

大渡河上游地区土地利用动态模拟分析

摆万奇, 张永民, 阎建忠, 张镜铎

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于 1967、1987 和 2000 年三期遥感数据和 1:25 万数字高程模型, 通过 Logistic 逐步回归分析, 在地形、海拔、水系、道路交通、城镇和居民点分布等多种自然地理和社会经济因素中, 筛选出不同时期对大渡河上游地区主要土地利用类型空间分布及其变化具有决定作用的驱动因子, 并生成相应的土地利用空间分布概率适宜图, 然后采用 CLUE-S 模型, 模拟分析了 1987 年和 2000 年两个时点上金川、壤塘和马尔康三县 18665 km² 范围内的土地利用状况。用当年的现状图检验对比的结果表明, 模拟取得了较为理想的结果, Kappa 值分别达到 0.86 和 0.89。在此基础上, 针对三种政策情景, 应用相同模型模拟预测了研究地区 2010 年时的土地利用时空变化。

关键词: 大渡河上游地区; 土地利用变化; CLUE-S 模型

文章编号: 1000-0585(2005)02-0206-08

土地利用/土地覆被变化 (Land Use / Land Cover Change, 简称 LUCC) 是当前全球变化研究的重要方面^[1~3]。其中, 通过案例探讨 LUCC 的驱动机制并进行模拟预测是研究的核心内容之一^[4~8]。目前, 有关 LUCC 的主要模型及功能可以概括为: 用描述性模型预测未来的土地利用/土地覆被变化; 应用经验模型解释土地利用/土地覆被变化; 应用空间统计模型预测未来空间格局的变化; 用动态生态系统模型 (dynamic ecosystem models) 检验未来土地利用/土地覆被变化的不同情况和应用经济模型设计政策干预^[9]。由于各类模型所具有的功能不同, 因此, 将多种模型的优点结合起来构建综合模型用于研究 LUCC 的驱动机制并进行动态模拟是一个重要方向。这方面, 近年来出现的 CLUE-S 模型^[10~13] 是一个较好的代表, 它具备同时预测土地利用/土地覆被数量和空间位置变化的能力。本文以大渡河上游地区为案例, 以 CLUE-S 模型为基础, 开展土地利用变化的模拟分析。

1 研究地区概况

本研究以大渡河上游地区的金川、壤塘和马尔康三县为研究区域, 面积 18665 km²。该区域位于大雪山以东, 邛崃山脉以西, 属横断山区北端。这里山高坡陡, 河流深切, 谷地狭窄。山岭海拔高度一般在 4000 m 左右, 部分可达 5000 m。年平均气温 8~13℃ 左右, 年降雨量 660~770 mm, 年均蒸发量 1200~1544 mm, 属温带季风气候。

该地区人口稀少, 是藏族居民的聚集区。据全国人口普查结果显示, 2000 年金川、壤塘和马尔康三县总人口为 157690 人, 人口密度为 8.45 人/平方公里。其中以藏族为主

收稿日期: 2004-07-28; 修订日期: 2004-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270256) 和中国科学院知识与前沿领域项目 (KZCX3-SW-339, V36800) 共同资助。

