

# 基于自然植被的延河流域生物量空间分布格局评估

张 佳<sup>1</sup>, 温仲明<sup>1,2</sup>, 杨尚斌<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 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:** 研究植被的生物量分布及环境对生物量的承载状况, 对于区域植被恢复规划、布局等具有重要意义。以黄土丘陵区延河流域为研究区, 以自然植被为参照, 利用广义相加模型( GAM, generalized additive model) 及 GIS 空间分析技术预测了流域潜在生物量的分布格局; 同时, 利用遥感资料, 预测出流域现有的植被生物量及其空间格局。以潜在生物量为参照, 现实生物量为基础, 通过空间分析, 对流域环境的生物量承载状况进行评估。结果表明: 在流域东南部地区, 潜在生物量高于现实生物量; 而在中北部, 有较多的立地环境的现实生物量大于潜在生物量, 超过了环境生物量的最大现实承载能力, 导致人工植被在这些立地环境条件下的退化。识别这些植被, 对于流域植被的改造和利用、流域植被恢复规划与布局等具有重要的应用价值。

**关键词:** 生物量; 广义相加模型; 植被指数; 分布预测

中图分类号: Q 948. 3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0035-05

## Spatial Distribution Evaluation of Biomass in Yanhe River Catchment Using Natural Ecosystem as a Reference.

ZHANG Jia<sup>1</sup>, WEN Zhong-ming<sup>1,2</sup>, YANG Shang-bin<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The study of the distribution of vegetation biomass and environmental biomass carrying condition is of great importance to the restoration planning and layout of regional vegetation. This study chooses Yanhe River catchment as a case study and chooses natural ecosystem as a reference to predict the spatial distribution of potential biomass in the catchment through the use of generalized additive model (GAM) and GIS spatial analysis method. In addition, By using remote sensing data to predict the actual biomass and its spatial distribution in the catchment. Then the potential biomass is taken as a reference and compared with the reality biomass to evaluate environmental biomass carrying condition of catchment by spatial analysis. The results showed that potential vegetation biomass is higher than the reality of vegetation in the southeast of Yanhe River catchment; but in the north-central region, the actual biomass in a lot of local sites is higher than the potential biomass, exceeding the largest real carrying capacity of environment. This study overcomes the shortcomings of small scale (slope or plot scales) researches in spatial changes and can give a better assessment of the environmental biomass carrying condition and the spatial distribution in Yanhe River catchment, and is of great value to the improvement and utilization of degraded vegetation and the restoration planning and layout of regional vegetation.

**Key words:** biomass; generalized additive model; vegetation index; distribution prediction

在水土流失严重的黄土丘陵区, 植被恢复重建 对控制水土流失、改善生态环境具有至关重要的作

\* 收稿日期: 2009-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871246); 国家科技支撑课题(2006BAD09B03); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(2006H X01)

作者简介: 张佳(1985-), 女, 陕西富平县人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复及 GIS 应用研究。E-mail: zhjiaeray@gmail.com

通信作者: 温仲明(1969-), 男, 陕西定边人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复重建等方面的研究工作。E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

用。但该地区特殊的环境条件,如降水量少、蒸发量大、气候干燥、土壤水分不足等,使得植被恢复重建存在诸多困难,物种、结构单一,“成活率低、保存率低、生态效益低”等问题较为普遍<sup>[1]</sup>,在局部地区,植被对土壤水分的消耗超过了土壤水分的恢复补偿,形成利用性土壤干层<sup>[2]</sup>,导致这些人工植被出现不同程度的退化。针对上述问题,不少研究人员分别从物种选择<sup>[3]</sup>、植被重建的水文效应<sup>[4]</sup>、土壤水分的植被承载力<sup>[5]</sup>、自然植被模拟<sup>[6]</sup>等方面进行了较多的研究,为植被恢复重建提供了较好的理论依据,但上述研究大多在小尺度(坡面或样方)进行或以点带面进行粗略的空间分析,从环境要素的空间异质性及植被的空间分布方面研究较少(集中于自然植被),少有研究从生物量角度对环境的植被承载能力进行分析。而根据生态代谢理论,区域生物量的形成与生态代谢密切相关<sup>[7-8]</sup>,自然条件下环境所能承载的生物量受环境能量控制,有一定的阈值。从现实角度分析,自然演替形成的与环境处于相对稳定状态的植物群落,代表了一定立地环境下植被发展的最高水平<sup>[9]</sup>,其生物量是自然条件下环境所能承载的最大现实生物量。但由于人为干扰或利用,现实生物量往往会超出环境所能承载的最大量,导致植被出现不同的退化。因此,从生物量角度分析这些退化植被的空间分布或对环境的生物量承载状况进行评估,有望对这些退化植被的改造和利用、植被恢复规划与布局等提供重要的科学依据。

