

论文

中国东北地区过去 300 年耕地开垦导致的碳收支

李蓓蓓^{①②}, 方修琦^{②③*}, 叶瑜^②, 张学珍^③

① 南京信息工程大学语言文化学院, 南京 210044;

② 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: xfang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2013-09-05; 接受日期: 2014-02-11; 网络版发表日期: 2014-07-24

全球变化研究国家重大科学研究计划(编号: 2010CB950103)、国家自然科学基金项目(批准号: 40901099)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 2009SAP-2)和南京信息工程大学高校科研启动费(编号: S8112090001)资助

摘要 准确估算土地利用/覆盖变化导致的碳收支, 有助于准确理解人类活动的环境影响, 评估土地利用/覆盖变化对碳循环和区域气候变化的影响, 为辨识历史碳排放责任提供科学参考. 采用基于历史文献建立的较高空间分辨率的历史土地覆盖数据, 利用簿记模型对东北地区过去 300 年来耕地开垦导致的碳排放量进行了估算. 主要结论如下: (1) 东北地区经历了大规模的移民和土地开发, 全境约 26%的土地被开垦为耕地, 其中 38%的草地被开垦, 20%的森林和灌丛被开垦. (2) 1683~1980年开垦导致的碳排放量高值和低值分别为 2.55 和 1.06 Pg C, 适中的估计值为 1.45 Pg C, 其中土壤碳库是较大的排放源, 植被碳库排放量占总碳排放量的份额不到 1/3. (3) 黑龙江、吉林和辽宁 3 省耕地开垦的碳排放量差异显著, 黑龙江省碳排放量最大, 其次是吉林省, 辽宁省碳排放量最小. (4) 森林开垦的碳排放量相对较高, 其次是草地, 沼泽和灌丛的碳排放量相对较小. 数据精度分析表明, 采用较高空间分辨率的耕地数据, 可以进行碳收支分县估算, 提高数据精度. 与前人研究结果相比, 本研究碳排放估算结果较低, 主要原因是土地利用数据精度的提高和生态系统分类的细化.

关键词耕地开垦
碳收支
过去 300 年
中国东北

在全球变化研究框架下, 人类活动因素对陆地生态系统的影响备受关注(Bondre 等, 2012). 土地利用/覆盖变化(LUCC)是对地球系统影响最大的人类活动之一, 具有全球范围的环境效应(Turner 等, 1997; Lamnin 等, 2001). 其中, 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳储量和气候变化的影响, 是土地利用/覆盖变化环境效应研究的关注重点(IPCC, 2007; Boyle 等, 2011; 陆大道, 2011).

人类土地利用活动对陆地生态系统碳储量的影

响远远超过了自然变化影响的速率和程度. 普遍认为土地利用行为, 特别是农业开垦和森林砍伐, 会导致陆地生态系统向大气释放大量的碳, 是工业革命以来甚至全新世大气 CO₂ 浓度不断升高的主要原因之一(Houghton, 2003; Strassmann 等, 2008; Ruddiman 和 Ellis, 2009). 土地利用活动通过改变地表植被覆盖, 直接造成植被和土壤碳库的变化, 这种影响会持续一定时间, 碳库损失量和随时间的变化与土地利用类型有关. 此外, 人类活动造成的大气组分和气候变

中文引用格式: 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 2014. 中国东北地区过去 300 年耕地开垦导致的碳收支. 中国科学: 地球科学, 44: 1987-1996

英文引用格式: Li B B, Fang X Q, Ye Y, et al. 2014. Carbon emissions induced by cropland expansion in Northeast China during the past 300 years. Science China: Earth Sciences, 57: 2259-2268, doi: 10.1007/s11430-014-4894-4

化, 也对陆地生态系统有机碳的蓄积量有影响, 比如 CO₂ 施肥效应, 可能提高了现代森林的碳蓄积量 (Foley 等, 2003). 精确评估土地利用变化导致的生态系统碳收支, 是陆地生态系统碳循环研究的重要一环, 将有助于减少陆地生态系统碳储量估算的不确定性 (Houghton, 2001; Pan 等, 2011).

土地利用变化导致的碳收支估算中, 其不确定性的一个主要来源是土地利用数据. 土地利用数据的准确性和空间精度直接影响到模型模拟的结果. 如果土地利用数据本身的时间过程和空间分布存在显著误差, 必然会影响使用这些数据的模式输出结果. 在历史土地利用变化碳收支研究方面, Houghton 等的研究在国际上影响较大. 应用 Houghton 等 (1983) 开发的簿记模型, 葛全胜等 (2008a) 使用基于历史文献重建的过去土地利用数据, 估算了中国土地利用变化引起的碳排放, 总计达 4.50~9.54 Pg C, 最适估算为 6.18 Pg C, 远小于 Houghton 等 (2003) 的 17.1~33.4 Pg C 估算. 两者估算结果显著差异的一个重要原因是土地利用数据的差别.

