

中国历史时期森林空间格局网格化重建方法研究 ——以东北地区为例

李士成^{1,2}, 何凡能¹, 张学珍¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 具有空间信息的历史土地覆被数据集是研究土地覆被变化气候与生态效应的基础数据。本文在潜在植被数据和现代遥感土地利用数据的基础上, 确定了土地垦殖前森林植被可能的分布范围; 遴选并量化了影响我国土地宜垦性的主导因子, 评估了省域尺度上土地的宜垦性; 构建了以土地宜垦性为权重的历史森林覆被网格化重建模型 (网格大小为 10 km×10 km); 重建了我国东北三省 1780 年和 1940 年网格化的森林覆被。结果表明: 基于省域森林面积数据, 该方法较好地再现了历史时期森林空间格局; 与 2000 年遥感有林地空间数据对比分析显示, 模型重建结果与遥感数据绝对误差的单样本 t 检验相伴概率 (双尾) 为 0.12, 大于显著性水平 0.05, 表明模型重建结果与遥感数据不存在显著性差异, 网格化重建方法具有较好的可行性; 同时, 重建结果准确性评估也表明: 1780 年重建结果在县域尺度上的相对误差在 -30%~30% 之间的县级政区有 99 个, 占县级政区总数 (不含无值区) 的 74.44%, 总体误差相对较小。

关键词: 森林覆被; 网格化方法; 东北地区; 历史时期

DOI: 10.11821/dlxb201403003

1 引言

土地利用/覆被变化 (Land Use and land Cover Change, LUCC) 是影响气候系统的重要因素, 也是全球变化研究的核心内容之一^[1-3]。长时间尺度土地利用/覆被变化作为 LUCC 的重要组分, 其重建及效应研究也得到学术界的广泛重视^[4-5]。这是因为长时间尺度 LUCC 数据不仅是模拟过去气候变化过程的基础, 而且也是诊断气候形成机制、辨识气候系统对自然和人类强迫敏感性的重要参量^[6-7]。上个世纪 90 年代以来, 国际相关科学组织或计划对长时间尺度, 特别是过去 300 年的土地利用/覆被变化的研究, 给予了极大关注^[8-9]。

就历史 LUCC 数据订正和估算而言, 国内外学者已开展了许多研究工作, 我国由于拥有丰富的历史文献资料, 而在该方面研究中取得了显著进展。如 Ge 等^[10]基于清代“田亩数据”的基础上, 采用耕地面积指数法订正了过去 300 年我国内地 18 省耕地面积数据; Ye 等^[11]采用“田亩数据”订正与多源耕地数据互校的方法, 重建了东北地区过去 300 年县域耕地面积变化序列, 并在此基础上, 继续订正了森林和草地数据; 何凡能等^[12]依据清民时期森林变迁史料和现代森林清查资料, 估算了 1700-1998 年我国各省区每 50 年森林面积与森林覆被率值; 等等。这些基于史料考订而建立的以政区为单元的历史土地覆被变化数

收稿日期: 2013-08-13; 修订日期: 2013-12-10

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划 (2010CB950901); 国家自然科学基金 (41271227) [Foundation: China Global Change Research Program, No.2010CB950901; National Natural Science Foundation of China, No.41271227]

作者简介: 李士成 (1989-), 男, 山东费县人, 博士研究生, 主要从事土地利用/覆被变化研究。

E-mail: lisc.10s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 何凡能 (1963-), 男, 福建仙游人, 副研究员, 中国地理学会会员 (S110006132M), 主要从事历史地理与环境变迁研究。E-mail: hefn@igsnrr.ac.cn

据,是本文研究的重要基础。

就历史LUCC网格化重建而言,国内外学者也进行了一些探讨。其中,最具代表性的成果当数Ramankutty and Foley重建的SAGE全球数据集^[13]和Klein Goldewijk重建的HYDE全球数据集^[14]。HYDE数据集从发布以来不断更新,最新版本HYDE3.1重建时间跨度已延伸至10000BC-AD2000,其数据空间分辨率为5' (约相当于10 km)^[15]。然而,两个全球数据集只重建了耕地或牧草地覆被,均没有重建历史森林覆被。在区域尺度上,如Kaplan等以人口为代用资料,通过农林互动关系重建了欧洲地区工业化以前1000BC-1850AD年,空间分辨率为5'×5'的森林覆被^[16];Steyaert等结合潜在植被、县域分辨率的调查/统计数据、土壤数据和基于Landsat的土地覆被分类数据重建了空间分辨率约20 km的美国东部地区1650年、1850年、1920年和1992年的土地覆被和土地利用^[17];Liu and Tian在中国2000年遥感LUCC数据的基础上,采用二分迭代的数学方法,重建了中国1700~2005年空间分辨率为10 km,时间分辨率为年的耕地、森林和城镇建设用地的空间分布^[18];但其基于历史土地覆被空间格局与现代基本一致的假设,使其重建结果具有较大不确定性。总体而言,因缺少较为合理可行的森林网格化重建方法,多数区域重建研究也仅限于耕地和牧草地^[19-23]。

有鉴于此,本文拟在确定土地垦殖前森林植被可能分布范围的基础上,通过对我国土地宜垦性进行定量评估,来构建中国历史森林覆被网格化重建模型。并以我国东北三省为例,运用该模型来网格化重建1780年和1940年的森林覆被格局。希冀这一研究对完善和发展网格化重建历史土地覆被变化的方法有所裨益。

2 总体思路

历史上中国是一个多森林的国家,据估算,历史时期森林覆被率达49.6%~64%^[24-27]。其后,随着人类社会的发展和人口数量的不断增加,人们对森林资源的消耗与日俱增,以至森林资源不断减少,森林植被的空间分布范围也日渐缩小。