鉴于此,本文试图在现有研究的基础上,以黄土丘陵区延河流域为研究区,以自然植被为参照,从生物量角度出发,采用模型法等分析流域的潜在生物量和现有生物量,并通过空间分析,对流域的生物量承载状况进行评估。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究区为延河流域,位于  $36^{\circ}23' - 37^{\circ}17' N$ ,  $108^{\circ}45' - 110^{\circ}28' E$ ,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  $7\,687\text{ km}^2$ ,平均坡度为 4.3‰。该流域属大陆性季风气候,年均降水量约 500 mm,年均气温约  $9^{\circ}C$ ,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。植被类型从南向北分为南部崂山辽东栎、刺槐、油松、阔叶-针叶混交林带,中部延安

到安塞之间为柠条、白羊灌草草原过渡带,安塞以北为百里香、长芒草草原带。

### 1.2 研究方法

根据研究目标,研究对象主要分为两类,一是与现有气候环境条件处于相对平衡的稳定的自然植物群落,其生物量将代表现有气候条件下的潜在生物量,主要利用模型法进行估算;一是流域现有土地利用条件下的生物量,主要利用遥感信息进行评估。

1.2.1 植物群落生物量数据采集与处理 采用环境梯度分层采样技术进行采样。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,在各个环境梯度单元内选择有代表性的样地若干,具体方法可参见文献[10]。样地的设置采用典型取样法,乔木林地样方一般设为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、灌木样地为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、草本样地为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。调查每个样方所在位置的植被类型、经纬度、海拔、坡度和坡向等。对于草本样地,将接近地表的植物地上部分全部剪下,对于灌木样地,按比例进行部分采样。记录样品总鲜重,带回实验室烘干( $80^{\circ}C$ )至恒重,称量记录样品烘干重。根据样品的含水率及总鲜重的大小计算地上生物量。对于乔木样地,记录树种名,测量样方内乔木的树高、地径、胸径、冠幅等数据,利用这些数据,对李秀英<sup>[11]</sup>文章中的计算公式进行率定,用以计算乔木的生物量。数据采集的时间为 2008 年 7-8 月,经过数据校正检验最后确定采用的样本数为 151。对各环境梯度单元内的各土地利用类型下的生物量进行选样测定,包括人工乔木林、灌木林、果园、农田等。具体到采样方法同自然植物群落。根据采样比例,共采集样方 191 个,其中包括自然植被的生物量数据在内。

1.2.2 其他数据收集 气候、地形是影响生物量分布的重要环境因素。根据现有研究,结合研究区实际环境条件,共选择 9 个气象因子参与植被分布预测模型的建立,分别为年均最冷气温( $\text{temp cold}$ ),年均最高气温( $\text{temp hot}$ ),年均植被生长季温度( $\text{temp 4 10}$ ),年均气温( $\text{temp avg}$ ),年均雨季总降雨量( $\text{rainr 789}$ ),年均总降雨量( $\text{rainr y}$ ),年均蒸发量( $\text{ET0}$ ),降雨季节变化( $\text{rainsea}$ )和温度季节变化( $\text{tempsea}$ )。这些指标可根据气候数据求算,气候数据来源于黄土高原各省、县属 57 个气象站点数据,时间为 1980-2000 年,面数据通过空间插值获取。

本文选择的地形因子包括坡度( $\text{slope}$ )、坡向( $\text{aspe}$ )、相对高程( $\text{elev}$ )与地形部位( $\text{posi}$ )4 个地形因子,其中坡度、坡向可由 DEM( $25\text{ m}$  分辨率)直接生成。高程可从 DEM 直接读取。地形部位采用高

