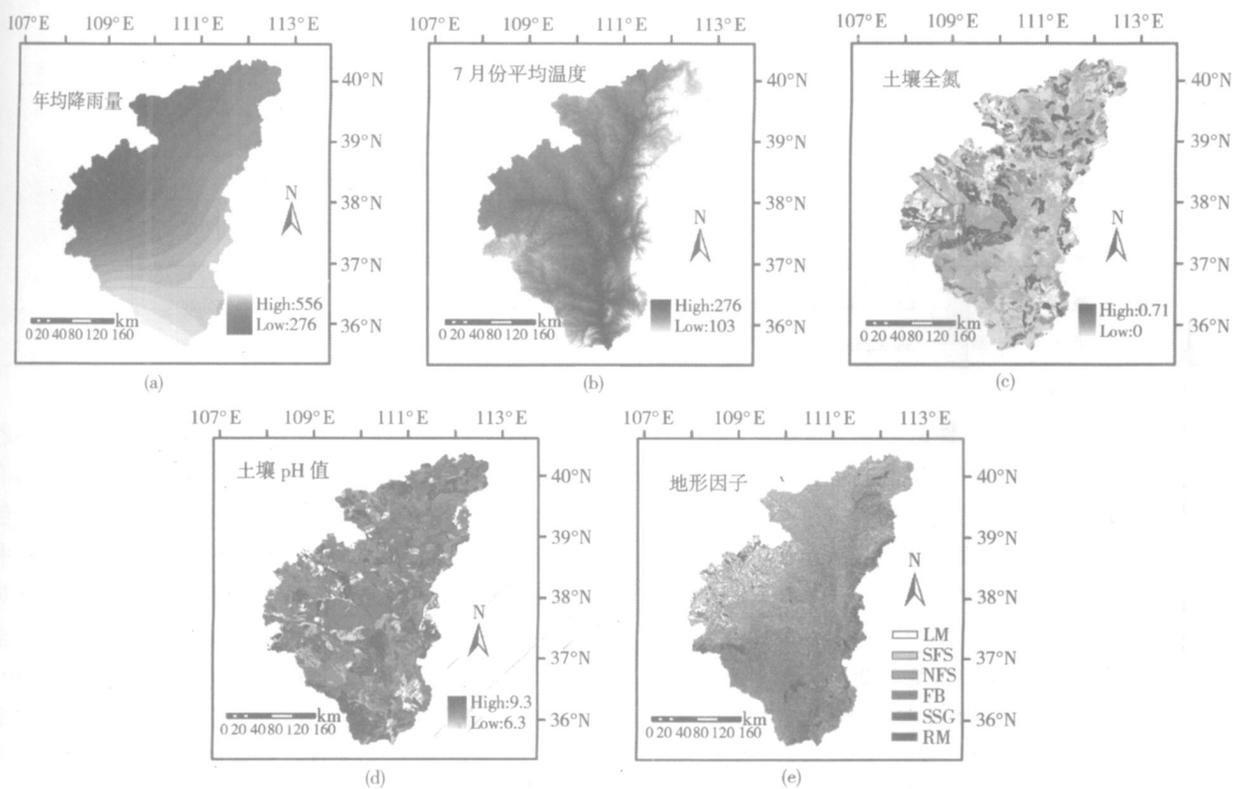


图 3 黄土高原多沙粗沙区植被适宜性评价因子

Fig. 3 Factors for vegetation suitability assessment

### 2.3 物种选择

用于黄土高原植被恢复重建的物种, 可以是灌木、乔木、草本植物, 也可以是不同乔灌、灌草或乔灌草组成的混交类型。目前对该地区植树造林物种选择进行了较多的研究, 这些研究选择的物种主要是乔灌木树种, 例如袁嘉祖等<sup>[18]</sup>选择了 66 个乔灌木树种进行研究; 赵金荣等<sup>[19]</sup>则对黄土高原灌木种类进行较为详细的调查。笔者对植被适宜性进行评