森林变迁史的研究表明:森林的破坏或消失,只有极小部分是自然因素造成的,而大多数是人类活动所为^[25]。其中,人们毁林垦荒是导致森林面积持续锐减最主要的驱动因素,特别是明清以降,随着人口的激增,人们为了获得更多农田,不断铲除天然植被,以至于历史文献中常有“昔之深山大林概为熟地”^①、“跬步皆山,数十年前尽是老林,近已开空”^②等记载。同时,我国漫长的土地垦殖历史也告诉我们,人们在进行土地垦辟时,通常遵循着“先优后劣”、“先易后难”的规律,即首先会选择自然条件比较优越、易于开垦的地方,而后才会到海拔较高或水热条件相对较差的地方去垦辟新的农田^[28]。正如《管子·八观篇》所述:“凡田野万家之众,可食之地方五十里,可以为足矣。万家之上,则就山泽可矣;万家之下,则去山泽可矣。”韩茂莉^[29]在《中国历史农业地理》中也阐明:“在中国农业与现代科技接轨之前,靠传统生存方式带来单位土地面积上农作物的增殖,远远不能满足人口与社会发展的需求,为了生存,人民将眼光一次次投向山林边荒。……人们根据农业开发的难易,从较易开垦的平原沃土入手,依循从平原至山区的开发进程,逐步扩展农耕区范围。”王毓瑚^[30]在《我国历史上的土地利用》一文中也明确指出:“开山造田并不是轻而易举的,在人口稀少的上古时期,比较平坦的可耕地还有的是,愿意格外费力气去开垦山田的不会是很多。……为了多生产粮食,就得不断扩大耕地面积。可是我们的土地天然宜于耕种的却相对不多,这就决定了我们的土地利用的发展趋势。而且一般的

① 光绪《平利县志》卷八

② 光绪《凤县志》卷一

趋势是，较低处和较缓的坡地开过之后，接着又去开较高处的较陡的坡。”可见，人类土地垦殖活动对我国历史时期森林分布具有重要影响，而这种影响遵循着土地宜垦性较高的地方森林优先被破坏的规律。

为了客观回溯历史时期森林植被的覆被格局，本文基于上述对森林变迁历史及其规律的认识，提出了历史森林覆被网格化重建的总体思路，如图1所示。重建思路的核心是在土地垦殖前森林植被可能分布范围的基础上，对土地的宜垦性进行评估，依据土地宜垦性较高的地方森林优先被破坏、宜垦性较低的地方森林后被破坏的原则，构建省域森林面积网格化分配模型。

3 重建模型设计

3.1 森林植被可能分布范围的确定

在全球变化研究领域，潜在自然植被已被许多研究作为土地开垦前的自然植被，用于探讨土地开垦导致的土地覆被变化。然而就我国而言，目前还没有覆盖全国的潜在自然植被数据。Ramankutty等重建的全球潜在植被虽涵盖中国区域，但该数据作者声明该数据适用于全球或大陆尺度，用于区域尺度存在较大不确定性^[13]。为此，本文拟充分利用现代卫星遥感观测数据和全球潜在植被数据来确定土地垦殖前森林植被的可能分布范围。

虽然大量历史文献记载表明，现代卫星遥感观测到有森林分布的地区，在历史上也多为森林分布区；但是现在遥感观测到的非森林分布区（如部分农耕、城镇用地地区），在历史上也可能曾是森林广布的地区，如华北平原、四川盆地等。因此，现代遥感有林地数据并不能含盖历史时期森林的分布范围。据此，我们假设现代卫星遥感观测到有森林分布的地区，历史上也为森林分布区；而现在遥感观测为非森林分布的地区，在历史时期也可能有森林分布，但其空间范围不超出潜在自然植被所反映的森林分布范围。

依据上述假设，本文提出“土地垦殖前森林植被可能分布范围”的确定方案（图2）。首先，将多期遥感有林地数据叠

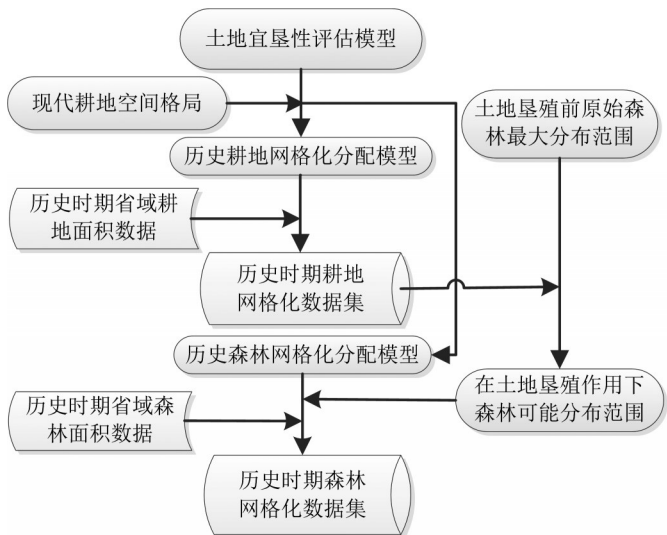


图1 历史森林空间格局网格化重建思路
Fig. 1 Scheme of the reconstruction of historical forest cover

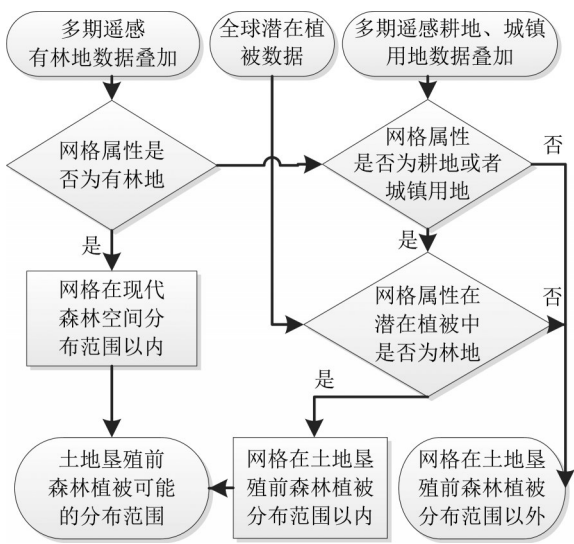


图2 土地开垦前中国森林植被可能分布范围确定流程图
Fig. 2 Flow chart of getting the possible distribution extent of forest vegetation before reclamation in China

