

黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究

赵传燕¹, 冯兆东², 南忠仁³, 李守波²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所水土资源研究室, 兰州 730000;

2. 兰州大学国家教育部西部环境重点实验室, 兰州 730000;

3. 兰州大学资源环境学院环境科学系, 兰州 730000)

摘要: 植被空间分布格局深受环境影响, 分析植被与环境之间的关系一直是植物生态学的中心问题。论文从黄土高原自然植被恢复问题出发, 引出植被恢复的参照标准 - 潜在自然植被。依据气象站和雨量站观测资料, 建立气温降水与海拔高度和地理位置的统计方程, 以 GIS 为技术支撑, 对两大环境变量进行空间化。通过野外观测取样, 结合气温降水的空间分布, 界定祖厉河流域不同草地覆盖度的生境空间。根据生境空间边界函数, 对整个流域内的潜在草地植被分布进行模拟。草地分布现状与潜在草地分布对比发现, 低覆盖草地由北向南扩展, 占潜在中覆盖草地面积的 37.39%, 占潜在高覆盖草地面积的 34.98%。中覆盖草地也在此向南部区域和北部山地扩展, 占潜在高覆盖草面积的 11.51%。高覆盖草地收缩到南部和北部山地狭小地带, 仅占其应有区域的 4.84%。

关键词: 祖厉河流域; 甘肃省; 潜在自然植被; 植被盖度; 空间分布; 地理信息系统

1 黄土高原自然植被恢复问题

黄土高原生态恢复与重建问题首要和最关键的是植被的恢复和重建, 这已在生态学界达成共识^[1-6], 但依据什么样的参照标准进行恢复? 恢复后的植被类型是什么? 由于不能科学地回答这些问题, 曾经在植被恢复过程中留下沉重的教训, 如 80 年代该区大规模的植树种草的失败。关于参照标准的选择, 有人提出以历史时期的植被分布为参照, 然而历史时期的植被是什么样的类型目前仍有争议。侯学煜先生认为, 渭河以北的黄土高原植被为草原带的森林草原区^[7]。有人认为, 几乎整个黄土高原都属于森林带, 森林带的北界在陕北的榆林^[8]。黄土高原人类活动历史悠久, 原始天然植被在漫长历史时期受到人类的严重破坏再加上研究者所采用的方法和观察问题的角度不同, 对原始植被的复原难度较大^[9]。有人提出现代植被的地理分布是恢复植被的主要依据, 因为天然植被分布的地带性是长期自然选择的结果, 是自然条件变化规律的最直接、最准确的反应^[10], 天然植被分布的地带性与 Tuxien 于 1956 年提出的潜在自然植被一致^[11]。潜在自然植被是假定植被全部演替系列在没有人干扰、在现有的环境条件下 (如气候、土壤条件, 包括由人类所创造的条件) 完成时, 立地应该存在的植被。因此, 潜在自然植被不一定是植被现状, 而是一种与它所处立地达到一种平衡的演替终态, 一旦人类的干扰停止后即可实现的演替顶极。潜在自然植被可以是多元顶极论中的气候顶极、土壤顶极、地形顶极、或火烧顶极, 也可以是单元顶极论中的亚顶极、偏途顶极、前顶极或超顶极, 无论是哪一种顶极植被类型, 都是与当地气候条件保持协调和平衡的群落, 与环境之间达到了很好协调^[12]。因此, 黄土高原植被恢复的参照标准应该是潜在自然植被, 它是该区域植被建设的重要

收稿日期: 2006-08-19; 修订日期: 2006-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671067); 教育部重点项目 (10425) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40671067; Key Project of the Ministry of Education, No.10425]

作者简介: 赵传燕 (1963-), 女, 山东曹县人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为生态水文学与环境模拟。

E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

依据。该研究从流域尺度上考虑植被盖度与环境之间的关系,采用草地适宜生境界定方法对区域潜在自然植被进行模拟,为区域生态恢复和环境管理提供依据。

2 潜在自然植被的研究进展

植被空间分布格局深受环境影响,分析植被与环境之间的关系一直是植物生态学的中心问题。早期人们就已经认识到气候对植被分布所起的重要作用,自19世纪初出现有关植被与气候关系的定性描述以来,人们便利用不同的气候指标组合来分析植被与气候的关系,由定性描述转向定量研究^[13-19]。当今,在人类活动造成的全球变化环境问题研究中,植被与气候的关系研究又成为全球变化与陆地生态系统关系研究的前沿^[20]。但是从较小的区域来看,影响植被分布的因素除气候因子外,还包括地形、土壤、地下水等环境因子,提取主导因素,建立植被与环境之间关系的模式来反演区域潜在植被的分布引起生态学家极大的兴趣。因为人类活动的影响掩盖了植被—环境的真实关系,而潜在自然植被作为一种与所处立地达到一种平衡的演替终态,反映的是无人干扰的情况下,立地所能发育形成的最稳定成熟的一种顶极植被类型,是一个地区现状植被的发展趋势。Franklin对潜在自然植被模拟研究成果进行了详细综述,总结了预测方法主要是通过研究区域范围内的观测取样,建立种群、群落和植被分布与主要环境变量之间最佳的数学关系,基于所建立的关系,对更广阔范围内的潜在分布状态进行模拟与分析^[21]。潜在自然植被预测模型中的因变量可以是定量的,如盖度、种丰富度或重要值,也可以是定性的,如物种的存在或缺失、植被的类型^[22-24]。自变量可以是定量的,如降水、温度、多波段反射比、高程、坡度等,也可以为定性的,如土壤类型、土壤特性、放牧历史等^[25-27]。