目前, 已经建立了多个具有明确的地理属性的全球土地利用数据集, 作为模型模拟的基础数据, 已经得到广泛应用. 其中 2 个代表性的全球数据集分别是美国威斯康星大学全球环境和可持续发展中心 (SAGE) 的 Ramankutty 和 Foley (1999) 建立的“全球土地利用数据集” (Global Land Use Database, 简称为 SAGE 数据集) 和荷兰环境评价局 (Netherlands Environmental Assessment Agency) 建立的“全球历史环境数据集” (Historical Database of the Global Environment, 简称为 HYDE 数据集) (Goldewijk, 2001; Goldewijk 等, 2011). 但这些数据的精度还有待充分验证, 在中国地区对全球数据集区域重建精度的评估表明, 过去 300 年来 SAGE 数据集和 HYDE 数据集的区域重建结果与历史文献记录反映的土地利用变化过程存在显著差别 (李蓓蓓等, 2010; 何凡能等, 2012). 因此, 在区域碳收支估算或者区域气候变化模拟时, 需要注意土地利用数据带来的不确定性.

近 300 年来中国东北地区经历了剧烈的土地利用/土地覆盖变化, 它与西南地区是这一时期耕地开发最为严重的地区. 叶瑜等 (2009) 利用清代史料、民国政府档案、日俄调查资料、新中国统计和调查数据, 采用历史数据订正和多源耕地数据关系模型校核, 重建了东北地区过去 300 年耕地数据 (Cropland data

of Northeast China, 简称 CNEC 数据), 它是东北地区目前具有史料支持的时空分辨率最高的区域数据. 采用 CNEC 数据估算东北地区过去 300 年来耕地开垦导致的碳收支, 有助于得到更加精确的碳排放量数据.

1 方法和数据

1.1 簿记模型

碳收支估算采用 Houghton 等 (1983) 建立的簿记模型. 该模型被认为是探究陆地生态系统与大气碳素交换从“摇篮”到“坟墓”全过程的方法, 已经被广泛应用于全球以及许多国家和地区, 模型得到普遍认可, 影响较大. 它的基本原理是逐年记录土地利用变化引起的陆地和大气之间的碳交换, 在计数模型的基础上, 设计了反映生态过程的干扰响应曲线, 使其兼具生态干扰过程的模拟. 簿记模型记录了陆地生态系统的地上植被碳库和地下土壤碳库的变化, 其核心是干扰响应曲线, 用以刻画人类活动引起的土地利用类型变化导致的生态系统碳吸收、固定和释放. 在描述土地利用活动导致的陆地生态系统碳收支时, 土地利用变化导致的碳排放量是指陆地向大气碳支出减去碳收入的部分, 即净排放量. 干扰响应曲线的制定主要依据两个变量, 分别是干扰 (或者恢复) 对有机碳储量的影响程度和干扰 (或恢复) 各过程所需时间. 利用干扰响应曲线计算生态系统被干扰后碳储量的年变化. 模型需要输入的基本数据分别是土地利用变化率和碳密度数据. 模型中的土地利用变化概念, 是指人类活动对土地覆盖的直接干扰, 仅考虑土地利用类型的变化, 并未对土地利用类型的渐变、环境变化对土地利用类型及其碳储量的影响进行讨论.

1.2 土地利用变化率

土地利用数据主要采用了叶瑜等 (2009) 建立的 CNEC 数据. 它是一套定量的耕地面积和耕地垦殖率数据, 时间分辨率为 20~100 年, 空间分辨率为分县, 使用的时间断面包括 1683 年、1735 年、1780 年、1908 年、1931 年、1940 年、1950 年和 1980 年. 由于 1780 年至 1908 年没有详细的分县耕地数据, 加之其间 1860 年前后清政府对东北的政策由“封禁”转为“弛禁放垦” (Ye 等, 2012), 对该时段的耕地数据根据相邻

时段耕地增长速率进行了分段插值, 增补了 1860 年, 1880 年和 1990 年三个时间断面的分县耕地面积数据.

开垦前的土地覆盖主要依据张学珍等(2011)重建的 17 世纪后期东北地区植被分布, 采用了其收集的历史植被记录. 该记录来源主要有地方志、政府档案、古代的私人笔记、游记和现代学者整理出版的历史文献汇编, 植被类型分为林地、草地和沼泽三类, 对历史文献中的植被信息进行了空间定位, 能够表征县域范围的植被类型. 现代东北地区植被分布中灌丛植被占有相当比例, 此类植被开垦与森林开垦的碳损失量差别较大, 需要将灌丛作为区域碳收支估算的土地覆盖类型. 利用历史植被记录和其他图件, 包括《中国资源与环境数据库(1:400 万)数据》的中国植被、中国土壤数据, 中国 1 km DEM 数据, 以县为研究单元, 按照相似生境、植被连续分布的原则, 对中国植被图中的农业植被进行了重新归类, 重建了东北地区分县的历史自然植被覆盖数据(图 1), 以应用于土地利用变化率计算和植被碳密度计算的基础底图. 历史自然植被覆盖数据中, 灌丛和森林面积给出了高、中、低三种重建情景, 其中高值情境中认为灌丛覆盖是森林被开垦或者受到自然干扰后次生植被, 将现代灌丛历史重建后恢复为相应森林群落; 中值情景对记录为窝集及有其他森林历史记录的县, 灌丛历史重建时赋值为森林群落, 其余的灌丛植被斑块不变; 低值情景则保持了现代植被图中的灌丛植被斑块. 相应的土地利用变化率和植被碳密