作者简介: 摆万奇 (1963-), 男, 河南南阳人, 博士, 副研究员。主要从事土地利用/土地覆被变化研究。

的少数民族人口比重在三县所占比例分别是 79.86%、90.73%和 76.87%。

该地区代表性植被类型为亚高山针叶林，主要分布于高山峡谷区，是我国西南主要林区之一。河谷地带则是以玉米、小麦、雪梨等为主的农果业。林线以上和广阔的山原区属传统牧区。在过去 40 多年间，该地区由于大量的森林采伐活动，森林资源下降迅速^[14~18]，加上广泛的陡坡开荒和过度放牧，曾经导致十分严重的水土流失。但自 1998 年国家实施天然林保护工程和退耕还林还草政策以来，生态环境已有明显改善。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究所使用的主要数据包括 1967 年、1987 年和 2000 年三期土地利用/土地覆被数据和 1:25 万数字高程模型。其中，1967 年的数据是从航空照片和当年的 1:10 万地形图中提取；1987 年和 2000 年两期数据来自同期 TM 卫星遥感资料（131-38，1986 年 11 月 2 日，1999 年 4 月 12 日；132-38，1987 年 11 月 12 日，2000 年 3 月 28 日；132-37，1986 年 11 月 9 日，2000 年 3 月 28 日）。遥感数据的处理采用了非监督分类和目视解译相结合的方法。比例尺为 1:100000，最小图斑 4mm²。通过非监督分类准确地划分了地类，再根据土地覆被类型的演替规律，建立了土地覆被变化规则，并根据这些规则进行图斑属性修正。如高山栎不会演替为圆柏，圆柏砍伐后也不会演替为高山栎，次生林和草甸不会演替为原始林，但山原区冷杉林采伐和火烧后会演替为草甸等。通过实地验证和与林相图的比较表明，遥感图像解译的总准确率达到了 97.5%。

同时，在 Arc GIS 平台下数字化地形图、交通图等图件，得到了地形、海拔、水系、道路交通体系、城镇和居民点等数据。对三期土地利用数据，按照 500m×500m 的空间分辨率，分别主要土地利用类型，逐期随机抽取了 20000 个栅格，运用 Logistic 逐步回归分析，最终确定与各个地类关系最为密切的因子。

2.2 模拟方法

2.2.1 空间分析 根据土地利用空间分布状况和候选驱动因素数据，运用 Logistic 逐步回归对每一栅格可能出现某一土地利用类型的概率进行诊断。

$$\text{Log}\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i}$$

式中， P_i 表示每个栅格可能出现某一土地利用类型 i 的概率， X 表示各候选驱动因素。通过逐步回归，筛选出对土地利用格局影响较为显著的因素。最终得到各土地利用类型的空间分布概率适宜图。

2.2.2 CLUE-S 模型 CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学一个由 P. H. Verburg 等科学家组成的“土地利用变化和影响”研究小组在其较早的 CLUE 模型基础上创建并于 2002 年 7 月推出的^[10]。与 CLUE 模型相比，CLUE-S 模型是基于高分辨率（一般大于 1 km×1km）空间图形数据构建的，适用于中小尺度土地利用变化研究^[12]。CLUE-S 模型的假设条件是，一个地区的土地利用变化是受该地区的土地利用需求驱动的，并且一个地区的土地利用分布格局总是和土地需求以及该地区的自然环境和社会经济状况处在动态的平衡之中。在此假设的基础上，CLUE-S 模型运用系统论的方法处理不同土地利用类型之间的竞争关系，实现对不同土地利用变化的同步模拟。其主要的理论基础包括土地利用变化的关联性（connectivity），土地利用变化的等级特征（hierarchical organization），土地利用变

化的竞争性 (competition) 和土地利用的相对稳定性 (stability) 等。该模型由两个主要模块组成, 一个是非空间模块, 另一个是空间模块。非空间模块通过对社会经济以及政策法规等土地利用变化驱动因素的分析, 计算研究地区不同类型土地利用的数量变化; 空间模块则是根据各种驱动因素计算每个空间单元 (栅格) 的概率。最后, 在综合分析土地利用的空间分布概率适宜图、土地利用变化规则和初期土地利用分布现状图的基础上, 根据总概率大小对土地利用的数量变化进行空间分配, 从而实现了对土地利用时空变化的动态模拟。

3 结果与分析

3.1 Logistic 回归结果

地类划分采用的是中国科学院资源环境数据中心的分类系统。将土地利用类型按一级分类进行合并后得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个大类。候选影响因子选取了地形、海拔、水系、道路交通体系、城镇和居民点分布等对土地利用分布格局影响较大且相对稳定的因素。表 1 是 2000 年各地类的 Logistic 逐步回归结果。

表 1 2000 年各土地利用类型的 Logistic 逐步回归结果 (β 值)