加、求并集，以确定现代森林可能的分布范围。其次，将遭受人类土地利用活动影响，已转换为耕地、城镇用地的有林地分布，利用潜在森林植被替换的方法进行复原。替换的原则是：遥感有林地数据叠加后，非有林地的网格，如果遥感数据显示为耕地或城镇用地，且潜在植被中为森林，则该网格被替换成有林地。最后，把卫星观测的现代森林可能的分布范围与复原的现代农耕区和城镇区森林的可能分布范围求并集，以获得“土地垦殖前森林植被可能的分布范围”。其涵义可近似表征为：与气候条件达到平衡，且没有人类干扰的情况下，森林植被可能的分布范围。该范围即为本文进行历史森林面积网格化分配的最大范围。

3.2 土地宜垦性评估模型的设计

土地宜垦性作为土地资源的一种自然属性，它主要受到各种自然因子及其相互作用的制约，主要包括地形、气候、土壤等。

3.2.1 影响因子的遴选

(1) 地形。地形条件包括海拔高度、地面坡度与坡向等。海拔高度是引起热量条件垂直变化的重要因素，通常高度每升高100m， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温减少150~200 $^{\circ}\text{C}$ ，作物生长期也随之缩短^[31]。因此，海拔高度对土地宜垦性有明显的影响。地面坡度也是影响土地宜垦与否的重要因子，坡度不同不仅造成土地水土流失状况的显著差别，而且还影响土地排灌难易程度的不同，从而引起土地宜垦性的差异。地面坡向不同，造成获得太阳辐射的不同，同时迎风坡与背风坡水分热量条件存在明显差别，但这种影响一般在较小的空间尺度上才会体现出来，在本文10 km×10 km的网格尺度上，坡向主要影响适宜种植作物的种类及其组合方式、熟制等，而对土地是否宜垦则影响不大。

(2) 气候。我国幅员辽阔，气候类型复杂多样，光、温、水的空间组合差异很大。通常而言，光、温、水组合较好的地区，有利于农业生产，其土地可能优先得以垦殖；反之，不利于农业生产，其土地覆被可能更接近于自然状态。因此，气候因素对土地宜垦性有直接影响。

(3) 土壤。土壤是地表能够生长植物的疏松表层，是人类从事农业生产的物质基础。虽然不同的土壤类型，其肥力、理化性质以及耕作性能也有所差别，但其影响主要体现在适宜种植作物种类、熟制等的差异上，而对土地是否适宜垦殖并无明显影响。

综上所述，在10 km×10 km空间网格尺度上，海拔高度、地面坡度与气候因子对土地的宜垦性影响显著，因而将其作为主要限制因子纳入土地宜垦性评估模型的构建。

3.2.2 影响因子的量化和标准化

(1) 海拔高度 (*D*)。不同的海拔高度，具有不同的水热条件组合，从而造成土地宜垦性的垂直差异。但在一定海拔高度的范围内，这种差异对作物能否生长不具有限制意义；只有当海拔达到一定高度时，水、热条件限制了作物的生长，才会对土地宜垦性产生显著影响。据此，本文参考《中国农业土地利用》^[32]中海拔的分级标准，对海拔高度进行重新分级、赋值，并以省区为单元，进行标准化处理：

$$D'(i, k_n) = \frac{\text{Max}(D(i, k_n)) - D(i, k_n)}{\text{Max}(D(i, k_n))} \tag{1}$$

式中： $D'(i, k_n)$ 表示 k_n 省区网格*i*的土地宜垦性海拔权重， $\text{Max}(D(i, k_n))$ ，表示 k_n 省区中海拔最大值，*n*为省区编号。

(2) 地面坡度 (*S*)。地面坡度的不同，引起土地水土流失状况的差别，进而影响土地的宜垦性。研究表明，地面坡度在3°以下的土地，基本无水土侵蚀，土地宜垦性较好；3~15°的土地，水土流失比较普遍，但采取一定水保措施之后，仍适宜开垦；而25°是坡地开垦的极限，极少被垦殖^[32]。借鉴《中国农业土地利用》^[32]中坡度的分级标准，对坡度进行分级、赋值，并依照公式(2)进行标准化处理。其中，各省区内坡度在25°以上的网格的

土地宜垦性的坡度权重 $S'(i, k_n)$ 赋值为零。

$$S'(i, k_n) = \frac{Max(S(i, k_n)) - S(i, k_n)}{Max(S(i, k_n))} \tag{2}$$

式中： $S'(i, k_n)$ 表示 k_n 省区 i 网格的土地宜垦性坡度权重， $Max(S(i, k_n))$ 表示 k_n 省区坡度最大值。

(3) 气候因子 (C)。气候生产潜力是光、温、水共同决定的生态系统生产力，就土地垦殖而言，它可以较好的定量概括气候因子。气候生产潜力可以根据太阳总辐射量、 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温、风速、温度、湿度、日照时数等数据推算得到^[33]。气候生产潜力的值越高，土地适宜垦殖的程度越大。据公式 (3) 把气候生产潜力做分省区标准化处理：

$$C'(i, k_n) = \frac{C(i, k_n)}{Max(C(i, k_n))} \tag{3}$$

式中： $C'(i, k_n)$ 表示 k_n 省区 i 网格的土地宜垦性气候权重， $Max(C(i, k_n))$ 表示 k_n 省区中气候生产潜力的最大值。