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、下坡位、中坡、上坡、崩顶、高平地 and 细小沟谷。

此外,土壤水分也是影响植被生物量的一个重要因素,本文同时在样地附近进行土壤水分采样。每20 cm取样一次,取样深度为5 m。经室内处理后,计算出各层的土壤含水率(SW),由于在黄土丘陵沟壑区,植被的年际降雨下渗深度只在2 m以上<sup>[12]</sup>,所以本文最后采用2 m(为排除雨天影响,去掉最表层的20 cm)的土壤含水率的平均数作为土壤水分因子数据。最终本文植被潜在生物量建模选择了14个影响因子。

遥感数据采用2008年夏季的TM影像,利用遥感图像处理软件ERDAS,从TM图像数据中提取出了最能反映生物量的绿色植被指数(归一化植被指数NDVI、正交植被指数PVI和土壤调节植被指数MSAVI),用以提取流域现有生物量。

1.2.3 潜在生物量建模 主要利用实际调查的延河流域自然植物群落生物量数据为响应变量,环境因子为预测变量,通过分析生物量与气候、水分、地形等环境因子的关系,建立生物量-环境因子关系模型,来实现潜在生物量的估算。但因环境条件的复杂性和多变性,现实中的生物量数据并不遵循正态分布,采用线性模型难以获得较好的关系模型。利用线形模型、广义线形模型(generalized linear model, GLM)及广义相加模型(GAM)对数据进行多次分析,广义相加模型(GAM)的预测效果最好,因此采用广义相加模型来实现对潜在生物量的估算。

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光滑函数关系。数学公式为

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

式中:  $g_i$ ——连接函数;  $E(Y)$ ——响应变量的数学期望值;  $f_i$ ——光滑函数;  $X_i$ ——自变量。GAM其实是广义线性模型(GLM)的半参数扩展,其假设函数是可以相加的,并且函数的组成部分是光滑函数。GAM是一个非参数模型。GAM模型具有高度的灵活性,能有效揭示数据中所隐含的生态关系,是近年来生态学中应用较为广泛的模型之一。

研究采用的工具和技术平台包括:(1)ANUSP-LIN空间插值分析工具;(2)ARCGIS和ARCVIEW空间分析平台;(3)S-PLUS统计工具。

1.2.4 现有生物量遥感建模 现有生物量主要基于地面实测数据与遥感植被数据关系来获取。经过对线性回归方法与GAM模型比较,结果表明,采用GAM可获得较为理想的结果。杨英莲<sup>[13]</sup>等的

研究也表明采用植被指数监测生物量时非线性模型要好于线性模型,与本研究结论一致。

1.2.5 潜在/现有生物量空间格局模拟 将生物量数据与环境因子数据,分别按照统计分析建模需求的格式进行整理,导入统计软件S-PLUS中(设定坡向和地形部位为因子变量),利用其中的GRASP(generalized regression analysis and spatial prediction)模块,得到生物量-环境关系模型,生成查找表(lookup table)。在ARCVIEW软件中导入环境因子图及查找表,通过模型运算得到延河流域自然生态系统潜在生物量空间分布图。同理,利用S-PLUS中GRASP模块,得到生物量与各植被指数的关系模型,在ARCVIEW中生成延河流域现有生物量的空间模拟图。

1.2.6 生物量估算结果验证 本研究在进行建模的时候,预留取出一定比例的样地数据用于最后的模型验证。具体为:在分布预测图中提取出预留点的生物量预测值,将之与原始的生物量数据进行回归分析,采用相关系数 $R$ 检验和 $P$ 值检验。 $R$ 是用来判断回归直线与各样本点的紧密程度, $R$ 越接近于1,表明拟合程度越好。 $P$ 值检验,若 $P\alpha < (\alpha$ 为预定显著水平,一般为0.1或0.05),说明因变量与自变量显著相关,即预测结果符合实际。