价, 物种选择既是以现有研究为基础, 同时考虑另 2 个因素: 1) 数据的可获得性, 即选择一个物种时, 要考虑到相应环境因子数据是否能够满足分析需要; 2) 尽量选择乡土树种, 或者在本地具有较长栽培历史, 已适应当地的气候条件。根据上述原则, 选择了 38 个物种, 其中 24 个是乔木树种, 14 个是灌木树种(表 1)。

表 1 适宜性评价选择的主要物种

Tab. 1 The species selected for suitability assessment

编号	乡土树种	生长型	中文名称	拉丁学名	编号	乡土树种	生长型	中文名称	拉丁学名
1*	是	乔木	油松	<i>Pinus tabulaeformis</i>	20	是	灌木	怪柳	<i>Tamarix</i> spp.
2*	是	乔木	白桦	<i>Betula Platyphylla</i>	21	是	灌木	乌柳	<i>Salix cheilophila</i>
3*	是	灌木	山毛桃	<i>Amygdalus davidiana</i>	22*	是	乔木	臭椿	<i>Ailanthus altissima</i>
4	是	灌木	黄刺梅	<i>Rosa xanthina</i>	23*	是	灌木	沙棘	<i>Hippophae rhamnoides</i>
5*	是	乔木	辽东栎	<i>Quercus mongolica</i> var. <i>liaotungensis</i>	24	是	乔木	青杨	<i>Populus cathayana</i>
6*	是	乔木	白榆	<i>Ulmus pumila</i>	25	否	乔木	新疆杨	<i>Populus alba</i> var. <i>pyramidalis</i> cv.
7*	是	乔木	小叶杨	<i>Populus simonii</i>	26*	是	乔木	桃	<i>Prunus persica</i>
8*	是	乔木	侧柏	<i>Platydadus orientalis</i>	27*	是	乔木	杏	<i>Prunus armeniaca</i>
9	是	灌木	荆条	<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	28	是	乔木	毛白杨	<i>Populus tomentosa</i>
10	是	灌木	狼牙刺	<i>Siphora davidii</i>	29*	是	乔木	河北杨	<i>Populus hpeiensis</i>
11*	否	乔木	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	30*	是	乔木	苹果	<i>Malus pumila</i>
12*	是	乔木	旱柳	<i>Salix matsudana</i>	31*	是	乔木	梨	<i>Pyrus bretschneideri</i>
13	是	灌木	酸枣	<i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	32	是	乔木	桑	<i>Morus alba</i>
14	是	乔木	山杨	<i>Populus davidiana</i>	33	是	乔木	核桃	<i>Juglans regia</i>
15*	是	灌木	虎榛子	<i>Ostryopsis davidiana</i>	34	是	灌木	文冠果	<i>Xanthoxeras sorbifolia</i>
16*	否	灌木	紫穗槐	<i>Amorpha fruticosa</i>	35*	是	乔木	杜梨	<i>Pyrus betulaeifolia</i>
17	是	灌木	沙枣	<i>Elaeagnus angustifolia</i>	36	是	乔木	楸树	<i>Catalpa bungei</i>
18*	是	灌木	柠条	<i>Caragana korshinskii</i> Kom.	37*	是	乔木	枣	<i>Ziziphus jujube</i>
19*	是	灌木	沙柳	<i>Salix psammophila</i>	38	否	乔木	箭杆杨	<i>Populus nigra</i> var. <i>hevestina</i>

注: \* 表示常见树种。

## 2.4 不同物种对生态条件的需求

物种对生态条件的需求是适宜性评价的基础。笔者选择的 38 个物种的适宜的生态条件资料主要来自于文献[19-22], 主要以物种的最佳分布区的生态条件为基础。各物种对这 5 个生态因子的需求见表 2。