3.2.3 土地宜垦性评估模型的构建 在现代耕地空间格局 $SD(i, k_n)$ 的基础上，综合考虑海拔、坡度和气候三个主导因子，采用等权重构建土地宜垦性评估模型：

$$\delta(i, k_n) = D(i, k_n) \cdot S'(i, k_n) \cdot C'(i, k_n) \tag{4}$$

式中： $\delta(i, k_n)$ 为 k_n 省区 i 网格的土地宜垦性。从公式 (1)~(4) 可以看出，在现代耕地空间格局的基础上，土地的宜垦性 $\delta(i, k_n)$ 随着海拔高度 D 、地面坡度 S 的增大而减小，而随着气候生产潜力 C 的增大而增大。

3.3 历史森林网格化分配模型的设计

我国历史时期森林面积的消长与耕地数量的增减密切相关，都与土地宜垦条件有关。因此，在构建历史森林网格化分配模型之前，先构建耕地网格化分配模型。

3.3.1 耕地网格化分配模型 要把每个时点 k_n 省区耕地面积 $area(i, k_n)$ 分配至 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 的网格 i 中，关键在于计算网格 i 要分配的耕地面积占其所属 k_n 省区耕地面积的比重 $\beta(i, k_n)$ 。而 $\beta(i, k_n)$ 受土地宜垦性 $\delta(i, k_n)$ 的影响，对于同一个省区而言， $\delta(i, k_n)$ 值越大的网格其耕地面积比重越大。因此，通过直接求取比例系数的方法可求得 $\beta(i, k_n)$ ，并最终得到 t 年网格 i 的耕地面积 $cropland(i, t)$ 。

$$\beta(i, k_n) = \delta(i, k_n) / \sum_i \delta(i, k_n) \tag{5}$$

$$cropland(i, t) = \beta(i, k_n) \cdot area(k_n, t) \tag{6}$$

3.3.2 森林网格化分配模型 为了将以省域为单元的森林面积“统计数据”，按一定的原则和算法分配到空间网格上，本文构建了历史森林网格化分配模型。模型核心思想是从土地垦殖前森林植被可能的分布范围中扣除耕地的分布后，依据土地宜垦性较高的地区森林优先被破坏、宜垦性较低的地方森林后被破坏的原则，对省域森林面积进行分配。

本文研究网格大小为 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ ，设定土地开垦前森林植被可能分布范围内每个网格的初始森林面积为 $10\text{ km} \times 10\text{ km} = 100\text{ km}^2$ ，扣除耕地的分布 $cropland(i, t)$ ，得到 t 年开垦农地后森林的可能分布 $fremain(i, t)$ ：

$$fremain(i, t) = 100\text{ km}^2 - cropland(i, t) \tag{7}$$

式中： $fremain(i, t)$ 为 t 年时 i 网格开垦农地后还剩余森林面积。

海拔较低、坡度较小的地区人类更易到达对其植被进行破坏，因此，可以继续以土地宜垦性为权重，用计算每个网格宜垦性占比 $\beta(i, k_n)$ 的方法求取每个网格森林面积的分配权重。将省域森林面积分配至 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 网格中，其分配模型如下：

$$fresult(i, t) = fremain(i, t) - \beta(i, k_n) \cdot \left(\sum_i^k fremain(i, t) - farea(k_n, t) \right) \tag{8}$$

式中: $fresult(i, t)$ 为最终每个网格分配的森林面积; $farea(k_n, t)$ 为 t 年时 k_n 省实际森林面积。

要指出的是, 对于土地宜垦性较高的网格, 依据公式 (8) 进行计算, 有可能会出现 $fresult(i, t) < 0$ 的情况, 对此, 本文处理如下:

- ① 所有网格的森林面积均大于等于 0;
- ② 若土地宜垦性较高的网格 i 出现 $fresult(i, t) < 0$ 的情况, 则设定该网格的 $fresult(i, t) = 0$, 将该网格多扣除的森林面积, 到 $fresult(i, t) > 0$ 的网格中仍以土地宜垦性占比 $\beta(i, k_n)$ 为计算权重进行扣除, 反复迭代, 直至所有网格的森林面积均满足 $fresult(i, t) \geq 0$ 止。

4 重建实例与结果检验

4.1 研究区概况

东北^③是我国森林主要分布区之一。在过去数百年里, 其森林覆被率发生很大变化, 特别是自 1860 年清廷实施“开禁”政策后, 大批移民涌入, 开垦土地, 森林植被遭到严重破坏。因此, 对该地区历史时期, 特别是清中后期森林覆被的重建具有较好的代表性。

4.2 数据来源与处理

东北地区森林面积数据是采用叶瑜等订正的过去 300 年森林覆被变化数据^[34]。该数据是作者采用历史文献分析、原始潜在植被恢复和驱动力分析的方法进行重建, 其结果可较好地反映东北三省过去 300 年森林覆被的变迁过程 (表 1)。

在网格化重建过程中, 本文还引用了以下几种数据: ① 东北省域历史耕地面积采用叶瑜等依据历史文献订正和多源耕地数据校核获得的数据^[16]; ② 现代遥感土地利用数据采用全国 1 km 网格土地利用数据, 下载自地球系统科学数据共享网^④。该数据包含 1980s、1995 年、2000 年三期数据, 其解译正确率达 95% 以上^[35]。其中, 现代耕地空间格局采用 1980s 这一期, 这是因为我国 20 世纪 80 年代耕地面积最多, 其耕地的空间分布状况可以较好代表我国现代耕地空间格局^[36]; ③ 潜在植被引自 Ramankutty 和 Foley (1999) 利用生态模型模拟的全球潜在植被数据^[13]; ④ 海拔高度数据采用全球 1 km 数字高程模型 DEM^⑤, 地面坡度可以运用 ArcGIS 软件从 DEM 数据中直接提取和校正, 气候生产潜力采用全国 1 km 网格气候生产潜力数据 (1951-1980 年), 下载自地球系统科学数据共享网。