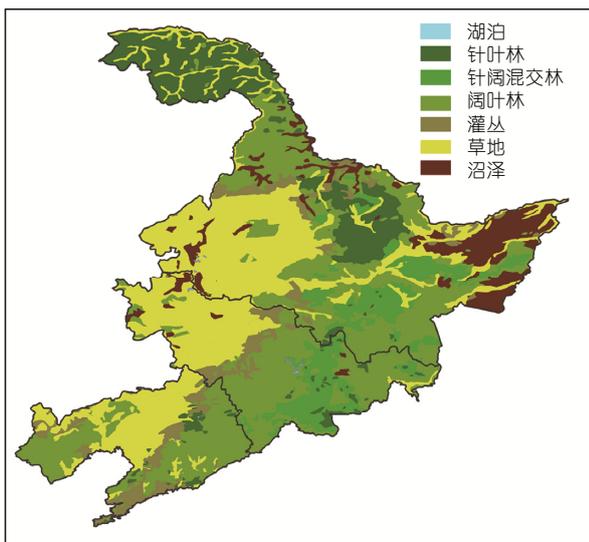


图 1 东北地区 17 世纪末自然植被分布(中值情景)

度估算时均有高、中、低三种估值情景, 以给出土地利用变化导致的碳排放量估值范围和适中估算值.

东北地区的土地利用类型包括林地、草地、荒地(对应自然植被中的矮林灌丛)、沼泽和农田五种类型. 土地利用变化计算的两条基本假设: (1) 除了农田外的其余四种土地利用类型, 是未受人类活动干扰的自然状态, 人类开垦的田地来自上述四种土地利用类型. (2) 历史开垦范围在现代植被图中农业植被分布范围内. 历史耕地面积从林地、草地、荒地、沼泽四种土地利用中扣除, 以历史时期被改造的林地、草地、荒地、沼泽的面积为权重分配当年耕地开垦的土地利用类型变化面积, 即各县用于计算的林地、草地、荒地、沼泽面积扣除了现代植被图中现存的林地、草地、荒地、沼泽面积. 其中, 东北地区的沼泽开垦与朝鲜人移入开发水田关系密切(衣保中, 2002), 因此依据吉林和黑龙江省的朝鲜移民记录, 沼泽在吉林和黑龙江省分别于 1910 年和 1880 年开始参与耕地面积分配计算.

1.3 碳密度数据来源与预处理

簿记模型将土地利用变化的影响分为植被和土壤两个碳库进行计算, 需要分别建立植被和土壤的碳密度数据.

植被碳密度数据主要参考了以下研究: 森林植被和农作物生物量采用葛全胜等(2008b)建立的中国植被分类体系下的 103 种植物群组生物量数据表. 草地数据采用朴世龙等(2004)中国草地植被总生物量数据. 灌丛生物量采用了胡会峰等(2006)的研究数据. 沼泽数据依据杨永兴等(2002)对三江平原两种典型沼泽生态系统的最大地上生物量计算. 植被碳密度是单位面积植被生物量乘以干物质中碳的比例(即含碳率)计算得来, 不同类型植被的干物质的碳元素含量是有差别的, 应采用不同的转换系数(马钦彦等, 2002). 植被生物量与碳储量转换时参考方精云等(2007)对中国陆地生态系统碳储量估算时使用的转换系数, 森林、灌丛使用 0.5 作为转换系数, 草地、沼泽和农作物转换率为 0.45.

土壤碳密度计算的基础数据取自《中国土种志》(全国土壤普查办公室, 1994)中东北 3 省的典型剖面数据(共 364 个). 土壤碳密度的计算公式(孙维侠等, 2004): $C = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i / \%) \times \rho_i \times T_i \times C_i \times 100$, 式中, C

为土壤剖面的有机碳密度(kg m^{-2}), θ_i 是第 i 层 $>2 \text{ mm}$ 砾石含量(体积百分含量), ρ_i 为第 i 层土壤容重(g cm^{-3}), T_i 为第 i 层土层厚度(cm), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(g kg^{-1}), 由有机质含量乘以 Bemmelen 换算系数(即 0.58 g C/g SOC)求得。