Tab. 1 Results of Logistic regression for different land use types in the year 2000

驱 动 因 子	地 类	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
海拔		-0.141	-0.148	0.166	-0.148	-0.223	0.711
	<5°	0.868	-1.507	0.984	3.168		
坡 度	5°~15°	0.325	-0.807	0.614	1.606		
	15°~25°					-7.946	-0.327
	>25°		0.350	-0.351			-2.553
坡 向	平地						1.556
	北坡	-0.441					
	东坡		-1.082	1.003			
	南坡	0.337	-1.641	1.486		1.608	-0.438
距 离	西坡		-0.588	0.564			-0.763
	到村级以上公路的最近距离	-0.229	-0.015				0.112
	到村级公路的最近距离	-0.539	0.095	-0.061			
	到城镇居民点的最近距离		0.007	-0.009		-0.479	0.039
	到河流的最近距离	0.248	-0.270	0.177			-0.483
	到湖岸线的最近距离	0.045	0.010		-0.284		-0.049
β_0		1.658	6.561	-7.342	-1.213	2.772	-35.180
ROC 值		0.873	0.794	0.782	0.844	0.978	0.927

表 1 中, β 值是 Logistic 方程的解释变量系数。而解释变量对因变量的影响程度可以用 $\text{Exp}(\beta)$ 作为衡量指标^[19]。 $\text{Exp}(\beta)$ 表示事件的发生频数与不发生频数之比, 这里表示解释变量每增加一个单位, 土地利用类型发生比的变化情况。例如, 在表 1 中耕地的 Logistic 回归方程包括了 9 个解释变量, 按 $\text{Exp}(\beta)$ 值大小排列依次为: <5° 的坡地

(2.381)、南坡 (1.4)、 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间的坡地 (1.385)、到河流的最近距离 (1.281)、到湖岸线的最近距离 (1.046)、海拔 (0.869)、到村级以上公路的最近距离 (0.795)、北坡 (0.644)、到村级公路的最近距离 (0.583)。从中可以看出,耕地在南坡出现的比率远高于在北坡出现的比率。同样,耕地在坡度 $<5^{\circ}$ 的坡地上出现的比率要高于坡度在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间的坡地。

林地的 Logistic 回归方程包括了 12 个解释变量,按 $\text{Exp}(\beta)$ 值大小排列依次为:坡度 $>25^{\circ}$ 的坡地 (1.419),到村级公路的最近距离 (1.100),到湖岸线的最近距离 (1.010),到城镇居民点的最近距离 (1.007),到村级以上公路的最近距离 (0.985),海拔 (0.863),到河流的最近距离 (0.764),西坡 (0.556),坡度在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间的坡地 (0.446),东坡 (0.339),坡度 $<5^{\circ}$ 的坡地 (0.222),南坡 (0.194)。

草地的 Logistic 回归方程包括了 10 个解释变量,按 $\text{Exp}(\beta)$ 值大小排列依次为:南坡 (4.417),东坡 (2.726),坡度 $<5^{\circ}$ 的坡地 (2.676),坡度在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的坡地 (1.848),西坡 (1.757),到河流的最近距离 (1.193),海拔 (1.180),到城镇居民点的最近距离 (0.991),到村级公路的最近距离 (0.941),坡度 $>25^{\circ}$ 的坡地 (0.704)。

对于其他地类及解释变量之间的关系也可作同样的分析。

对回归结果的检验,采用了 Pontius 等提出的 ROC (Relative Operating Characteristics) 方法^[20~23]。通常,当 ROC 值大于 0.7 时,可以认为所确定的驱动因素具有较好的解释能力。这里,对三期数据中各地类所作的回归分析结果,ROC 值均在 0.78 以上。在取得较为满意的回归结果后,计算出了每个地类单元的概率,从而得到各个时期土地利用的空间分布概率适宜图。