从上述全球或全国空间数据中提取东北地区数据, 并对其进行重采样处理, 使其空间分辨率为 10 km×10 km, 且在网格尺度上一一对应; 投影均采用兰伯特正形圆锥投影。

4.3 结果与检验

把东北三省省域森林面积数据代入历史森林覆被网格化重建模型, 得到东北 1780 和 1940 年, 空间分辨率为 10 km×10 km 的森林覆被 (图 3)。

从图 3 知, 1780 年东北三省森林广布, 大部分地区森林覆被率较高, 这与历史记载是吻合的。如《朔方备乘》^⑥中记载“惟赖窝集 (茂密的森林) 之险, 以限戎马之足”; 《宁古

表 1 东三省 1780 和 1940 年
省域森林面积数据
(km²)

Tab. 1 Forestland area of Northeast China in 1780 and 1940 (km ²)		
省区	1780	1940
辽宁省	67946	12233
吉林省	118209	59863
黑龙江省	282362	163650

③ 包括黑龙江、吉林、辽宁三省; 清民时期该区政区多有变化, 为了便于对比与分析, 文中以现代东北三省行政界线内的区域为研究范围。

④ <http://www.geodata.cn/>

⑤ 美国地质调查局网站 <http://www.usgs.gov/>

⑥ [清] 何秋涛《朔方备乘》卷二十一《艮维窝集考》, 1858.

塔记略》^⑦中记载窝集“绵绵延延……不知纪极”；《柳边纪略》^⑧中提到宁古塔(约今黑龙江省牡丹江市一带):“车马横过不见天日者,三百余里”,“其中古木参天、排比联络,间不容尺……”;再如《绥化县志》^⑨描述绥化县(今黑龙江省绥化市):“在未开辟时代,天然森林弥漫皆是,如松、榆、柞、柳、桦、椴等,生长颇皆茂盛,是故有北团林子之名称”。从清廷实施“开禁”政策,及至建国初的近百年时间里,小兴安岭和长白山地区的森林遭受严重的破

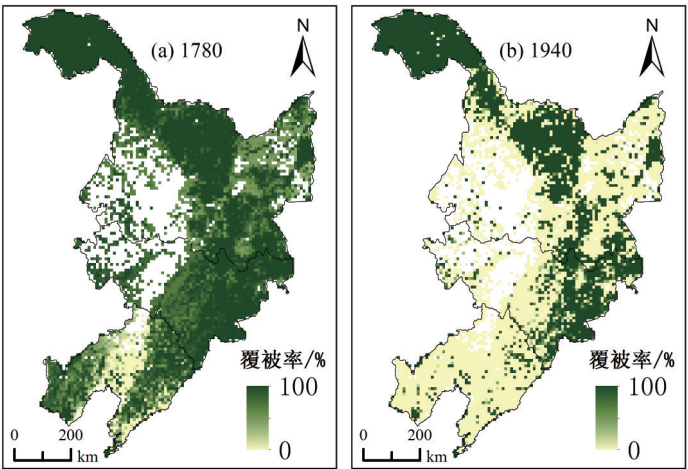


图3 网格化重建东北1780和1940年森林覆被
Fig. 3 Gridding reconstruction of forest cover of Northeast China in 1780 and 1940

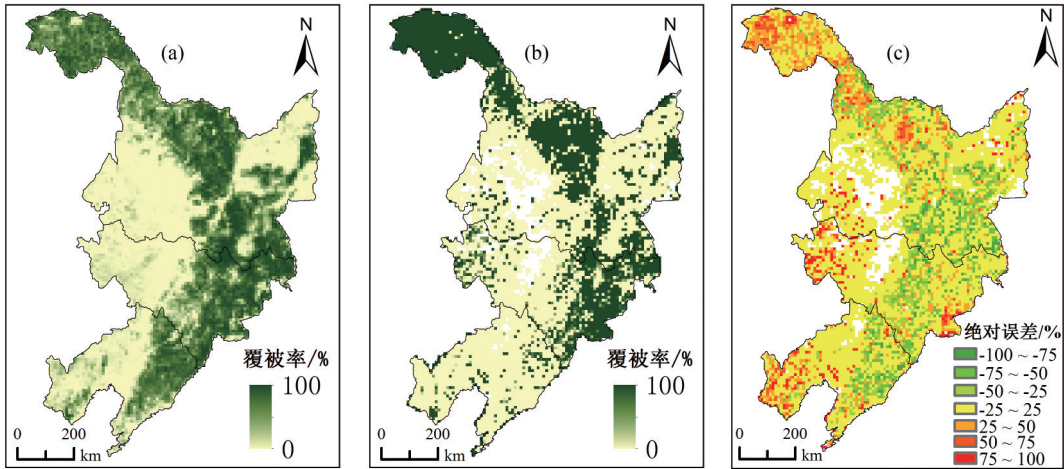


图4 遥感获取的(a)与网格化重建的(b)2000年森林覆被及其绝对误差(c)

Fig. 4 Satellite-based forest cover (a) and reconstructed forest cover (b) in 2000 and their absolute error (c)

坏,分布范围迅速缩小,这与图3显示的1940年森林分布的整体格局也是基本相符的。

虽然重建结果可较好地反映森林变迁的总体格局,但为进一步说明重建方法的合理性及重建误差,本文尝试进行定量检验。由于缺乏可资对比的历史图件和资料,无法直接予以定量分析和检验。本文拟采用间接检验方法,首先,利用本文设计的网格化重建模型重建东北三省2000年森林覆被(用到的省域森林面积数据为遥感有林地数据聚合得到),将得到的结果 $D_G(i)$ 与遥感获取的2000年森林覆被 $D_R(i)$ 进行对比,以间接检验重建方法的合理性。其次,以1780年为例,把网格化重建结果以现今东北县域政区为单元进行聚合,将聚合得到的结果与叶瑜^[34]等依据历史文献等订正的县域数据进行对比,来评估重建结果在县域尺度上的准确性。