农业活动和砍伐森林等活动都会降低土壤有机碳蓄积量, 典型剖面描述中记录许多采样点受到人类活动干扰(王绍强和刘纪远, 2002; 张金波等, 2005), 因此, 需要对这部分剖面进行土壤退化修订, 根据不同研究对土壤碳蓄积量损失估计范围, 设计了高、中、低三种订正情景(表 1)。

2 结果分析

2.1 过去 300 年东北地区土地利用变化

在重建历史自然植被覆盖时, 根据森林和灌丛植被面积估计假设三种情景: 高值情景, 森林面积估值最大, 重建时将灌丛和萌生矮林类型全部归为相应森林类型; 中值情景将在森林分布区并且历史记录为森林的灌丛和萌生矮林归为森林, 认为天然灌丛分布范围主要是在森林-草地过渡带; 低值情景森林面积估值最小, 用现代植被图中的灌丛和萌生矮林植被分布恢复历史灌丛分布范围。使用上述三种情景计算过去 300 年东北地区土地利用率, 结果显示, 截止到 1980 年东北全境已有 26.4% 的区域被开垦, 耕地面积达到 21 万平方千米左右, 主要来自对林地和草地的开垦。

1683~1980 年, 累积林地开垦面积为 3.55~9.74 万 km^2 , 草地开垦面积为 9.34~9.47 万 km^2 , 沼泽开垦面积为 1.00~1.11 万 km^2 , 灌丛在 2.31~6.18 万 km^2 。高值情景的森林开垦面积最大, 占到总开垦面积的 48%, 超过草地的开垦面积; 低值情景的森林开垦面积最小, 仅占到开垦总面积的 18%, 灌丛开垦面积在三种情景中是最大的, 占到总开垦面积的 31%。中值情景中, 林地开垦面积占耕地总量的比重为 37%, 仅次于草地的 47%, 荒地和沼泽的开垦比重分别为

12% 和 5%。

林地、草地、沼泽和荒地 在 18~19 世纪被开垦的面积均十分有限, 20 世纪以来开垦规模迅速扩大, 仅在 1940~1950 年出现一段下降(图 2)。中值情景显示, 1860 年前, 林地开垦面积略大于草地, 是最大的垦殖利用类型, 约为同期草地开垦面积的 1.1~1.4 倍, 1860 年之后草地开垦面积增长速度超过森林, 至 1980 年其开垦面积增加了 10 倍多, 占此阶段各时期总开垦面积的比例为 44%~50%。这与东北开禁后, 对草甸草原植被广袤的松嫩平原开发有关。林地开垦面积在 1860~1980 年间增长也较为迅速, 1980 年林地开垦面积为 1860 年的 5.3 倍, 增加了 74208 km^2 。荒地开垦的增长也呈现先慢后快的变化趋势, 至 1980 年有 23969 km^2 的荒地开垦为耕地, 其中近 80% 是 1860 年以后开垦的。沼泽开垦面积形成较大规模是在 1908 年以来, 1910 年沼泽开垦面积为 224 km^2 , 在 1910~1931 年和 1950~1980 年间增加最为显著, 两段时间分别增加 2880 和 7512 km^2 。

从年均增长率来看(中值情景), 林地和荒地开垦在 17 世纪末至 18 世纪上半叶较高, 约为 1.2%, 主要集中在辽宁省, 草地开垦年均增长率在此期间一直保持较低, 为 0.1%~0.6%。18 世纪中期至 19 世纪中期, 开垦面积增长速率在各种土地利用类型中均呈现低值。1860 年以后, 林地、草地和荒地开垦年均增长率均有较大提高, 1860~1950 年草地开垦面积增长率为 2.4%~6.8%, 基本是增长率最高的耕地开垦类型, 林地开垦的年均增长率在 1.6%~2.9%, 荒地开垦速率波动较大, 在 1.3%~4.1%, 总体来看略低于林地开垦速率, 沼泽开垦增长速率最低。1950~1980 年间, 年均增长速率最大的是沼泽开垦(10.1%), 其次是林地开垦(1.7%), 草地和荒地开垦速率也较大(1.5%)。

2.2 东北地区耕地开垦导致的碳收支

1683~1980 年东北地区耕地开垦导致的碳排放量估算高值和低值分别为 2.55 和 1.06 Pg C , 适中的估计值为 1.45 Pg C 。从植被碳库和土壤碳库的排放量来看, 土壤碳库是最大的排放源, 占总碳排放量的

表 1 土地利用变化造成的土壤有机碳蓄积量的变化(%)

	高值情景(损失比例高)			中值情景(损失比例适中)			低值情景(损失比例低)		
	森林	草地	沼泽	森林	草地	沼泽	森林	草地	沼泽
开垦	-50	-40	-87	-30	-25	-82	-20	-20	-77