大量区域空间数据的处理是区域尺度上进行潜在植被模拟的难点,产生于20世纪60年代的地理信息系统(GIS),提供了大空间范围、高空间分辨率地理数据的分析功能,尤其是数字地形模式(DEM)资料的GIS处理,不仅可以产生最基本的地形参数(如高程带、坡度、坡向等),而且可以产生多达十七个水文和生态模拟有用的其它地形参数^[28, 29],使得复杂条件的山区,大范围内植被分布模拟成为可能。将GIS与潜在自然植被预测模型有机融合于一体^[30, 37],提高了潜在植被预测的空间分辨率。Brzeziecki等选取气候、地形和土壤等因素,建立了植物群落与选择因子的概率模型,结合GIS技术模拟了瑞士山区71种森林群落的地理分布,与实际植被的空间分布相比较,相似率可达80%^[38]。Ficsher在瑞士山区也做过同样的工作,只是在选取的变量中增加了太阳辐射和土地利用类型^[39]。Guisan等利用年平均温度与山地植物种的线性关系模拟了瑞士Valais地区的高山植物种的空间分布,获得了高分辨率的物种分布图^[40]。Brown在美国与加拿大边界的冰川国家公园对四种植被类型进行模拟,并与基于Landsat TM的植被分类相比较,相似性达55.5%^[41]。Dymond在加拿大Kananaskie河流域利用土壤水分、温度和太阳辐射模拟了植被的空间格局,精确性达60%~79%^[36]。刘纪元等将气温、降水、高程三个影响区域植被覆盖的主要指标经GIS空间化后,生成数字地学影像,并使之与经过优化、压缩处理后的NOAA/AVHRR数据进行复合,对我国东北植被现状进行综合分类^[42]。张百平^[43, 44]将地理信息技术应用于山地植被分布研究,通过构建山地垂直带谱数据结构,实现了垂直带谱数字化。赵传燕在黑河流域的祁连山区,基于GIS、RS与统计模型和机理模型的耦合成功地反演黑河流域祁连山区青海云杉林的潜在分布^[45]。纵观整个研究过程,潜在植被模拟研究已经将单纯气候作为潜在自然植被预测模型自变量的方法正逐渐为综合的环境变量方法所取代,并因环境系列制图和地理信息系统的发展而不断得到广泛应用。在模型中引入更多环境变量的专题数据,如土壤物理属性、地形、土地利用、植被生产力,甚至使用样地资料,以提高植被分布和环境的表达精度,正成为潜在自然植被定量研究

的一种趋势。

基于植被与环境变量之间存在着“平衡”或“准平衡”的关系这样一种假设，潜在自然植被预测模型基本上属于静态模型，忽略动态的过程。模型中的大多数没有引入生物地球化学过程，特别是碳和氮循环。因此，这些模型很难模拟气候变化情景下潜在自然植被的响应。发展生物地理过程模型并与大气环流模式 (GCMs) 耦合对未来各种气候变化情景下的潜在自然植被类型进行模拟与分析，应为今后发展的方向。这对于如何减缓和适应全球变化具有一定的指导意义。

3 方法与数据

3.1 研究区概况

祖厉河流域位于甘肃中部，处于东经 104°12'~105°33'，北纬 35°18'~36°34' 之间，流域面积 10653 km²，地跨甘肃省定西、白银、兰州三地 (市) 和宁夏固原地区，包括定西县、会宁县的绝大部分地区及靖远、榆中、陇西、通渭、西吉、海原县的小部分地区。由于受贺兰山和祁连山加里东褶皱带的复合影响，地势大致由南向北倾斜，海拔大多在 1500~2000 m 之间 (图 1)。最高峰在流域东北岷吴山的南沟大顶，海拔 2858 m，最低点在祖厉河汇入黄河处，海拔 1392 m。在第三纪末和第四纪初古地形的基底上，经第四纪以来的多次侵蚀—堆积旋回和现代侵蚀作用，塑造了当今以塬、梁、峁为特点的黄土丘陵地貌形态，呈现出梁峁交错，沟壑纵横的景观。

祖厉河流域深处内陆，远离海洋，加之流域东面六盘山和流域南面秦岭山脉的屏障作用，海洋的暖湿气流不易到达，降水量少且分布不均。年降水量由南向北递减，南部华家岭年降水量为 509.3 mm，到北部靖远降至 248.4 mm，全流域平均降水量 376.2 mm。年平均气温由北向南递减，年平均气温由靖远的 8.8℃，到华家岭减至 3.6℃。

土壤类型主要有黑垆土、灰钙土和黄绵土，其中黑垆土和灰钙土是构成本流域的两大地带性土壤，在空间上由南部的黑垆土向北部的灰钙土过渡。植被属温带半干旱草原和干旱草原，以针茅、冰草、蒿类等群落为主。