选自全国1 km土地利用数据的东北三省遥感2000年森林覆被 $D_R(i)$ ^[35],如图4(a)所示;网格化重建2000年森林覆被 $D_G(i)$,如图4(b)所示; $D_G(i)$ 与 $D_R(i)$ 空间做差,即模型

⑦ [清] 吴振臣《宁古塔纪略》,引自:《小方壶斋舆地丛抄》,第一帖。

⑧ [清] 杨宾《柳边纪略》卷一。

⑨ [民国]《绥化县志》卷八《实业志·林业》,1921。

重建结果的绝对误差 $E(i)$, 结果如图4(c)所示。以遥感森林覆被 $D_R(i)$ 为标准, 来分析检验 $D_G(i)$ 与 $D_R(i)$ 是否存在显著差异。由于 $D_G(i)$ 与 $D_R(i)$ 在10 km网格尺度上是一一对应的关系, 因此对两者的绝对误差 $E(i)$ 进行单样本t检验的方法可判断两者之间是否存在显著性差异。

对 $E(i)$ 进行单样本t检验, 需要 $E(i)$ 服从正态分布。从绝对误差的直方图(图5)可以看出, $E(i)$ 基本服从正态分布。此外, 单样本t检验是非常稳健的统计方法, 本次检验的样本量 N 较大, 为5835个网格, 且数据分布不是强烈偏态, 可以认为单样本t检验适用^[37]。

在确认单样本t检验的适用性后, 对绝对误差 $E(i)$ 进行单样本t检验, 检验的零假设是: 绝对误差 $E(i)$ 的均值为0, $D_G(i)$ 与 $D_R(i)$ 不存在显著差异。检验结果如表2所示。T统计量为1.55, 其相伴概率(双尾)为0.12, 大于显著性水平0.05, 因此不能拒绝零假设, 即可以认为 $D_G(i)$ 与 $D_R(i)$ 不存在显著差异, 即本文设计网格化重建方法具有较好的合理性和可行性。

为进一步评估重建结果的准确性, 并鉴于东北县域尺度上的历史森林覆被率是部分可得的, 本文以1780年为例, 评估重建结果在县域尺度上的准确性。将网格化重建东北1780年森林覆被以县域政区为单元进行空间聚合, 以叶氏县域森林面积数据为基准, 求其相对误差(图6), 并对其进行分区间统计如表3所示。需要说明的是, 部分县级政区的相对误差因叶氏数据中森林覆被率为0而无法计算(图中无值区), 不过这些县基本都分布在松嫩平原等非林区, 基本不影响评估结果。

从图6中可以看出, 网格化重建东北1780年森林覆被在县域尺度上的相对误差整体较小。小兴安岭和长白山等主要林区的重建结果在县域尺度上的相对误差多在-10%~10%之间, 部分在-30%~-10%之间; 三江平原地区、辽西低山丘陵区重建数据偏高, 县域尺度的相对误差多大于50%, 辽东中山丘陵区则偏低, 县域尺度相对误差多小于-50%。从分级统计结果(表3)也可以看出, 相对误差在-10%~10%之间的县级政区有48个, 占县级政区总数(不含无值区, 下同)的36.09%; -30%~-10%和10%~30%之间的分别有42个和9个, 占比分别为31.58%和6.77%。误差在-30%~30%之间的县级政区共有99个, 占到县级政区总数的74.44%。相对误差绝对值大于50%(<-50%和>50%)的县

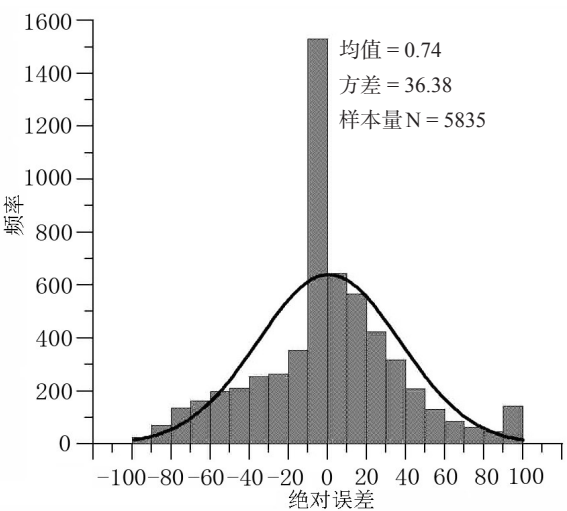


图5 绝对误差 $E(i)$ 直方图

Fig. 5 Histogram of the distribution of absolute error $E(i)$

表2 遥感数据与网格化重建数据的绝对误差 $E(i)$ 的单一样本t检验

Tab. 2 One sample t-test of absolute error $E(i)$ of satellite-based data and reconstructed data					
检验均值 = 0					
T统计量	自由度	双尾检验概率	均值	95% 置信区间	
				下限	上限
1.55	5834	0.12	0.74	-0.20	1.67

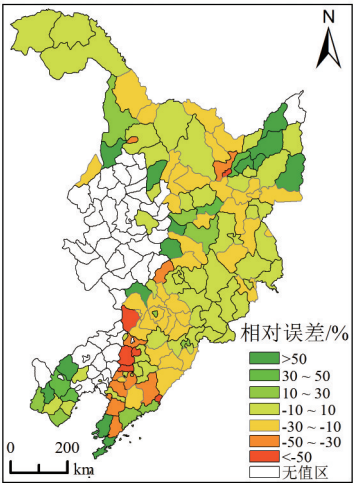


图6 网格化重建东北1780年森林覆被县域尺度相对误差

Fig. 6 The relative error of gridding reconstruction forest cover in 1780 of Northeast China at county level