3.2 土地利用变化的空间模拟结果

应用 CLUE-S 模型进行空间模拟,是在综合分析土地利用的空间分布概率适宜图、土地利用变化规则和研究初期土地利用分布现状图的基础上,根据总概率大小对土地利用需求进行空间分配的过程。首先以 1967 年的土地利用空间数据为基础,模拟 1987 年的土地利用空间状况,并用 1987 年的实际土地利用图对模拟结果进行检验(图版 3,图 1);第二次模拟是以 1987 年的实际土地利用空间数据为基础,模拟 2000 年的土地利用空间状况,并用 2000 年的实际土地利用图对模拟结果加以检验(图版 3,图 2)。从模拟图与现状图的直接对比可以看出,模拟效果较为理想,尤其是两者在主要地类如草地、林地和耕地上的分布基本吻合。

另外,可以用 Kappa 指数^[21]定量地反映模拟效果:

$$\text{Kappa} = (\text{Po} - \text{Pc}) / (\text{Pp} - \text{Pc})$$

其中, Po = 正确模拟的比例 (observed proportion correct);

Pc = 随机情况下期望的正确模拟比例 (expected proportion correct due to chance);

Pp = 理想分类情况下正确模拟的比例 (Proportion correct when classification is perfect)。

根据 1967 年的数据模拟 1987 年土地利用状况时,模拟正确的栅格数为 65302 个,占总栅格数的 87.921%;由于共有 6 个土地利用类型,每个栅格随机模拟情况下的正确率 $\text{Pc} = 1/6$,故

$$\begin{aligned} \text{Kappa} &= (\text{Po} - \text{Pc}) / (\text{Pp} - \text{Pc}) = (0.87921 - 0.166667) / (1 - 0.166667) \\ &= 0.855087 \end{aligned}$$

根据 1987 年的数据模拟 2000 年土地利用状况时, 模拟正确的栅格数为 67483 个, 占总栅格数的 90.8776%。同样可计算出:

$$\begin{aligned} Kappa &= (Po - Pc) / (Pp - Pc) = (0.908776 - 0.166667) / (1 - 0.166667) \\ &= 0.890531 \end{aligned}$$

可见, 两次模拟的 Kappa 值均达到了较高水平, 模拟结果是令人满意的。

需要指出的是, 模拟过程主要应用了 CLUE-S 模型的空间模块, 其模拟数量变化的非空间模块并未采用。这是因为大渡河上游地区的土地利用状况受政策的影响很大^[15], 其数量变化难以用统一的模型描述。因此, 在实际模拟中, 土地利用的数量变化是根据相邻两期的现状图得到的, 而逐年的变化量则是通过线性内插法获得。这里的模拟结果主要反映的是土地利用变化的空间分布状况。

3.3 未来土地利用变化情景

鉴于 CLUE-S 模型较好地模拟了 1967~1987 年和 1987~2000 年大渡河上游地区土地利用的时空变化, 因此, 将之用于该地区未来的土地利用情景分析也应该是可行的。这里, 以 2000 年的实际土地利用数据为基础, 结合大渡河上游地区正在实施的退耕还林政策情况, 设计三种情景, 对未来的土地利用时空变化进行模拟预测。

方案 a: 根据坡度在 15 度以上的耕地数量, 确定到 2010 年时, 退耕还林面积 22275hm²; 同时建设用地面积增加 20%;

方案 b: 根据坡度在 25 度以上的耕地数量, 确定到 2010 年时, 退耕还林 7425hm²; 同时建设用地面积增加 20%;

方案 c: 到 2010 年时, 耕地全部退为林地, 同时建设用地增加 20%。

模拟结果见图版 3, 图 3。

从三种方案的模拟结果可以看出, 当退耕还林的面积数量确定后, CLUE-S 模型可以较为准确地模拟其空间位置的变化, 从而为方案的实施创造条件。对于各方案的优缺点与可行性的论证, 需要在实际应用中结合当地的具体情况进行, 这里无法作进一步的分析。但是, 对未来土地利用变化情景的模拟, 显示了 CLUE-S 模型在指导土地利用规划与生态环境建设方面具有重要作用, 可以作为决策支持系统的重要组成部分。