3.2 数据收集

研究区及其周边有 23 个气象站点，除气象站点外，还有黄河流域水文站网、雨量站网中的雨量站 23 个，能够收集长序列月平均气温、降水、湿度等气象数据，用 GPS 对 46 个站点分别定位。收集研究区 1:50000 的地形图，经数字化获得数字地形模型 (DEM)。购买 2004 年 TM 影像，采用监督分类和非监督分类相结合的方法，获得研究区土地利用类型的分类。与遥感影像同期进行野外调查，在研究区设置草地样

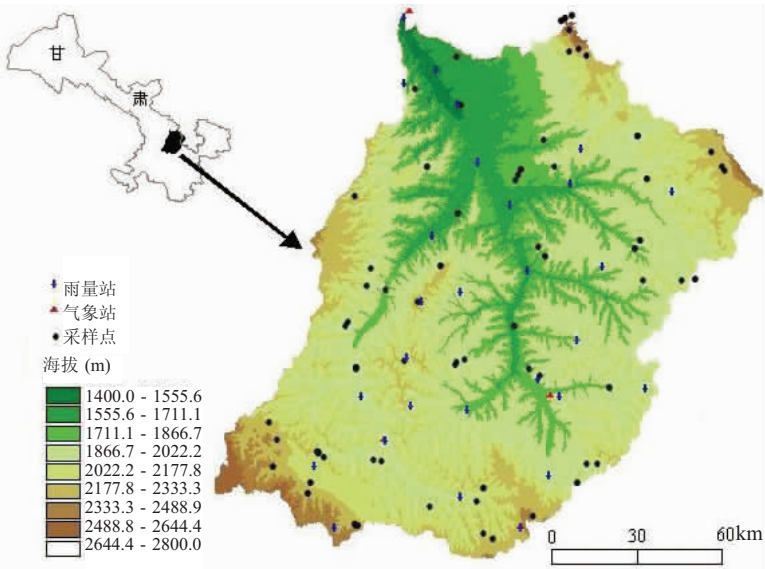


图 1 祖厉河流域地势及气象站、雨量站和采样点图
Fig. 1 DEM of Zulihe River watershed and the distribution of meteorological stations, gauge stations and sampling points

方 365 块 (1×1 m²)，样地的选择原则：人为干扰小的草地。用数码相机获取样方图像，成为提取植被盖度的源数据。

3.3 研究方法

3.3.1 植被盖度的提取 获得的 365 个样方的图像，在 ERDAS 中转换成 IMAGINE 格式，之后进行监督分类，分类图像转换成 GRID 格式，在 ARCVIEW 中统计植被在样方中所占的百分比，即植被盖度。为了验证获取植被盖度的精度，特制试验样区 1×1 m²，采集 38 片杨树叶排列其中 (图 2a)，用台式叶面积仪测试树叶的叶面积，计算试验样区植被的盖度为 28.6%。经 ERDAS 处理后获得试验样区的分类图像 (图 2b)，计算树叶栅格占总栅格的百分比为 29.4%，两种方法获得植被盖度的误差为 0.8%，证明用图像处理获取植被盖度的方法精度高，简单易行。但是试验样区组成单一，色彩分明，与实际样方还存在着一定的差别。本研究还利用另一种方法与图像处理方法进行比较。把 1 m² 样方格

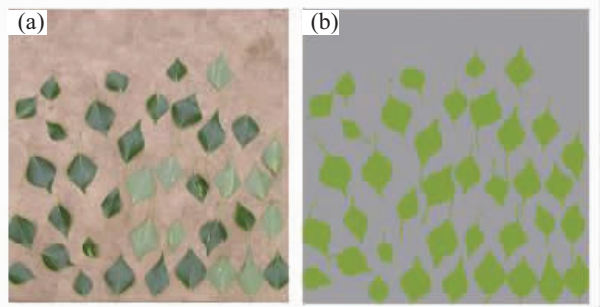


图 2 试验样区原图像(a)和提取后的图像分类栅格图像(b)
Fig. 2 Photo (a) and supervised classification map (b) of an experimental plot

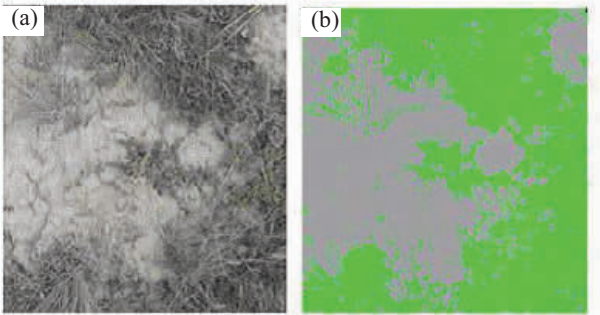


图 3 103 号样方原图像(a)和提取后的图像分类栅格图像(b)
Fig. 3 Photo (a) and supervised classification map (b) of No.103 sample