表3 网格化重建东北1780年森林覆被县域尺度相对误差分区间统计

Tab. 3 Statistics of relative error of gridding reconstruction forest cover in 1780 of Northeast China at county level

相对误差 (%)	<-50	-50 ~ -30	-30 ~ -10	-10 ~ 10	10 ~ 30	30 ~ 50	>50	无值区
县的数量 (个)	6	10	42	48	9	4	14	51
占比 (%)	4.51	7.52	31.58	36.09	6.77	3.01	10.53	--

级政区共有20个，占比为15.04%。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文在确定土地垦殖前森林植被可能分布范围的基础上，通过评估省域尺度上土地的宜垦性，构建了历史森林覆被网格化重建模型，并重建了我国东北三省1780年和1940年网格化的森林覆被。结果显示，在省域土地宜垦性评估的基础上，从森林植被分布范围中扣除耕地后，依据土地宜垦性较高的地方森林优先被破坏、宜垦性较低的地方森林后被破坏的原则，可较好地历史时期省域森林面积数据分配至10 km×10 km 网格上，实现历史森林空间格局网格化重建。模型重建结果与遥感数据绝对误差的单一样本t检验结果是T统计量为1.55，其相伴概率(双尾)为0.12，大于显著性水平0.05，表明两者间不存在显著性差异，网格化重建方法具有较好的合理性和可行性。1780年重建结果在县域尺度上的重建误差较小，相对误差在-30%~30%之间的县域政区有99个，占县级政区总数(不含无值区)的74.44%。

5.2 讨论

从数量上，模型网格化重建结果与遥感数据的差异虽不具有统计意义，但从图4森林的空间分布可以看出，图4(b)模型重建数据与图4(a)遥感数据相比，整体上虽较为一致，但后者森林的空间分布更趋均匀。模型重建数据中的森林更多地分布在海拔较高地区，如黑龙江省北部，小兴安岭的山脊和长白山的主峰周边以及辽西低山丘陵地区；而在山麓与平原的过渡地带，模型重建数据森林的分布范围较遥感数据小，如长白山东北麓与三江平原过渡地区，辽东中山丘陵区等。图4(c)绝对误差的分布以及图6县域尺度上的相对误差的空间分布也表明模型把更多的森林分配到了高海拔地区。这可能是由于本文设计的网格化重建模型仅以土地宜垦性为权重分配历史省域森林面积，而没有考虑到人口增长、开矿、交通(如中东铁路)及战乱等人文社会因子，以至地形因子的权重偏高。由于历史时期人口、经济等人文社会因子数据较为匮乏，且对森林分布的影响也颇为复杂，因此目前尚难于一并考虑，有待今后进一步深入探讨。

致谢：感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院叶瑜副教授提供东北县域森林面积数据！

参考文献 (References)

[1] Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B et al. The importance of land-cover change in simulating future climates. Science, 2005, 310(5754): 1674-1678.

[2] Ye Duzheng, Fu Congbin. Some advances in global change science study. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences. 2004, 19(5): 336-341. [叶笃正, 符淙斌. 全球变化科学领域的若干研究进展. 中国科学院院刊, 2004, 19(5): 336-341.]

[3] Pielke R A. Land use and climate change. Science, 2005, 310(5754): 1625-1626.

[4] Thompson R S. BIOME 300: Understanding the impacts of human activities on land cover over the past 300 years. IGBP Newsletter, 2000, (43): 2-3.

[5] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology, 2003, 55(2): 378-390.

[6] Voldoire A, Eickhout B, Schaeffer M et al. Climate simulation of the twenty-first century with interactive land-use