4 结论与讨论

本文以 CLUE-S 模型为基础, 模拟了大渡河上游地区 1967~1987 年和 1987~2000 年土地利用的时空变化, 并用同期的土地利用现状图对模拟结果进行检验。直观对比和 Kappa 指数均表明, 模拟取得了良好效果。这说明 CLUE-S 模型适用于该地区的 LUCC 研究, 将其用于模拟未来的土地利用变化也是可行的。

CLUE-S 模型的重要特点是可以同时模拟土地利用的数量变化和空间位置变化, 但在本文中, 模拟的重点在于土地利用空间分布的变化。这是因为, 到目前为止, 大渡河上游地区的土地利用/土地覆被变化仍然以政策驱动为主, 尤其是林地和耕地面积的变化。因此, 在对未来土地利用空间变化的模拟预测中, 是按不同的政策情景先确定数量变化的。这种处理对于政策主导型的土地利用变化更有实际意义。例如, 一旦确定了森林采伐数量、造林面积、封山育林面积、禁牧面积, 或者规划了自然保护区面积等, 都可以用同样的方法预测其空间位置的变化, 而且, 其空间分辨率可以精确到单个的栅格水平。这使得 CLUE-S 模型在实际的土地利用规划和生态环境建设方面具有重要作用, 可以作为决策支

持系统的重要组成部分。

在空间分析中,本文应用遥感数据和数字高程模型所提供的自然地理和社会经济信息,应用 Logistic 逐步回归方法,确定了制约大渡河上游地区土地利用变化的主要因子。其中,对社会经济因素的处理借助了距离指标定量地表达其空间影响,这是该方法比较独特和巧妙的地方。例如,城镇是人口、经济、文化等因素的积聚中心,它对土地利用/土地覆被的影响,通常随距离大小而变化,因此,距离城镇的远近就成了一个综合表达社会经济影响的重要指标。此外,距离公路、居民点的远近也具有类似的作用,都在不同程度上影响着林地、耕地和建设用地等地类的变化。

参考文献:

- [1] IGBP/HDP. Land-Use and Land-Cover Change Science/Research Plan. IGBP Rep. 35 / HDP Rep. 7, 1995.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. 地理学报,1996,51(5):553~558.
- [3] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究:寻求新的综合途径. 地理研究,2001,20(6):645~651.
- [4] Skole D L, *et al.* Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. Bioscience, 1994, 44: 314~22.
- [5] 李平,李秀彬,刘学军. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析. 地理研究,2001,20(2):129~138.
- [6] 张惠远,赵昕奕,蔡运龙,殷静. 喀斯特山区土地利用变化的人类驱动机制研究——以贵州省为例. 地理研究,1999,18(2):136~142.
- [7] 朱会义,何书金,张明. 环渤海地区土地利用变化的驱动力分析. 地理研究,2001,20(6):669~678.
- [8] 鲁奇,战金艳等. 北京近百年城市用地变化与相关社会人文因素分析. 地理研究,2001,20(6):688~696.
- [9] Lambin E F. Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. Progress in Physical Geography, 1997, 21(3):375~393.
- [10] Verburg A, Soepboer P H, Veldkamp W, *et al.* Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S Model. Environmental Management, 2002, 30(3): 391~405.
- [11] Veldkamp W, Fresco L O. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. Ecological Modelling,1996, 85: 253~270.
- [12] 张永民,赵士洞,Verburg P H. CLUE-S模型在奈曼旗土地利用时空变化模拟中的应用. 自然资源学报,2003,18(3):310~318.
- [13] 张永民,赵士洞,张克斌. 科尔沁沙地及其周围地区土地利用变化的时空动态模拟. 北京林业大学学报,2003,25(3):68~73.
- [14] 摆万奇,张锦锜,包维楷. 大渡河上游地区景观格局与动态. 自然资源学报,2003,18(1):75~80.
- [15] 摆万奇,阎建忠,张锦锜. 大渡河上游地区土地利用/土地覆被变化与驱动力分析. 地理科学进展,2004,23(1):71~78.
- [16] 包维楷,张锦锜,王乾,等. 大渡河上游林区森林资源退化及其恢复与重建. 山地学报,2002,20(2):194~198.
- [17] 包维楷,张锦锜,等. 青藏高原东部采伐迹地早期人工重建序列梯度上植物多样性的变化. 植物生态学报,2002,26(3):330~338.
- [18] 李承彪. 四川森林的生态研究. 成都:四川科学技术出版社,1990.
- [19] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型——方法与应用. 北京:高等教育出版社,2001.
- [20] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. Agriculture, Ecosystems and Environment,2001, 85: 239~248.
- [21] Pontius R G. Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2000, 66(8):1011~1016.
- [22] Pontius R G, Cornell J D, Charles A S. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. Agriculture, Ecosystems and Environment,2001, 85:191~203.
- [23] Pontius R G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2002,68(10):1041~1049.