## 2 结果与分析

### 2.1 潜在植被生物量建模

潜在生物量估算,是评估流域植被生产潜力的重要参照。根据生物量数据分布,建立GAM模型时选择预测效果较好的泊松分布,并采用双向逐步回归法建模,以解决变量间的共线性问题,同时在ARCVIEW中导入查找表(lookup table),利用GRASP插件对整个流域的潜在植被生物量进行估算。所得模型如下:

$$\text{biomass} \sim s(\text{SW}, 4) + \text{posi} + s(\text{tem4}, 10, 4) + s(\text{temsea}, 4) \quad (2)$$

family = quasi(link = "log", variance = "mu")  
式中:  $s$ ——光滑函数 spline; 4——预测变量自由度; 分布族 family——逆似然 quasi 模型; log——关联函数; 方差 variance 为 mu, mu 是线性预测器的平滑可逆函数。方差检验结果表明,总自由度138,剩余残差431.0315,对应自由度81.47087,零模型拟合离差(null deviance)为1046.8,表明模型可以较好地拟合潜在生物量的分布。同时也采用ROC检验对模型进行交叉验证,ROC检验是使用ROC曲线来表示模型敏感度与特异性之间的平衡度,ROC值一般为0.5

~ 1, 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, 在本模型中, ROC 值为 0.796 975 7, 同样可以得出, 模型置信度较高。

模型表明, 该区潜在生物量主要受水分、温度、地形因素的影响。具体地, 主要受土壤水分、坡位、年均植被生长季气温和温度季节比的影响。虽然从自由度来看, 都为 4, 但是具体分析各个因子的贡献率可以看出各预测因子做出的贡献是不同的(表 1)。

表 1 预测变量贡献率分析

指标	剔除	仅含单变量	模型变化
土壤含水率	152.35779	101.4670	2.607941
坡位	71.02109	151.2983	1.227980
年均生长季气温	107.37679	112.5173	2.643964
温度季节变化比	257.56906	219.4302	2.444233

从表 1 中可以看出: 当从模型中剔除坡位时, 模型变化为 1.228, 变化较小, 但是剔除其他三个变量时, 变化稍大。假设模型仅包括单个变量时, 四个变量的贡献率由高到低为: 温度季节变化比(219.430 2)、坡位(151.298 3)、年均植被生长季气温(112.517 3)、土壤含水率(101.467 0), 这表明, 温度季节变化比对模型的贡献最高。

2.2 现有生物量建模

利用遥感估算现有生物量是大尺度生物量估算的重要途径。以遥感植被指数为预测变量, 生物量为响应变量, 建立现有生物量遥感估算模型, 结果如下:

biomass ~ s(ndvi|0.1, 4) + s(msavi|0.1, 4) (3)  
family = quasi(link= "log", variance = "mu")

同理, 模型检验中: 零模型拟合离差 null deviance 为 1 146.86, 总自由度 147, 剩余残差 764.239 8, 对应自由度 134.207 7, ROC 值为 0.715 43, 方程置信度较高。最终进入模型的因子是 MSAVI 和 NDVI。根据贡献率分析, MSAVI 对模型的贡献率更大, 这是因为 MSAVI 为修正土壤调整植被指数, 去除了土壤背景值的影响, 能更好地反映植被的绿度信息。

表 2 预测变量贡献率分析

指标	剔除	仅含单变量	模型变化
归一化植被指数	69.6807	310.7793	1.729120
土壤调节植被指数	71.8409	312.9395	4.110443

2.3 延河流域潜在生物量预测与制图

利用建模时生成的查找表, 将其导入 ARCVIEW 中, 同时将模型所需的各预测变量导入 ARCVIEW, 然后运算模型, 即可实现对延河流域潜在植被生物量的预测制图(附图 16), 图中生物量单位为 t/hm<sup>2</sup>。

延河流域植被分布基本情况是: 南部地区自然分布有灌木林及乔木林分, 如酸枣、狼牙刺、荆条、辽东栎林、侧柏、鸡爪槭等, 中北部, 植被类型逐渐过渡到铁杆蒿、大针茅等, 生物量逐渐降低, 至西北角, 则主要分布有百里香等地带性草本群落, 旱生特征明显, 生物量最低。