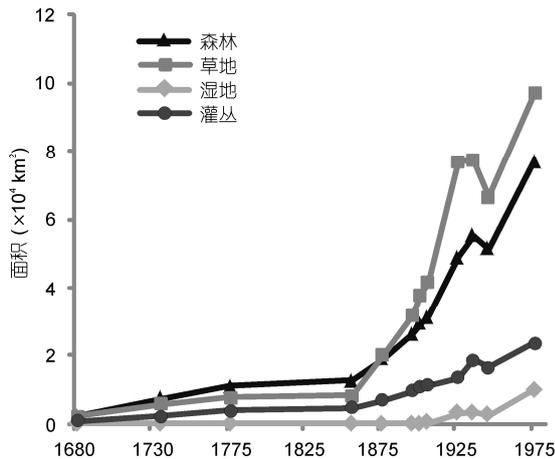


图2 不同土地覆盖类型的开垦面积变化(中值情景)

2/3 以上. 不同情景下, 植被和土壤碳库对土地开垦导致的碳排放量贡献有差异. 高值情景中, 土壤碳库的影响较小, 1683~1980 年开垦导致土壤向大气的碳释量为 1.90 Pg C, 占总排放量比例为 74%, 植被的碳排放量为 0.65 Pg C, 占总排放量的 26%. 低值情景中, 土壤碳库对总排放量的贡献最大, 碳排放量累计 0.82 Pg C, 占到总排放量的 77%, 植被碳库的排放量为 0.24 Pg C, 仅占 23%. 中值情景的植被和土壤碳排放量分别为 0.45 和 1.00 Pg C, 所占比例分别为 31% 和 69%, 土壤碳排放量比重在三种情景中最低. 这种差别与不同情景中对森林面积的重建、土壤碳密度、干扰响应曲线的土壤有机碳变化有关.

以 50 年为段, 分别统计了 1700~1749 年, 1750~1799 年, 1800~1849 年, 1850~1899 年, 1900~1949 年和 1950~1980 年的土地开垦的碳排放量. 三种情景均反映 20 世纪上半叶的开垦碳排放量最大, 其次 1850~1899 年和 1950~1980 年两段, 早期在 1700~1749 年碳排放量较大, 而 1750~1849 年的 100 年间排放量最低. 中值情景, 1700~1980 年土地开垦导致的碳排放总计 1438 Tg C, 1850 年之前的碳排放量为 112 Tg C, 仅占过去 300 年碳排放量的 8%, 其中 1700~1749 年的碳排放量为 54 Tg C, 1750~1799 年为 42 Tg C, 1800~1849 年最小仅为 15 Tg C. 结果表明东北地区在 18 世纪开垦已经初具规模, 并且导致了 96 Tg 碳排放量, 19 世纪前期受到封禁政策影响, 农田增长量下降, 碳排放量在过去 300 年中最低. 随着 19 世纪中后期清政府对东北封禁的逐步解除, 大批移民迁入, 掀起了东北地区遍及全境的开发序幕, 开垦导致

的碳排放量较前期大幅增加. 1850~1899 年、1900~1949 年和 1950~1980 年三段时间碳排放分别为 197, 758 和 371 Tg C, 20 世纪上半叶的土地里开垦导致的排放量最大.

根据开垦导致的碳排放量逐年变化特点(图 3), 主要考察了以下几个阶段: 1863~1780 年, 土地开垦年平均碳排放量在 0.64~1.73 Tg C/a; 1781~1860 年, 年均碳排放最低, 为 0.26~0.66 Tg C/a; 1861~1908 年年均排放量经历了快速增长和后期缓慢增长, 东北开禁以来耕地面积的大幅增加, 导致了排放量的快速增长, 后期年排放量增长速率放缓, 主要是来自长期分解库的累积碳排放量; 1909~1931 年的年排放量增长更为迅速, 平均碳排放量达 12.90~32.57 Tg C/a; 1932~1950 年东北地区受到战乱影响, 许多县出现耕地废弃现象, 导致年碳排放量快速下降, 平均年排放量为 11.83~24.69 Tg C/a; 1951~1980 年年排放量逐渐恢复, 该时段的平均年排放量为 8.92~21.31 Tg C/a, 未达到前一段的排放水平. 年排放量最高值出现在 1931 年, 三种情景下的当年碳排放量分别为 38.73, 20.21 和 15.18 Tg C. 三种情景在 1900~1950 年碳排放量变化曲线差别较大, 主要是年排放量高值的持续时间各不相同, 高值情景在 1923~1938 年的年排放量保持在 38~39 Tg C/a, 低值情景在 1923~1935 年保持一段排放量高值, 年排放量为 15~16 Tg C/a, 中值情景的排放高值阶段最长, 在 1923~1937 年, 年排放量为 20~21 Tg C/a.