Simulation of land use dynamics in the upper reaches of the Dadu river

BAI Wan-qi, ZHANG Yong-min, YAN Jian-zhong, ZHANG Yi-li

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on remote sensing imageries of 1967, 1987 and 2000, and a digital elevation model with a scale of 1:250000, the key forces driving land use change and controlling land use pattern in the upper reaches of the Dadu river are found out from such biophysical and socioeconomic factors as terrain, elevation, roads, water system, urban and rural residential areas, and then the probability maps for each land use type are created by using Logistic stepwise regression, of which the goodness of fit is evaluated for all equations with the ROC(Relative Operating Characteristics)method. In this study, CLUE-S model which has the capability of modeling changes in quantity and location simultaneously, is applied to simulate temporal and spatial changes in land use from 1967 to 1987 and from 1987 to 2000 for an area of 18665 km² which covers the counties of Rangtang, Jinchuan and Barkam. Comparisons for validation between simulated land use maps and actual land use maps of 1987 and 2000 find that Kappa index reaches to 0.86 and 0.89 respectively, indicating a successful simulation. For a better understanding of the future land use changes in the region, the same model is further put into application to predict spatial distribution of land use changes in 2010 for three scenarios associating with current governmental policy of "grain to green". The results of scenario analysis demonstrate that CLUE-S model can play key roles in land use planning and ecological construction, and is also a key part of decision-support system. In the scenario analysis, the changes in quantity are specified on purpose, and thus the simulation is focused on land use changes in location. This is because land use and cover changes in the upper reaches of the Dadu river are mainly driven by policies, especially for forest land and cultivated land, and changes in area are usually determined by government. Therefore, such an application of CLUE-S model is more suitable to regions characterized by policy-driven land use change, in which once the changes in quantity, such as areas of forest cutting, afforestation, grazing-forbidden, or planned reserves, are specified, then their changes in locations can be predicted with the same model. Furthermore, the spatial resolution of modeling can reach to a level of single grid cell.