网化 (10×10)，目估有植被覆盖的格网数，精确到 0.1 单位，计算有植被的格网数占总格网数的百分比，一共统计了 10 个实际样方，由此获得的盖度与图像处理获得的植被盖度相比较，误差在 2%~9%。图 3 展示 103 号样方的原图像 (图 3a) 与分类后的图像 (图 3b)。说明图像处理复杂情况获取盖度的方法仍有较高的精度。在复杂的样方中，如有多种物种组成，形成不同色彩的植被影像，裸地有阴影和非阴影斑块之分，这些情况在监督分类时，要采用多级分类，根据实际情况进行合并。

3.3.2 分布式气温降水模型 植被的生长与分布状况受多种生态因子的影响，根据文献^[19]分析，影响黄土高原植被分布的最重要因素为年平均气温，年降水量和年蒸发量。本研究选择年平均气温 (T) 和年降水量 (P) 两个重要因素，根据多年观测数据，建立分布式气温与降水模型。气温与降水模型包括三个基本的变量，即海拔高度 (H)，经度 (X) 和纬度 (Y)，通过观测数据分析和验证，年平均气温 (T) 和年降水量 (P) 的线形回归方程为：

$$T = 87.284 - 0.005735H - 0.382Y - 0.534X \tag{1}$$

$$P = -1433.643 + 0.168H - 4.713Y + 46.525X \tag{2}$$

经交叉验证，多年平均降水相对均方差 (RMSE) 为 10.32，相关系数 (R^2) 达到 0.85；多年平均气温相对均方差 (RMSE) 为 0.56，相关系数 (R^2) 达到 0.92。利用 DEM 数据，提取研究区经度 (X) 和纬度 (Y) GRID，在 ARC/INFO GRID 模块中计算年平均气温和年平均降水量的空间分布。

3.3.3 草地生境空间的提取 根据遥感影像分类和野外调查，提取草地现状分布区，并用该分布区界定其气温和降水的生境空间 (图 4)。图 4 展示出草地的气温降水生境空间的不规则性，尤其在南部水分较好的区域，毁林草开荒，之后弃耕，在退还的耕地上，植

被演替的第一阶段是草地，导致草地的生境空间扩大，同时大量的耕地存在又使得草地应有的分布区缩小。

祖厉河流域植被生境差异较大，相应地植被的组成结构都有较大的变化，对于草地，盖度对生境的变化反映最为敏感。根据野外调查，覆盖度 > 50%，水分条件好，草被生长茂密；覆盖度在 20%~50%，反映水分不足，草被较稀疏；覆盖度在 5%~20%，反映水分缺乏，草被稀疏。根据覆盖度把研究区分为高覆盖度草地 (> 50%)、中覆盖度草地 (20%~50%) 和低覆盖度草地 (5%~20%)。基于气温降水的空间分布，利用 365 个调查点提取相应的温度和降水 (图 5)，结合图 4，界定不同盖度自然草地分布的上下边界函数。

低覆盖草地：上边界函数为 $T = -0.000256P^2 + 0.133561P - 8.602329$ (3)

下边界函数为 $T = -0.025427P + 14.550905$ (4)

中覆盖草地：上边界函数为 $T = -0.000326P^2 + 0.240870P - 37.093468$ (5)

下边界函数为 $T = 0.000280P^2 - 0.256944P + 63.221219$ (6)

高覆盖草地：上边界函数为 $T = -0.026615P + 17.892710$ (7)

下边界函数为 $T = 0.000333P^2 - 0.345683P + 93.374683$ (8)

上下边界函数界定了不同覆盖度草地的生境空间，根据关系式利用气温降水的空间分布，在 ARC/INFO GRID 中计算不同覆盖度草地的空间分布。

4 结果与讨论

4.1 植被盖度调查统计

植被盖度是一个重要的生态学指标，反映了植被地面上的生存空间。精确估算覆盖度在数量生态学和植被属性的遥感反演研究中有着重要的作用。本研究布设了 365 个样方，处理结果见表 1：

盖度计算统计后分为三级，在调查中，有 87 个高覆盖度草地样方，盖度分布较多的是 60%~80% 范围内，以本氏针茅

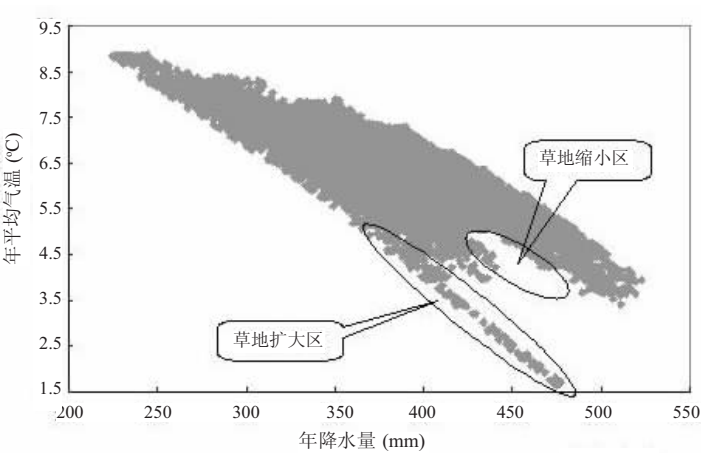


图 4 草地现状生境的变化空间 (草地分布区来源于遥感分类)
Fig. 4 Changing space of annual mean temperature and annual mean precipitation in the present steppe distribution area