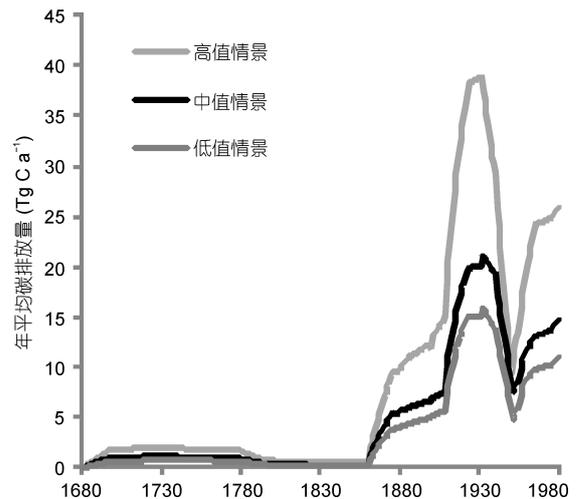


图3 不同情境下东北地区开垦导致的碳排放量

2.3 分省碳排放量

东北地区耕地开垦导致的碳排放量省际差异较大, 黑龙江省历史碳排放量最大, 其次是吉林省, 辽宁省最小(表 2). 1683~1980 年, 黑龙江省碳排放量总计达 0.67~1.55 Pg C, 吉林省的碳排放量为 0.24~0.61 Pg C, 辽宁省的碳排放量为 0.15~0.40 Pg C. 中值情景, 黑龙江省开垦引起的碳排放量为 0.89 Pg C, 吉林省为 0.34 Pg C, 辽宁省最小, 为 0.22 Pg C. 黑龙江省的碳排放量约为吉林省的 2.6 倍, 约为辽宁省的 4.1 倍.

东北 3 省的碳排放源均来自土壤碳库, 植被和土壤碳库对总排放量的贡献比例各省不同. 用土壤碳排放量除以植被碳排放量得到土壤和植被碳排放量比率, 在三种情景下, 辽宁省土壤和植被碳排放量比率最小, 黑龙江省的比率最大, 中值情景中, 辽宁省、吉林省和黑龙江省的土壤和植被碳排放量比率分别为 1.73, 2.30 和 2.38. 生态系统植被和土壤碳排放量与植被和土壤碳库大小有关, 此外还受到土地利用变化类型的影响.

以中值情景为例, 分析各省碳排放量随时间的变化特点(图 4). 按 50 年分段, 分省统计了 1700~1749 年, 1750~1799 年, 1800~1849 年, 1850~1899 年, 1900~1949 年和 1950~1980 年 6 个时间段的碳排放量. 18 世纪辽宁省的碳排放对区域总排放量贡献最大, 19 世纪吉林省的碳排放最大, 至 20 世纪黑龙江省的碳排放量超过辽宁和吉林省, 对区域总排放量贡献最大. 在 1700~1749 年, 辽宁省开垦导致的碳排放累计 0.037 Pg C, 此后的 3 个时间段(1750~1799 年, 1800~1849 年, 1850~1899 年)的碳排放量为 0.006~0.027 Pg C, 均小于第 1 个时间段, 20 世纪以来辽宁省的碳排放量才超过第 1 时段, 并持续增长. 吉林省的碳排放量在 18~19 世纪是波动增加的, 1750~1799 年和 1850~1899 年 2 个时段的碳排放量相对较高, 分别为 0.015 和 0.090 Pg C, 而 1700~1749 年和 1800~1849

年的碳排放量仅为 0.007 和 0.008 Pg C. 黑龙江省的碳排放量在前 3 个时段即 1850 年以前, 开垦导致的排放量均低于 0.01 Pg C, 1850~1899 年碳排放量略小于吉林省, 为 0.08 Pg C, 20 世纪以来其排放量快速增加, 甚至超过了吉林省和辽宁省排放量之和. 各省对总排放量贡献大小随时间的变化, 与历史农垦区由南向北逐渐扩张有关. 18 世纪, 东北 3 省区域开垦导致的碳排放量绝大部分来自辽宁省, 此时受到封禁政策影响, 耕地开垦的重心在辽宁省; 19 世纪中后期东北开禁以后, 汉民越过柳条边, 首先进入吉林省中部进行农业开垦, 吉林省对区域排放量贡献最大; 20 世纪以来, 黑龙江省成为逐渐成为垦殖重心, 使其成为东北 3 省最大的排放省份.

2.4 不同生态系统开垦导致的碳排放量

东北地区大部分地处温带湿润-半湿润季风区, 自然植被主要类型包括森林、矮林和灌丛、草地和沼泽, 相应的生态系统类型为温带森林、温带灌丛、温带草原和温带沼泽. 东北地区近 300 年的耕地开发活动对上述 4 种生态系统分别带来了不同程度的影响, 森林生态系统开垦的碳排放量相对较高, 其次是草地生态系统, 沼泽和灌丛生态系统的碳排放量相对较小(表 3). 中值情景中, 森林和灌丛生态系统排放量之和占到总排放量的 60%, 可见东北历史上毁林开荒是最大的碳排放源. 另外约 40%的碳排放量来自草地和沼泽生态系统, 其中沼泽的排放量占到 13%.