## 2.5 物种适宜性评价与立地分析

物种适宜性评价, 既是根据物种对生态因子的需求, 在 ARCGIS 环境下, 通过编写程序, 将生态条件符合特定物种需求的栅格选出, 这些栅格就是该物种适宜种植的区域; 在获得各个物种的空间适宜性分布图后, 将这些再按乔木、灌木分组, 进行叠加, 然后即可获得某栅格内适宜的物种数量及其名称。某栅格内适宜的物种适量愈多, 则该栅格对相应生长型的(乔木或灌木)的适宜性越高, 从而可以对立地的适宜性进行判定, 评价流程见图 4。

## 3 结果与分析

### 3.1 物种适宜性评价图

根据 38 个物种对生态条件的需求, 以现有 5 个

生态因子数据为基础, 对各个物种的空间适宜性进行评价并制图。由于图件较多(38 个评价图), 只给出部分常见树种的适宜性评价图(图 5), 其中灰色部分为适宜区域, 白色部分为不适宜区域。从图中可以清楚地看到这些物种适宜性的空间分布, 这对于不同区域的物种选择无疑可提供较好的依据。比如刺槐、油松、侧柏可在研究区内大部分地区栽种, 沙柳、乌柳则更多地适宜在西北部地区, 经济林木则在西南部更为适宜。但是这些物种的适宜性是根据生物学规律, 尤其是根据其在黄土高原自然分布区的环境确定的, 因此, 本质上是一种基于规则的评价, 所以与报道的分布区范围基本相符。

### 3.2 生境适宜性分析与制图

立地适宜性评价, 对于土地资源的合理利用具有重要意义。根据物种适宜性空间分布图进行适当的空间分析, 利用空间叠加, 即可求出某一立地对不同植被生长型的适宜性。从实践考虑, 将 38 个物种按照所有物种、乔木树种、灌木树种进行分类, 然后分别叠加, 求得相应的特定立地条件下的物种出现的频率, 然后即可根据出现频率的大小, 可以对立地的适

表 2 不同物种对生态条件的需求

Tab. 2 Requirement of 38 species for ecological conditions

编号	全氮/%	pH	年均降雨量/mm	7月平均温度/℃	地形
1*	无限制	> 5.6 (< 6.5)	≥200( ≤400)	≥14	LM, NFS, RM
2*	无限制	> 5.6 (< 6.5)	> 400	无限制	SFS, RM
3*	无限制	无限制	> 200	无限制	SFS, RM
4	无限制	无限制	> 400	无限制	(SFS+ ), RM
5*	无限制	无限制	> 200	无限制	RM
6*	无限制	无限制	> 200	无限制	SFS, NFS, FB, RM
7*	≥0.05	无限制	> 200	无限制	SFS, NFS, FB
8*	无限制	无限制	> 200	≥14	(LM+ ), SFS, FB, RM
9	无限制	无限制	> 200	≥14	SFS
10	无限制	无限制	> 200	≥14	SFS
11*	无限制	无限制	> 200	≥14	(LM- ), SFS, NFS, FB, RM
12*	无限制	无限制	> 200	≥14	(SFS+ ), FB
13	无限制	无限制	> 300(400)	≥14	SFS, RM
14	无限制	无限制	> 400	≥14	(NFS+ ), RM
15*	无限制	无限制	> 400	≥14	(NFS+ ), RM
16*	无限制	无限制	> 200	无限制	(LM+ ), SFS, FB, RM
17	无限制	无限制	> 200	无限制	SFS, FB, RM,
18*	无限制	无限制	> 200	无限制	LM, SFS, FB
19*	无限制	无限制	> 200	无限制	FB,
20	无限制	无限制	> 400(200)	无限制	(LM- ), SFS, NFS, FB
21	无限制	无限制	> 200	无限制	FB,
22*	无限制	无限制	> 200	无限制	LM, SFS, FB
23*	无限制	无限制	> 200(400)	≥14	LM, SFS, NFS, FB, RM
24	≥0.05	无限制	> 200(400)	无限制( ≥14)	(LM- ), NFS, FB
25	≥0.05	无限制	> 200(400)	无限制( ≥14)	(LM- ), FB
26*	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, FB, RM
27*	≥0.05	无限制	> 200(400)	≥14	LM, SFS, FB, RM
28	≥0.05	无限制	> 500(400)	≥14	LM, FB
29*	≥0.05	无限制	> 200(400)	≥14	NFS, (FB+ ), RM, (SFS- )
30*	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, FB, RM
31*	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, FB, RM
32	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, FB, (RM- )
33	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, SFS, FB, RM
34	≥0.05	无限制	> 400	≥14	LM, SFS
35*	≥0.05	无限制	> 300(400)	≥14	LM, SFS, FB,
36	≥0.05	无限制	> 400	≥18	NFS, FB, (LM- )
37*	≥0.05	无限制	> 400	≥18	NFS, FB, (LM- )
38	> 0.08	无限制	> 400	≥14	LM, FB,