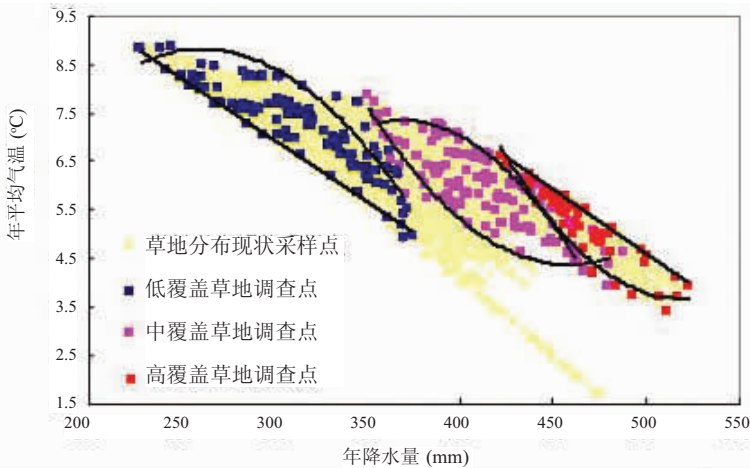


图 5 不同覆盖度草地年平均气温与年平均降水量的变化空间
Fig. 5 Changing space of annual mean temperature and annual mean precipitation in natural grassland with three covers

(*Evonymus bungeanus*) 和冰草 (*Agropyron cristatum*) 为优势种, 半生有小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、百里香 (*Thymus mongolicus*) 等。有 183 个中覆盖度草地样方, 主要优势种为短花针茅 (*Stipa breviflora*) 和灌木亚菊 (*Ajania fruticos*), 伴生种本氏针茅 (*Evonymus bungeanus*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、二裂萎凌菜 (*Potentilla bifurca*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、紫菀 (*Aster tataricus*) 等。有 95 个低覆盖度草地样方, 优势种为沙生针茅 (*Stipa glareosa*) 和短花针茅 (*Stipa breviflora*), 伴生种为蒿类 (*Artemisia*)、艾菊 (*Artemisia argyi*)、多茎葱 (*Allium polyrrhizum*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、蒙古苳芭 (*Cymbaria mongolica*) 等。

盖度的测定可以用目测估计, 也可以用样点或网格法测得。目测估计对野外工作经验不足的研究人员, 通常存在较大的误差, 网格法估算要调查统计三种情况: 全部覆盖、部分覆盖和全部不覆盖。当网格比较大时, 部分覆盖估算误差大, 当网格比较小时, 统计比较费时。获取图像提取盖度的方法, 克服了常用方法的不足, 但是室内处理比较繁琐, 需要大量的人力资源, 其最大的特征是客观性强。

4.2 气温降水的空间分布

气温和降水的空间分布在文献①中有详细的验证和解释。降水呈现明显的纬度地带性分布规律, 自南向北逐渐减少, 受地形影响较大, 海拔高度每降低 100 m, 降水量平均减少 20 mm, 流域绝大地地区多年平均降水量分布在 280~430 mm 范围内。温度随海拔高度的增加减小, 在山地, 如南部的胡麻岭、华家岭, 北部的岷吴山和月亮山, 年平均温度在 1~3 ℃; 在河谷地带, 平均气温在 7.6~9.4 ℃。

4.3 祖厉河流域草地植被的潜在分布

在没有人为干扰, 在现有的环境条件下, 祖厉河流域潜在的低覆盖度草地主要分布在流域的北部(图 6), 该区域降水量少, 气温高, 蒸发量大, 水分缺乏, 与之对应的植被类型为旱生低矮灌丛与草本混生, 如果土壤水分极端亏损, 旱生低矮的灌木成分占优势。中覆盖度草地分布在流域的中部, 占的面积较大, 由于降水比北部多, 与之相应的植被类型是典型草原, 同时该区域又是不同性质植被类型出现的一个敏感地带^[39], 不同地形条

表 1 样方统计结果表
Tab. 1 Summary of 365 samples statistics

盖度分类	样方个数	覆盖度范围	优势种
高覆盖度	87	≥ 50%	本氏针茅 + 冰草
中覆盖度	183	20%~50%	短花针茅 + 灌木亚菊
低覆盖度	95	5%~20%	短花针茅 + 沙生针茅