不同生态系统类型的植被和土壤碳库的碳排放量有所差异. 森林植被碳储量远高于其他生态系统, 开垦对植被碳库的影响会导致大量碳排放, 并且森林植被的分解周期较长, 对碳排放具有长期影响. 森林生态系统土壤和植被碳排放量比率在高中低三个情景中分别为 1.75, 0.82 和 0.65. 灌丛生态系统开垦的植被碳排放量小于土壤碳排放量, 低值情景和中值情景中土壤和植被碳排放量比率分别达 8.31 和 9.52. 草地和沼泽的植被碳密度与农作物的碳密度较

表 2 东北 3 省 1683~1980 年开垦导致的碳排放量(Pg)

	高值情景			低值情景			中值情景		
	植被	土壤	小计	植被	土壤	小计	植被	土壤	小计
辽宁	0.1256	0.2739	0.3995	0.0432	0.1034	0.1466	0.0799	0.1381	0.2180
吉林	0.1344	0.4725	0.6069	0.0522	0.1876	0.2398	0.1037	0.2384	0.3421
黑龙江	0.3936	1.1524	1.5460	0.1434	0.5315	0.6749	0.2628	0.6256	0.8883

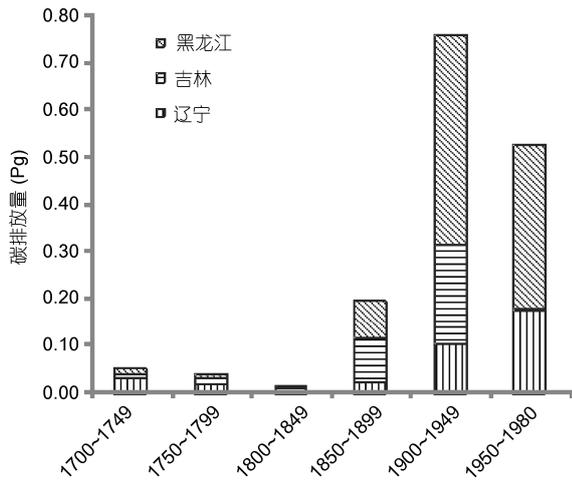


图4 辽宁省、吉林省和黑龙江省开垦导致的碳排放(中值情景)

为接近, 开垦对生态系统植被有机碳储量的影响较小, 其绝大部分碳排放量来自土壤碳库. 以中值情景为例, 草地和沼泽植被的碳蓄积量分别为 0.0178 和 0.0008 Pg C, 开垦导致的土壤碳排放量分别为 0.38 和 0.10 Pg C.

按照 50 年分段来看, 以中值情景为例, 森林生态系统开垦导致的碳排放量在各时间均是最大的(图 5), 1949 年以前草地生态系统开垦的碳排放量仅次于森林, 其次是灌丛; 1950~1980 年沼泽生态系统开垦引起的碳排放量增长显著, 而草地和灌丛生态系统的排放量下降, 沼泽开垦成为仅次于森林开垦的第二大排放源. 四种生态系统开垦导致的年碳排放量变化曲线与区域总碳排放量的变化阶段基本一致. 森林生态系统开垦的年排放量在过去 300 年均高于其他生态系统. 草地生态系统的年碳排放量仅次于森林生态系统, 1860~1940 年其年排放量与森林生态系统接近, 主要是草地开垦面积超过了同期的森林开垦. 森林生态系统年碳排放量的峰值年份在 1940 年, 达到 10.11 Tg C/a. 草地生态系统的峰值年份在 1932 年, 年碳排放量为 7.87 Tg C/a. 灌丛生态系统的

年碳排放量变化差异最小, 峰值年份 1941 年的碳排放量为 1.92 Tg C/a. 沼泽生态系统开垦的碳排放量增长发生在 1908 年以来, 1932~1950 年呈下降趋势, 1951 年排放量快速增长, 超过了草地生态系统的年排放量, 年排放量的最大值为 4.49 Tg C/a.

3 讨论与结论

碳收支估算输入的土地利用数据是 CNEC 数据(叶瑜等, 2009), 该数据达到县级空间分辨率, 较省级耕地数据能够反映更多土地利用变化信息. 在省级单元上耕地面积整体表现为增长, 而县级尺度上各县耕地面积即有可能增加, 也有可能减少. 辽宁和黑龙江省在 1735 年以后部分县出现耕地面积下降, 吉林省在 1780 年也出现耕地面积下降的县. 通过核查了耕地减少的县在该时段的行政建制变化, 对新设县而导致耕地面积下降的县做了调整. 核查后的数据显示, 1735 年以来东北地区各时段均有一定比例的县耕地面积呈现下降, 既有新增开垦也有弃耕. 为了分析使用分县数据对区域碳排放量计算是否有影响, 采用相同模型参数, 输入按省统计的耕地数据, 重新计算了分省土地开垦的碳排放量(以下称为分省数据; 使用分县数据计算土地开垦的碳排放量, 以下称为分县数据), 作为实验对比. 1700~1980 年, 分省数据碳排放量累计 1.59 Pg C, 分县数据为 1.44 Pg C, 分省数据较分县数据高出 11%, 其中植被碳排放量偏高 29%, 土壤碳排放量高出约 3%(图 6). 分省数据对森林开垦的和沼泽碳排放量估计偏高, 较分县数据分别高出 32%和 16%, 对草地和灌丛的碳排放量估计偏低, 较分县数据分别低估 25%和 16%. 从年碳排放量的变化来看, 分省数据的变化要大于分县数据, 尤其是植被碳排放对开垦和弃耕的响应更加显著. 总之, 使用分省数据比使用分县数据所得到碳排放量要高, 分省数据在具体时间过程变化中放大了土地利用变化对碳排放量的影响, 因此提高土地利