- changes. *Climate Dynamics*, 2007, 29(2): 177-193.
- [7] Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. A numerical simulation on impact of historical land-use changes on regional climate in China since 1700. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(3): 257-270. [李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟. *气象学报*, 2006, 64(3): 257-270.]
- [8] Susan S, Qin Dahe, Manning M. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Vol.4.* Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Miao Lijuan, Zhu Feng, He Bin et al. Synthesis of China's land use in the past 300 years. *Global and Planetary Change*, 2013, 100(1): 224-233.
- [10] Ge Quansheng, Dai Junhu, He Fanneng et al. Spatiotemporal dynamics of reclamation and cultivation and its driving factors in parts of China during the last three centuries. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(7): 605-613.
- [11] Ye Yu, Fang Xiuqi. Spatial pattern of land cover changes across Northeast China over the past 300 years. *Journal of Historical Geography*, 2011, 37(4): 408-417.
- [12] He Fanneng, Ge Quansheng, Dai Junhu et al. Forest change of China in recent 300 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 30-40. [何凡能, 葛全胜, 戴君虎 等. 近300年来中国森林的变迁. *地理学报*, 2007, 62(1): 30-40.]
- [13] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 997-1027.
- [14] Klein Goldewijk K. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 417-433.
- [15] Klein Goldewijk K, Beusen A, Van Drecht G et al. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12000 years. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 73-86.
- [16] Kaplan J O, Krumhardt K M, Zimmermann N. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27/28): 3016-3034.
- [17] Steyaert L T, Knox R G. Reconstructed historical land cover and biophysical parameters for studies of land-atmosphere interactions within the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D02101): 1-27.
- [18] Liu Mingliang, Tian Hanqin. China's land cover and land use change from 1700 to 2005: Estimations from high-resolution satellite data and historical archives. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(GB3003): 1-18.
- [19] Ye Yu, Fang Xiuqi, Ren Yuyu et al. Cropland cover change in Northeast China during the past 300 years. *Science in China: Series D*, 2009, 39(3): 340-350. [叶瑜, 方修琦, 任玉玉 等. 东北地区过去300年耕地覆盖变化. *中国科学D辑*, 2009, 39(3): 340-350.]
- [20] He Fanneng, Li Shicheng, Zhang Xuezheng. Reconstruction of cropland area and spatial distribution in the mid-Northern Song Dynasty. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1531-1539. [何凡能, 李士成, 张学珍. 北宋中期耕地面积及其空间分布格局重建. *地理学报*, 2011, 66(11): 1531-1539.]
- [21] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in land cover: North American croplands from 1850 to 1992. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, 8(5): 381-396.
- [22] Leite C C, Costa M H, De Lima C A et al. Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940-1995). *Journal of Land Use Science*, 2011, 6(1): 33-52.
- [23] Waisanen P J and Bliss N B. Changes in population and agricultural land in conterminous United States counties, 1790 to 1997. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1-19.
- [24] Ling Daxie. Changes of forest resources in China. *Agricultural History of China*, 1983, (2): 26-36. [凌大燮. 我国森林资源的变迁. *中国农史*, 1983, (2): 26-36.]
- [25] Zhao Gang. *China Environmental Change*. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 1-10. [赵冈. 中国历史上生态环境之变迁. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 1-10.]
- [26] Ma Zhongliang, Song Chaoshu, Zhang Qinghua et al. *Changes in China's Forests*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997: 1-142. [马忠良, 宋朝枢, 张清华等. 中国森林的变迁. 北京: 中国林业出版社, 1997: 1-142.]
- [27] Fan Baomin, Dong Yuan. Discussion on China's ancient forest coverage. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(4): 60-65. [樊宝敏, 董源. 中国历代森林覆盖率率的探讨. *北京林业大学学报*, 2001, 23(4): 60-65.]
- [28] Wu Cunhao. *Chinese Agricultural History*. Beijing: Police Education Press, 1996: 1-1295. [吴存浩. 中国农业史. 北京: 警官教育出版社, 1996: 1-1295.]
- [29] Han Maoli. *Historical Agricultural Geography of China*. Beijing: Peking University Press, 2012: 13-47. [韩茂莉. 中国历史农业地理. 北京: 北京大学出版社, 2012: 13-47.]
- [30] Wang Yuhu. *Chinese historical land use*//Wang Guangyang, Wang Jingyang, Wang Pan et al. *Proceedings of Wang Yuhu*. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 310-342. [王毓瑚. 我国历史上的土地利用//王广阳, 王京阳, 王盼 等. 王毓瑚论文集. 北京: 中国农业出版社, 2005: 310-342.]

- [31] Economic Geography Research Group of Institute of Geography in Chinese Academy of Sciences. General Introduction to Chinese Agricultural Geography. Beijing: Science Press, 1980: 1-454. [中国科学院地理研究所经济地理研究室. 中国农业地理总论. 北京: 科学出版社, 1980: 1-454.]
- [32] Sun Han, Shi Yulin. China Agricultural Land Use. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 2003: 3-84. [孙颌, 石玉林. 中国农业土地利用. 南京: 江苏科学技术出版社, 2003: 3-84.]
- [33] Chen Mingrong, Long Siyu. Researches on Chinese climatic production potential zoning. Natural Resources, 1984, (3): 71-79. [陈明荣, 龙斯玉. 中国气候生产潜力区划的探讨. 自然资源, 1984, (3): 72-79.]
- [34] Ye Yu, Fang Xiuqi, Zhang Xuezheng et al. Coverage changes of forestland and grassland in Northeastern China during the past 300 years. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 137-144. [叶瑜, 方修琦, 张学珍 等. 过去 300 年东北地区林地和草地覆盖变化. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 137-144.]
- [35] Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhuang Dafang et al. Spatial-temporal characteristics and driving forces of wood land resource changes in China. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(1): 41-46. [徐新良, 刘纪远, 庄大方 等. 中国林地资源时空动态特征及驱动力分析. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 41-46.]
- [36] Feng Zhiming, Liu Baoqin, Yang Yanzhao. A study of the changing trend of Chinese cultivated land amount and data reconstructing: 1949-2003. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 35-43. [封志明, 刘宝勤, 杨艳昭. 中国耕地资源数量变化的趋势分析与数据重建: 1949-2003. 自然资源学报, 2005, 20(1): 35-43.]
- [37] Zhang Wentong, Yan Jie. Essentials of SPSS Statistics Analysis. Beijing: Higher Education Press, 2004: 244-256. [张文彤, 闫洁. SPSS 统计分析基础教程. 北京: 高等教育出版社, 2004: 244-256.]

An approach of spatially-explicit reconstruction of historical forest in China: A case study in Northeast China

LI Shicheng^{1,2}, HE Fanneng¹, ZHANG Xuezheng¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To research the climatic and ecological effects of historical land cover change, it is necessary to create historical land cover datasets with explicit spatial information. Using potential vegetation and satellite-based land use data, we determined the possible distribution extent of forest cover before reclamation. Then, some factors affecting land reclamation were selected to evaluate land suitability value of China for cultivation and then they were integrated into a model. Furthermore, historical forest gridding reconstruction model (the size of grid cell is 10 km by 10 km) was developed according to the land suitability value. As a case study, we reconstructed spatially explicit forest cover of 1780 and 1940 in Northeast China using this approach. The results demonstrated that the forest gridding reconstruction model we created can transform provincial forest area into spatially explicit data well. To test the model's rationality, we compared satellite-based forest cover and reconstructed forest cover of 2000. And the one sample t-test of the absolute error of them showed that the two-tailed significance was 0.12, larger than the significant level 0.05, suggesting that there was no significant difference between them and the gridding reconstruction method we designed was rational. The relative errors at county scale of forest cover reconstruction in 1780 of Northeast China were calculated. And the number of counties, whose relative error ranged from -30% ~ 30%, is 99, accounting for 74.44% of the totals (data missing counties are discharged).

Key words: forest cover; gridding approach; Northeast China; historical period