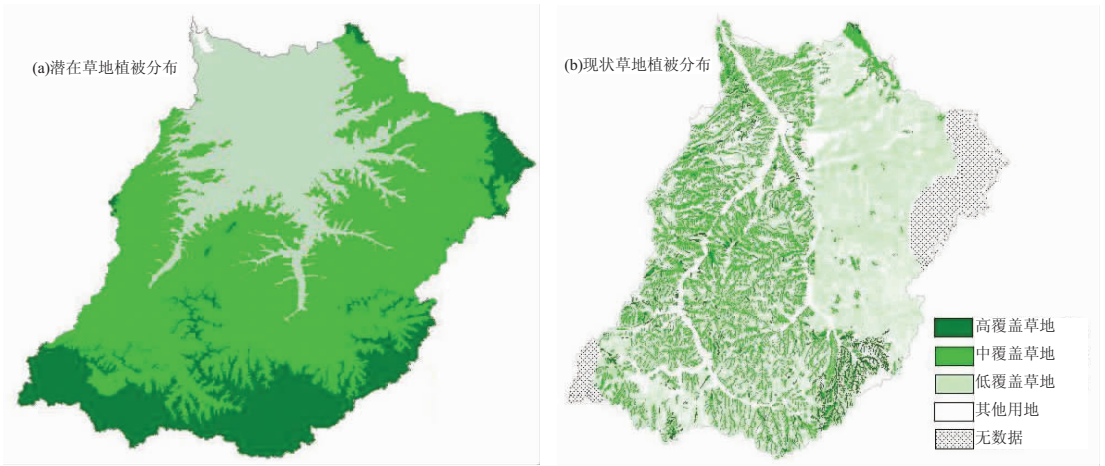


图 6 祖厉河流域潜在(a)草地植被和现状草地植被(b)空间分布

Fig. 6 Distribution of steppe predicted (a) and grassland obtained from TM image (b) in Zulihe River watershed

件下湿度不同，会出现植被镶嵌分布的景观格局，如在阴坡、二阴坡和有灌溉条件的地区生长着旱生灌丛及旱生的落叶阔叶树种乔木林。高覆盖度草地主要分布在流域的南端和北部山地，其自然条件为降水条件好，气温低，土壤水分条件好，草被生长茂密。相应的植被类型为亚高山草甸和针叶林及中生灌木林，目前除流域治理区和自然保护区外，林地已不复存在。

4.4 祖厉河流域潜在草地分布与现状分布比较

祖厉河流域地形破碎，沟壑纵横，在流域面积 10653 km² 上承载着 133 万人口。祖厉河流域现有耕地 491.85 万亩，占整个流域面积的 30.80%。耕地中川塬地面积不到 5%，山旱地占 95% 以上。土壤垦殖指数在中部和南部高达 40%~50%，一些地方甚至超过 60%。天然森林已破坏罄尽，而草地的植被覆盖度普遍降低，遥感解译结果显示：低覆盖草地由北向南扩展，占潜在中覆盖草地面积的 37.39%，占潜在高覆盖草地面积的 34.98%。中覆盖草地也在向南部区域和北部山地扩展，占潜在高覆盖草面积的 11.51%。高覆盖草地收缩到南部和北部山地狭小地带，仅占其应有区域的 4.84% (表 2)。

目前植被覆盖度低，尤其低覆盖草地分布广，再加上坡耕地大面积存在，导致祖厉河流域水土流失严重，据统计，在黄河上游，流域面积大于 1 万平方公里的一级支流有 6 条，祖厉河其入黄水量微不足道，只占 1.46%，但

入黄年均沙量却占 39.58%。强烈的土壤侵蚀既是该区生态环境恶化的起因，又是生态环境恶化的结果，这种恶性循环使祖厉河流域成为全国贫困地区之一。因此，以植被的恢复和重建为突破口，在恢复过程中，以潜在自然植被为参照标准，带动土地利用结构的调整与优化，其目的是恢复生态系统的良性循环，建立祖厉河流域的生态安全体系。

5 结 论

(1) 植被覆盖度是一个非常重要的生态学指标，用图像处理软件进行草地盖度的估算，克服常用盖度估测的不足，具有精度高，客观性强。

(2) 通过在研究区域范围内的观测取样，建立祖厉河流域草地盖度与主要环境变量(气温和降水)之间的关系模型，将 GIS 与关系模型有机融合于一体，对整个流域的潜在草地分布进行模拟。模拟结果：低覆盖度草地主要分布在流域的北部，该区域降水量少，气温高，蒸发量大，水分缺乏。中覆盖度草地分布在流域的中部，占的面积较大。高覆盖度草地主要分布在流域的南端和北部山地，其自然条件为降水条件好，气温低，土壤水分条件好，草被生长茂密。

(3) 由于人口的增加和对土地开发的不合理，根据草地分布现状与潜在草地分布对比发现，低覆盖草地由北向南扩展，占潜在中覆盖草地面积的 37.39%，占潜在高覆盖草地面积的 34.98%。中覆盖草地也在此向南部区域和北部山地扩展，占潜在高覆盖草面积的 11.51%。高覆盖草地收缩到南部和北部山地狭小地带，仅占其应有区域的 4.84%。

(4) 调查发现，在中高覆盖度草地分布区，各种森林、灌丛、疏林和草原等均可以出现，由于湿度的微小变化，即可引起不同性质植被类型出现，也很可能是在不同地形条件下，出现植被镶嵌分布的景观格局。增加地形和土壤水分因素界定植被的生境空间将是该项研究的继续。

表 2 三种不同覆盖度草地在潜在草地分布区中的比例 (%)
Tab. 2 Ratio of present grassland area to potential grassland area (%)

潜在分布类型	草地现状分布		
	低覆盖草地	中覆盖草地	高覆盖草地
低	39.34	17.53	1.10
中	37.39	14.78	2.36
高	34.98	11.51	4.84

参考文献 (References)