从附图 16 中可以看出, 延河流域潜在生物量的空间分布随温度和降雨梯度, 表现出从东南向西北递减的变化趋势, 与现实状况相符。但个别生境也会造成生物量的异常分布, 如在中北部地区, 能够明显看到几个生物量异常大的地点。经核查实际数据, 生物量异常与局部特殊的土壤条件有关。这些立地土层较薄, 一般为 100 cm, 土壤下层为岩石层, 水分入渗小, 土壤含水量较高, 因此可分布有大的灌木如丁香、狼牙刺、铁杆蒿、栒子, 具有较高的生物量。这一结论, 与张信宝等人<sup>[14]</sup>的推论一致, 也说明 GAM 模型具有较好的预测能力。

2.4 延河流域现有生物量分布预测与制图

采用同样的方法, 可以得到延河流域现有生物量分布图(附图 17)。附图 17 表明, 延河流域现有生物量的空间分布, 整体趋势南高北低, 但在中北部却有较多的高生物量分布, 这与附图 16 中中北部的生物量分布情况明显不同。附在图 16 的潜在生物量预测中, 中北部只有因局部特殊土壤条件而形成的几处大的生物量分布区, 根据实际调查数据可知, 附图 17 中这些较多分布的高生物量主要来源于人工乔木林和灌木林。比较两者可以看出, 东南部地区现有生物量低于潜在预测的生物量。这些区别为延河流域环境植被承载状况的评估提供了条件。

2.5 延河流域环境植被承载现状评估

评估区域环境的植被承载现状及其空间分布, 对于有针对性的植被恢复决策, 现有植被的改造和利用具有重要的指导意义。以延河流域潜在生物量为参照, 利用 ARCGIS 空间分析技术, 与流域现有生物量分布图进行相减, 得到延河流域环境的植被承载现状评估图(附图 18)。为更好地在空间上显示流域环境植被承载现状的空间分布, 将图进一步简化, 得到流域环境的植被承载现状评估简化图(附图 19)。

从附图 18 可以明显看出, 在流域的东南部地区, 潜在生物量高于现实生物量, 其原因是东南部在黄土高原植被带划分上处于森林区, 是该流域自然状态下乔灌木分布的主要地区, 但因人为干扰等, 现实中的土地利用生产潜力却往往与自然生产潜力有较大差距, 如人工纯林、果园、农田等系统; 而在中北部地区, 则在局部出现较多的现实生物量高于潜在生物量的

情况。环境的植被承载状况在整个流域差异较大, 超过环境承载能力的植被大多分布在中北部(附图19), 这也是造成这些地区人工植被退化的主要原因。

## 2.6 模拟结果的验证

上述结论能否对实践提供真正有价值的依据, 需要对所得结论进行验证。根据检验需求, 本研究在建模过程中, 随机挑出一定比例的潜在生物量数据(20个采样点)和现有生物量数据(22个), 用于预测结果的检验。结果表明, 对于潜在生物量分布, 实际值与预测值相关性分析结果为:  $R$  值为 0.819,  $P$  值为  $0 < 0.05$ , 预测值与实测值差异不显著, 所建模型具有较好的预测能力; 对于现有生物量分布, 实际值与预测值回归分析结果为:  $R$  值为 0.934 6,  $P$  值为  $0 < 0.05$ , 利用遥感信息与地面实际调查相结合, 可以提取较为可靠的现实生物量信息。上述结果表明, 研究所得结果比较可靠, 可以对生产实践提供较好的科学依据。

## 3 讨论

黄土高原的植被恢复, 因原生自然植被的严重破坏, 一直存在种什么、在哪里种的问题。虽然有较多的研究从黄土高原的植被地带性规律、自然植被演替规律、黄土高原土壤水分与植被恢复关系等方面, 提出了黄土高原植被恢复应该遵循的原则, 如遵循植被地带性分布规律<sup>[15]</sup>、模仿自然植被营造人工植被<sup>[16]</sup>、适地适林<sup>[17]</sup>等, 但在实践上如何实施却存在一定的困难。从20世纪50年代在黄土高原开展的一系列的植被恢复工作, 在理论上和实践中也取得了一些成绩, 但从总体上来讲, 治理程度和效益不尽如人意, 生态环境恶化没有得到有效遏制, 营造的很多人工植被恢复背离植被的自然分布规律及自然条件的制约<sup>[18]</sup>, 导致不同程度的系统退化, 如土壤水分的过渡消耗<sup>[19]</sup>, 甚至土壤干层的出现, 植被退化明显, 形成大面积的“小老头”树<sup>[1]</sup>。显然, 黄土高原植被恢复在实践上并没有很好地实施上述原则。原因之一是在实践上不能对整个区域的环境状况及其植被分布现状进行较为准确的评估, 植被恢复的整体规划和布局缺乏相应的技术支持。