Key words: upper reaches of the Dadu river; land use change; CLUE-S model

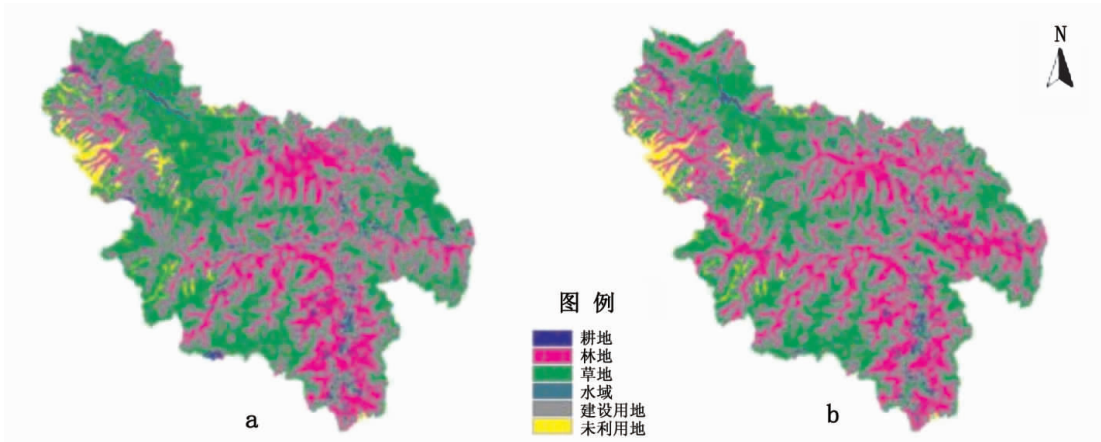


图 1 1987 年土地利用现状图(a)和模拟图(b)

Fig.1 Comparison of actual land use map(a) and simulated map(b) of 1987

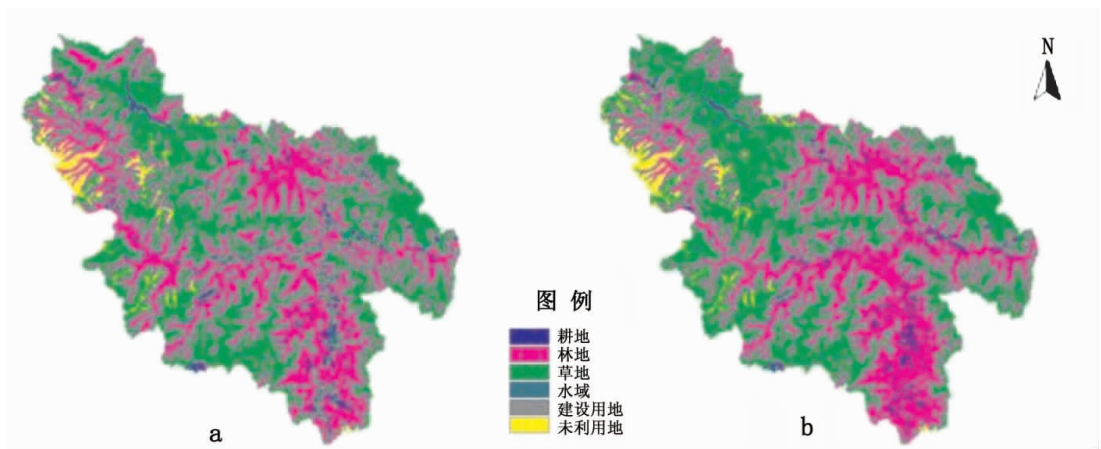


图 2 2000 年土地利用现状图(a)和模拟图(b)

Fig.2 Comparison of actual land use map(a) and simulated map(b) of 2000

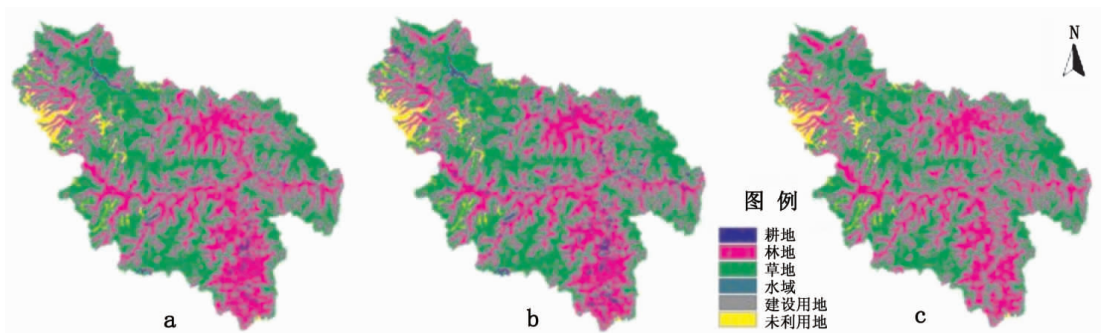


图 3 土地利用变化情景对比

Fig.3 Comparison of different land use change scenarios