- [1] Wu Qinxiao, Yang Wenzhi. Forest and Grassland Vegetation Construction and Its Sustainable Development in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998. 118-156. [吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 118-156.]
- [2] Cheng Xu. Relationship between agriculture, ecological deterioration, restoration and reconstruction in Loess Plateau area of Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 84-90. [程序. 西北黄土高原区农业与生态恶化及恢复重建的关系. 中国农业科学, 2001, 34(1): 84-90.]
- [3] Zhang Guosheng. Research progress on trees and shrub drought-resistance and woodland water activity in arid and semi-arid region. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 364-368. [张国盛. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展. 中国沙漠, 2000, 20(4): 364-368.]
- [4] Yang Xinmin. Study on the characteristics of water environment in shrubbery land of Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2001, 18(1): 8-13. [杨新民. 黄土高原灌木林地水分环境特征研究. 干旱区研究, 2001, 18(1): 8-13.]
- [5] Wei Tianxing, Yu Xinxiao, Zhu Jinzhao et al. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in loess area of western Shanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 185-189. [魏天兴, 余新晓, 朱金兆 等. 黄土区防护林主要造林树种水分供需关系研究. 应用生态学报, 2001, 12(2): 185-189.]
- [6] Sun Changzhong, Huang Baolong, Liu Shuming et al. Soil moisture dynamics in forest land and wasteland of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 523-526. [孙长忠, 黄宝龙, 刘淑明 等. 黄土高原荒坡榆林土壤水分变化规律研究. 应用生态学报, 2000, 11(4): 523-526.]
- [7] Hou Xueyu. *Chinese Physical Geography·Phytogeography*. Beijing: Science Press, 1988. [侯学煜. 中国自然地理·植物地理(下册). 北京: 科学出版社, 1988.]
- [8] Zhu Zhicheng. The range of forest-steppe zone on the Loess Plateau of northern part in Shaanxi Province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1983, 7 (2): 122-131. [朱志诚. 陕北黄土高原上森林草原的范围. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7 (2): 122-131.]
- [9] Meng Qingmei. *Soil and Water Conversation in Loess Plateau*. Zhengzhou: Huanghe Hydraulic Press, 1996. 41-171. [孟庆枚. 黄土高原水土保持. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 41-171.]
- [10] Tüxen Reinhold. Die heutige potentielle natürliche vegetation als Gegenst vegetation skartierung. *Angew, pflanzensoziologie*, 1956, 13: 5-42.
- [11] Küchler A W. *Vegetation Mapping*. The Ronald Press Company, 1967. 20-50.
- [12] Liu Huamin, Wu Shaohong, Zheng Du et al. The study on the potential natural vegetation and future prospect. *Progress in Geography*, 2004, 23(1): 62-70. [刘华民, 吴绍洪, 郑度 等. 潜在自然植被研究与展望. 地理科学进展, 2004, 23 (1): 62-70.]
- [13] Köppen W. Das geographische system der klimate. In: Köppen, W, Geider R (eds.), *Handbuch der Klimatologie*. Berlin: Gebruder Borntrager, 1936. 46-48.
- [14] Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38: 57-94.
- [15] Holdridge L R. *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center, San Jose. Costa Rica. 1967.
- [16] Chang Hsin-shih. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (1). *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1989, 13: 1-9. [张新时. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被—气候分类 (1). 植物生态学与地植物学报, 1989, 13: 1-9.]
- [17] Chang Hsin-shih. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (2). *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1989, 13: 197-207. [张新时. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被—气候分类 (2). 植物生态学与地植物学报, 1989, 13: 197-207.]
- [18] Chang Hsin-shih, Yang Dian'an, Ni Wenge. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (3). *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17: 97-109. [张新时, 杨莫安, 倪文革. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被—气候分类 (3). 植物生态学与地植物学报, 1993, 17: 97-109.]
- [19] Wang Yifeng, Xiao Xiangming. Climatic gradient of main vegetation types in the Loess Plateau region. *Acta Botanica Sinica*, 35(4): 291-299. [王义凤, 肖向明. 黄土高原地区主要植被类型的气候梯度分布. 植物学报, 1993, 35 (4): 291-299.]
- [20] Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. The study on the climate-vegetation classification for global change and future prospect. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2587-2592. [周广胜, 王玉辉. 全球变化与气候—植被分类研究和展望. 科学通报, 1999, 44(24): 2587-2592.]
- [21] Franklin Janet. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of bio-spatial pattern in relation to environmental