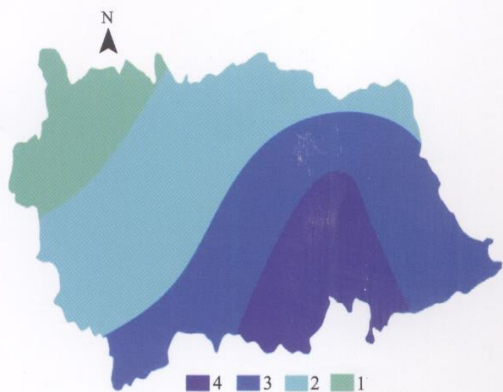
本文正是针对这一问题, 从生物量角度分析环境对生物量的承载能力, 同时考虑了土壤水分、温度、气候、地形等环境因素, 所得结果较好地表现了流域的植被承载现状及其空间分布。从方法看, 采用广义相加模型这一种建模途径, 不仅在用于物种预测时有很好的效果<sup>[6, 10]</sup>, 对于单一的自变量和多因子建模这种情况, 同样可以运用, 且模型效果优于

线性模型。通过模型法, 可以较好地解决植被地带划分进行植被区划时不能反映环境要素及植被空间变化的缺点(同一植被带往往同质), 可以为植被恢复重建提供更为科学的指导, 对于更好地实施目前提出的植被恢复措施具有重要意义。

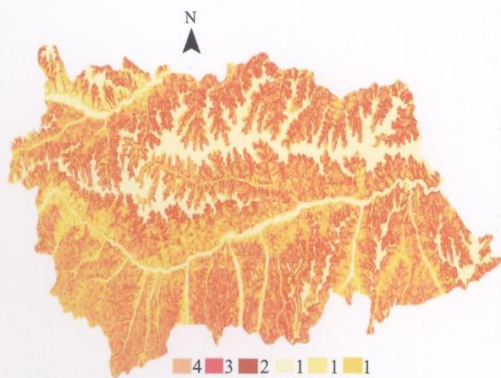
## 参考文献:

- [1] 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2): 53-56.
- [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[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 436-442.
- [3] 郭志乾, 刘东海. 黄土丘陵区水平梯田地埂林植物种选择[J]. 宁夏农林科技, 1998(1): 42-43.
- [4] 马祥华, 焦菊英. 黄土高原植被恢复与土壤环境相互作用研究进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 157-161.
- [5] 郭忠升, 邵明安. 土壤水分植被承载力初步研究[J]. 科技导报(北京), 2006, 24(2): 56-59.
- [6] 温仲明, 焦峰, 焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1897-1904.
- [7] Brown J H, Gillooly J F, Allen A P, et al. Toward a metabolic theory of ecology[J]. Ecology, 2004, 85(7): 1771-1789.
- [8] Vander M J. Metabolic theories in ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(3): 136-140.
- [9] 赵黎芳, 丛日晨. 模拟自然植物群落恢复地带性植被[J]. 北京园林, 2005, 21(3): 15-18.
- [10] 赫晓慧, 温仲明, 王进鑫. 基于 gam 模型的延河流域主要草地物种空间分布及其与环境的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1718-1724.
- [11] 李秀英. 森林健康评价指标体系初步研究与应用[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [12] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.
- [13] 杨英莲, 邱新法, 殷青军. 基于 MODIS 增强型植被指数的青海省牧草产量估产研究[J]. 气象, 2007, 33(6): 102-107.
- [14] 张信安, 安芷生. 黄土高原地区森林与黄土厚度的关系[J]. 水土保持通报, 1994, 14(6): 1-4.
- [15] 邹厚远. 陕北黄土高原植被区划及与林草建设的关系[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 96-101.
- [16] 王占孟. 模拟天然植被演替规律建设黄土高原生态系统的研究[J]. 甘肃林业科技, 1995, 20(1): 41-49, 55.
- [17] 梁一民, 陈云明. 论黄土高原造林的适地适树与适地适林[J]. 水土保持通报, 2004, 24(3): 69-72.
- [18] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
- [19] 王力, 邵明安. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 84-91.