注: LM 为梁峯; SFS 为阳坡; NFS 为阴坡; FB 为低平地; SSG 为陡沟坡; RM 为石质山地。括号中的数值是根据实际分布对现有文献引用值的修正; 括号中地形因子后面的+ 表示新增地形类型; - 表示除去的地形类型。

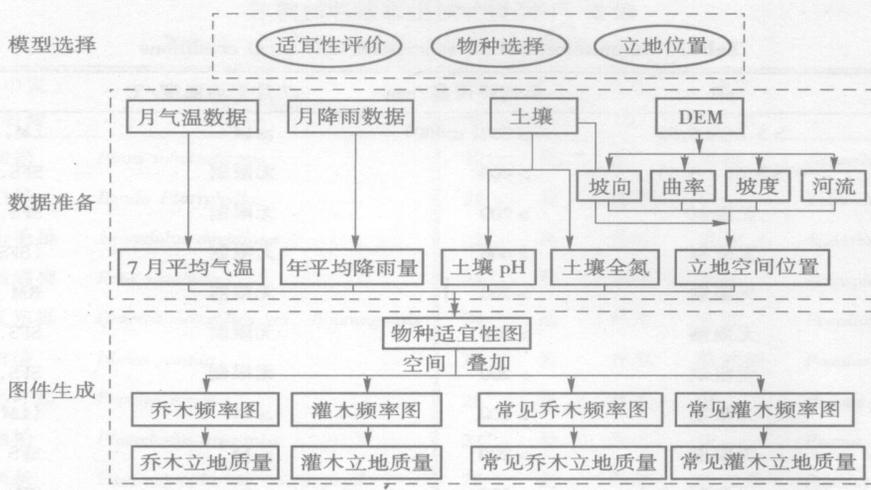


图 4 物种适宜性评价流程

Fig. 4 Flowchart of the suitability assessment of species

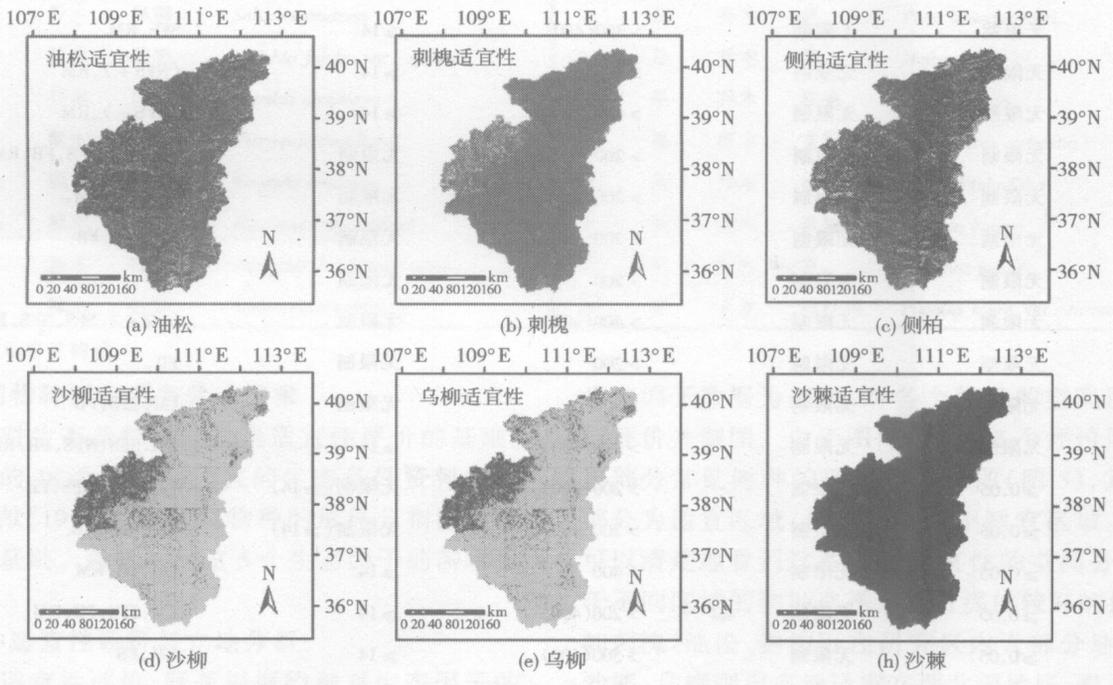


图 5 黄土高原多沙粗沙区主要物种适宜性评价图( 示例)

Fig. 5 Suitability maps of main species in the coarse sandy hilly area of the loess plateau

宜性进行分级或评判。图 6 给出了所有物种、乔木树种以及灌木树种的空间分布频率。可以看出，立地条件对物种的空间适宜性具有较大的差异，总体上，南部生境对物种的适宜性较高；但由于以 DEM 地形分析为基础，可以有效地将地形分析对水、热条件的影响表现出来，因此，同样可以将北部地区生境适宜性较高的局部环境清晰地表现出来。

### 3.3 物种与生境适宜性评价的图形显示

根据提出的方法，可以初步分析出物种适宜性的空间分布以及生境适宜性的空间变化；但是在实

践中，往往不太直观或过于抽象而难以利用，因此，利用 VB 语言编程，将某一立地适宜的物种总数，以及各物种的名称同时予以显示，从而帮助当地政府决策人员或相关管理人员直观地了解适宜物种的空间分布，从而更为有效地决策。以绥德县为例，对常见物种的适宜性进行分析与显示( 图 7)。图中黑色方框为鼠标点击区域，右边为点击后弹出的适宜物种总数及各物种编码。从图中可以看到，所点击区域的适宜的常见物种为 8 种，其编号分别为：SP1、SP6、SP7、SP11、SP15、SP23、SP29 和 SP37。这样在决