- gradients. *Progress in Physical Geography*, 1995, 19(4): 474-499.
- [22] Leemans R, Cramer W, van Minne J G. Prediction of global biome distribution using bioclimatic equilibrium models. In: Melillo J M, Breymer A (eds.). *Effects of Global Change on Coniferous Forests and Grassland*. New York: J Wiley and Sons, 1996, 413-450.
- [23] Davis A J, Jenkinson L S, Lawton J H et al. Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming. *Nature*, 1998, 391: 783-786.
- [24] Goudriaan J, Shugart H H, Bugmann H et al. Use of models in global climate studies. In: Walker B, Steffen W, Canadell J et al. (eds.). *The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. London: Cambridge University Press, 1999. 106-140.
- [25] Austin B P. Searching for a model for vegetation analysis. *Vegetation*, 1980, 43: 11-21.
- [26] Austin B P. Continuum concept, ordination methods, and niche theory. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16: 39-61.
- [27] Austin B P, Smith T M. A new model for the continuum concept. *Vegetation*, 1989, 83: 35-47.
- [28] Maidment D R. Geographic information system and hydrologic modeling. In: Goodchild et al. (eds.). *Environmental Modeling with GIS*. New York: Oxford University Press, 1993. 147-167.
- [29] Moore I D. Hydrologic modeling and GIS. In: Goodchild M F et al. (eds.). *Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Inc., 1996. 143-148.
- [30] Iverson L R, Dale M E, Scott T et al. A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forests (U.S.A.). *Landscape Ecology*, 1997, 12: 331-348.
- [31] Bolstad P V, Swank W, Vose J. Predicting southern appalachian overstory vegetation with digital terrain data. *Landscape Ecology*, 1998, 13: 271-283.
- [32] Ostendorf B, Reynolds J F. A model of Arctic tundra vegetation derived from topographic gradients. *Landscape Ecology*, 1998, 13: 187-201.
- [33] Tappeiner U, Tasser E, Tappeiner G. Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors: preliminary experience with a GIS based model applied to an alpine area. *Ecological Modelling*, 1998, 113: 225-237.
- [34] Manies K L, Mladenoff D J. Testing methods to produce landscape-scale presettlement vegetation maps from the U.S. Public Land Survey Records. *Landscape Ecology*, 2000, 15: 741-754.
- [35] Münier B, Nygaard B, Ejrnæs R et al. A biotope landscape model for prediction of semi-natural vegetation in Denmark. *Ecological Modeling*, 2001, 139: 221-233.
- [36] Dymond C C, Johnson E A. Mapping vegetation spatial patterns from modeled water, temperature and solar radiation gradients. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 57: 69-85.
- [37] Pfeffer K, Pebesma E J, Burrough P A. Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape ecology*, 2003, 18: 759-776.
- [38] Brzeziecki B, Kienast F, Wildi O A. Simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4: 499-508.
- [39] Fischer H S. Simulating the distribution of plant communities in an alpine landscape. *Coenoses*, 1990, 5: 37-43.
- [40] Guisan A, Theurillat J-P, Kienast, F. Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9: 65-74.
- [41] Brown D G. Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5: 641-656.
- [42] Liu Jiyuan, Zhuang Dafang, Ling Yangrong et al. Vegetation integrated classification and mapping using remote sensing and GIS technique in Northeast China. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 285-291. [刘纪远, 庄大方, 凌扬荣 等. 基于 GIS 的中国东北植被综合分类研究. *遥感学报*, 1998, 2(4): 285-291.]
- [43] Zhang Baiping, Zhou Chenghu, Chen Shupeng. The geo-info-spectrum of montane altitudinal belts in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 163-171. [张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨. *地理学报*, 2003, 58(2): 163-171.]
- [44] Zhang Baiping, Xu Juan, Wu Hongzhi et al. Digital integration and pattern analysis of mountain altitudinal belts in China. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(2): 144-149. [张百平, 许娟, 吴红智 等. 中国山地垂直带的数字集成与基本规律分析. *山地学报*, 2006, 24(2): 144-149.]
- [45] Zhao Chuanyan, Nan Zhongren, Cheng Guodong et al. GIS-assisted modelling of the spatial distribution of Qinghai spruce in the Qilian Mountain, northwestern China based on biophysical parameters. *Ecological Modelling*, 2006, 191: 487-500.

Modelling of Potential Vegetation in Zulihe River Watershed of the West-central Loess Plateau

ZHAO Chuanyan¹, FENG Zhaodong², NAN Zhongren³, LI Shoubo²

(1. Hydrology and Ecology Laboratory of Watershed, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. National Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Department of Environmental Science, College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There has been an increasing use of predictive spatial distribution of main communities or dominant species at the regional scale for ecological restoration planning, biodiversity conservation planning and regional management decisions on the Loess Plateau. Understanding the spatial distribution of main communities at the regional scale is also essential in assessing the impacts of environmental change or human impacts on vegetation distribution. Based on the investigation of steppe cover that correlates with its habitat, this study focused on the prediction of steppe distribution in the Zulihe River watershed of the west-central Loess Plateau. First, we investigated the cover of steppe of 365 samples. Secondly, important variables (annual mean precipitation and annual mean temperature) that affect vegetation distribution were spatialized as functions of elevation and horizontal coordinates via a GIS. Thirdly, the niche spaces of steppe were determined by incorporating the spatially-distributed main variables with the steppe cover that came from field investigation and remote sensing data (Landsat TM image). The niche spaces defined then were extrapolated over the study area. Comparing the distribution of predicted steppe with its present distribution, we found that the natural vegetation in the region has been destroyed and disturbed by human activities. As a result, soil erosion has been aggravated. The ecological conditions in the study area have been progressively degraded by human-accelerated soil erosion. The object of the study is to provide important baseline for ecological restoration in the Zulihe River watershed.

Key words: Zulihe River watershed; potential vegetation; vegetation cover; geographic information systems