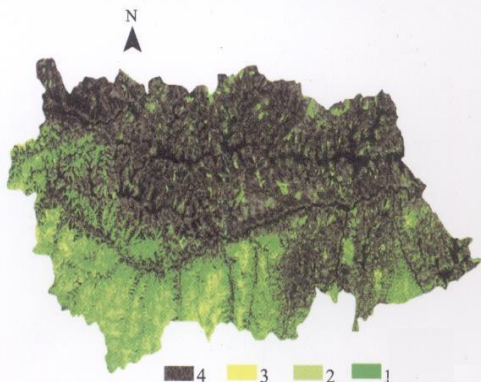




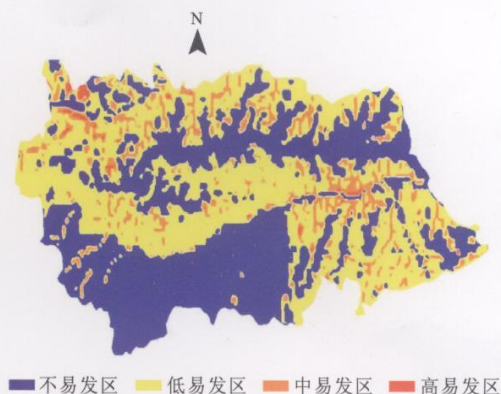
附图12 灵台县降雨量对地质灾害影响分区图



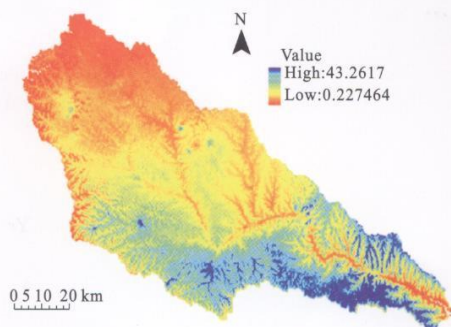
附图13 灵台县地形坡度对地质灾害影响分区图



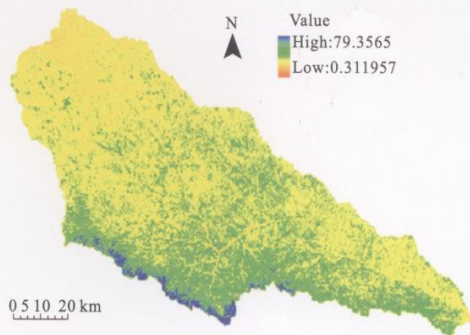
附图14 灵台县植被覆盖度对地质灾害影响分区图



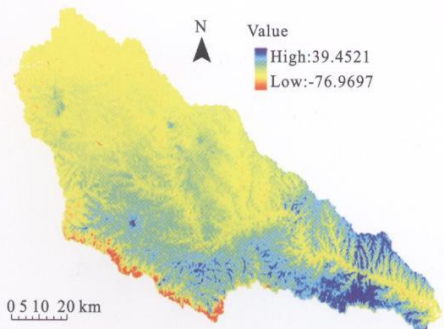
附图15 灵台县地质灾害易发性区划图



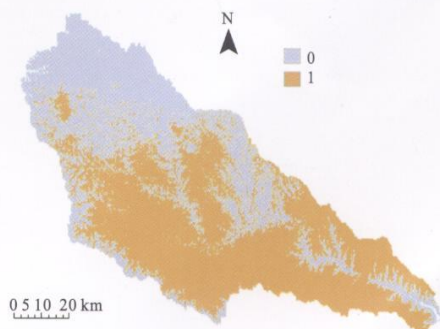
附图16 延河流域潜在生物量分布图



附图17 延河流域现实生物量分布图



附图18 延河流域环境的生物量承载现状评估图



附图19 延河流域环境的植被承载现状评估简化图