策时,即可据此安排相应的物种进行植被恢复重建 工作。

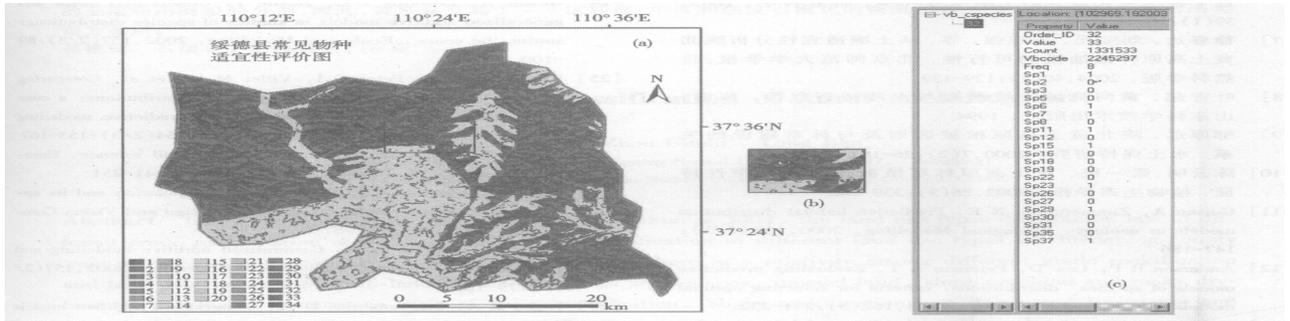


图 6 物种空间分布频率图

Fig. 6 Frequency maps of species distribution

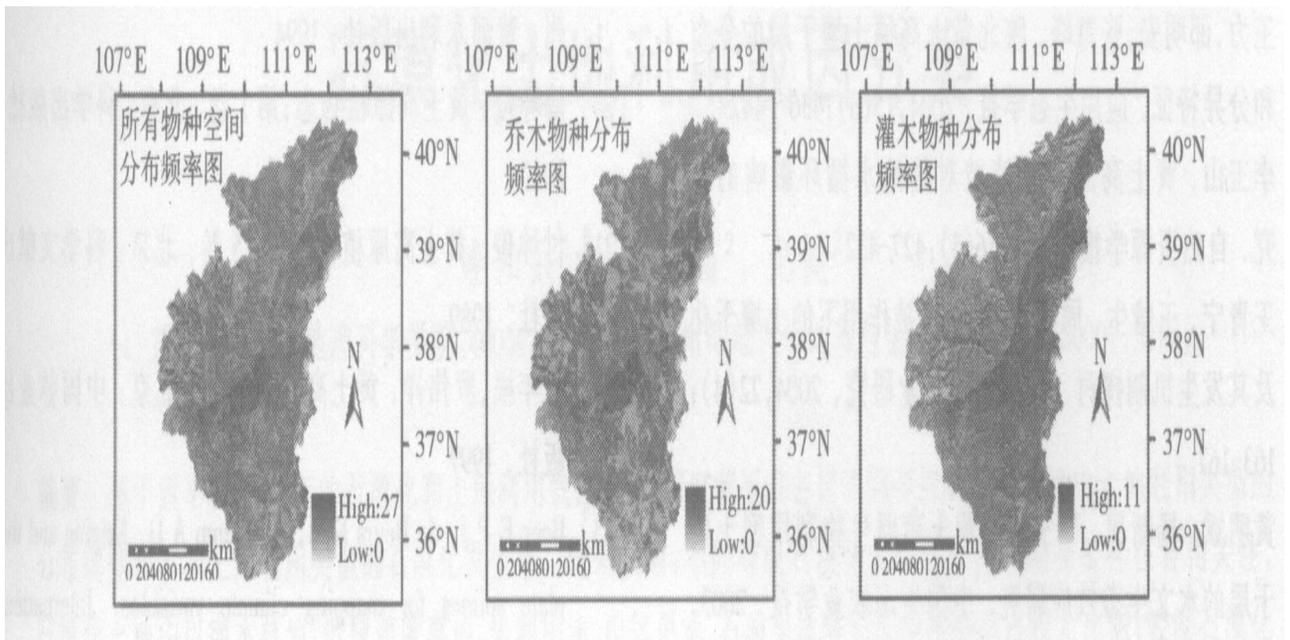


图 7 物种与生境适宜性评价的图形显示(以绥德县为例)

Fig. 7 Displaying map of the assessment of suitability of species and habitat (a case study in Suide County)

### 4 讨论

黄土高原是我国典型的气候、生态过渡带,植被恢复重建面临的环境条件复杂多变,加之该地区地形起伏变化较大,降雨、温度等因子受地形的影响明显,更加剧了这种困难;因此,如何选择适宜的物种或者对立地环境进行评价,对于该区的植被恢复重建具有重要的实践意义。笔者以物种的自然分布为基础,利用 GIS 空间分析功能,综合降雨、温度、土壤等环境因子,对物种的空间适宜性以及生境质量做了初步分析,显示出该方法对大尺度植被生态研究方面的应用价值。

Hutchinson 提出的薄板样条插值技术,由于可以将海拔等地形因子作为协变量,对降雨、温度等受地形再分配影响较大的因子进行空间分析,较传统的

空间差值法有了较大改进<sup>[15-16, 23]</sup>,为研究提供了较好的方法支持;但由于植被、土壤等数据的限制,本研究只采用布尔模型做较简单的空间分析。从国外的研究现状看,这方面已经有了相当的进展,比如目前利用 GLM 或 GAM 模型,综合利用 GIS 空间分析技术、DEM 地形分析和非参数统计等,对植被的空间分布或生境适宜性进行分析,已经具有了实际应用的案例<sup>[11-12, 24-32]</sup>。一些研究机构更是开发了将模型统计与 GIS 结合的统计模块,专门用于植被空间分析<sup>[33]</sup>,因此,本研究在这方面所做的探讨,只希望能够起到抛砖引玉的作用,希望能有更多的相关研究不断开展起来。

### 5 参考文献

[1] 王晗生. 黄土高原植被恢复策略回顾. 中国水土保持

- 科学, 2004, 2(1): 42-45
- [2] 王力, 邵明安, 张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. 应用生态学报, 2004, 15(3): 436-442
- [3] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432
- [4] 王青宁, 王晗生, 周景斌, 等. 植被作用下的土壤干化及其发生机制探讨. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 163-167
- [5] 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 113-116
- [6] 贺康宁, 田阳, 史常青, 等. 黄土半干旱区集水造林条件下林木生长适宜的土壤水分环境. 林业科学, 2003, 39(1): 10-16
- [7] 徐春达, 刘宝元, 王志强, 等. 从土壤适宜性分析陕北黄土高原种植油松的可行性. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 40(1): 129-132
- [8] 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律. 济南: 山东科学技术出版社, 1994
- [9] 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
- [10] 陈云明, 梁一民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. 植物生态学报, 2002, 26(3): 339-345
- [11] Guisan A, Zimmernann N E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186
- [12] 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
- [13] Austin M P. Models for the analysis of species' response to environmental gradients. *Vegetatio*, 1987, 69: 35-45
- [14] 沃尔特. 世界植被. 中国科学院植物研究室, 译. 北京: 科学出版社, 1984
- [15] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9: 385-403
- [16] Hutchinson M F. The application of thin plate smoothing splines to continent wide data assimilation// Jasper J D. Data assimilation systems, BMRC Research Report No. 27, Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991: 104-113
- [17] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区综合治理开发考察系列研究: 黄土高原地区土壤资源及其合理利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991
- [18] 袁嘉祖, 张汉雄. 黄土高原地区森林植被建设的优化模型. 北京: 科学出版社, 1991
- [19] 赵金荣, 孙立达, 朱金兆. 黄土高原水土保持灌木. 郑州: 黄河水利出版社, 1994
- [20] 傅坤俊. 黄土高原植物志: 第1卷. 北京: 科学出版社, 2000
- [21] 傅坤俊. 黄土高原植物志: 第5卷. 北京: 科学文献出版社, 1989
- [22] 邹年根, 罗伟祥. 黄土高原造林学. 北京: 中国林业出版社, 1997
- [23] Boer E P J, de Beus K M, Hartkamp A D. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, 3(2): 146-154
- [24] Guisan A, Edwards T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 89-100
- [25] 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. *Ecological Modelling*, 2003, 164(2/3): 153-167
- [26] Lane P W. Generalized linear models in soil science. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(2): 241-251
- [27] Rajan D, Chaudhuri S. Generalized interpolation and its application in super resolution imaging. *Image and Vision Computing*, 2001, 19(13): 957-969
- [28] Barry S C, Welsh A H. Generalized additive modelling and zero inflated count data. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 179-188
- [29] Rigby R A, Stasinopoulos D M. Generalized additive models for location, scale and shape (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 2005, 54(3): 507-554
- [30] Guisan A, Weiss S B, Weiss A D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 1999, 143(1): 107-122
- [31] Kauermann G, Opsomer J D. Local likelihood estimation in generalized additive models. *Scandinavian Journal of Statistics*, 2003, 30(2): 317-337
- [32] Miller J, Franklin J. Modeling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 227-247
- [33] Lehmann A, Overton J M, Leathwick J R. GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2/3): 189-207