表 3 东北 3 省 4 种生态系统开垦导致的碳排放(Pg)

	温带森林		温带草原		温带沼泽		温带灌丛	
	植被	土壤	植被	土壤	植被	土壤	植被	土壤
高值情景	0.6369	1.1152	0.0141	0.5179	0.0026	0.2656	-	-
低值情景	0.1960	0.1271	0.0178	0.3049	0.0008	0.1887	0.0243	0.2018
中值情景	0.4183	0.3431	0.0178	0.3804	0.0008	0.1887	0.0094	0.0899

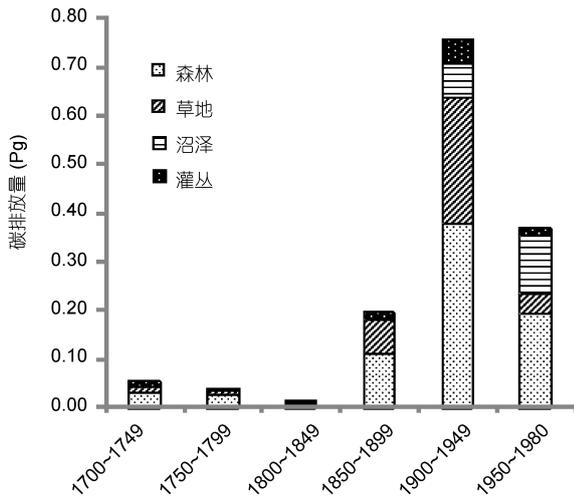


图 5 东北 3 省森林、草地、沼泽、灌丛开垦导致的碳排放变化(中值情景)

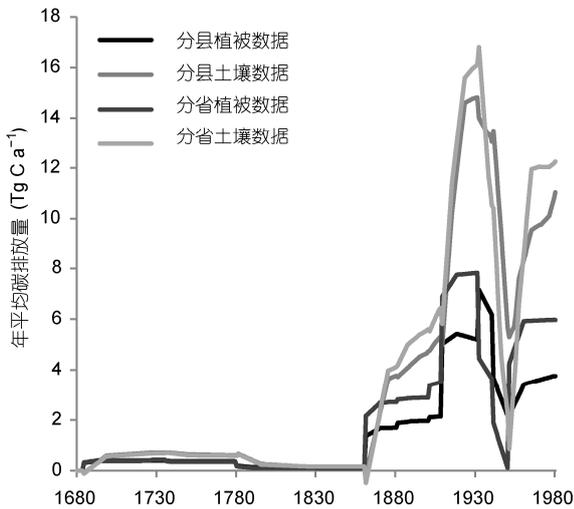


图 6 分省数据与分县数据的碳排放量变化对比(中值情景)

用数据的空间分辨率，减少了区域碳排放量计算的不确定性，提高估算结果精度。

干扰情景较为全面地反映了区域历史土地开发过程，对主要土地利用变化类型做了较为细致的分类，补充制定了簿记模型中的沼泽开垦曲线。不同生态系统的碳密度各不相同，土地利用活动对其碳储量的影响也不相同。开垦 1 km² 耕地，沼泽生态系统碳排放量最大，为 17948 Mg C；其次是森林生态系统，为 10821 Mg C；草地生态系统和灌丛生态系统的碳排放量均较小，分别为 4554 和 4456 Mg C，约为森林碳排放量的 42% 和 41%。估算结果表明非森林

生态系统的开垦和弃耕面积较大，对区域的碳收支估算具有重要影响。因此，分别计算森林、草地、灌丛、沼泽开垦面积，设置相应干扰情景，可以更加全面和准确的刻画区域土地利用变化过程，增加区域土地利用变化碳收支估算的精确性。此外，在植被碳密度方面，补充了东北地区实测研究数据，不同植被类型采用了不同含碳率；土壤碳密度计算时对土壤剖面数据的人类活动干扰做了订正。

东北的区域土地利用变化的碳排放量估算，前人在中国尺度上的研究也有相应成果。Houghton 等 (2003) 运用簿记模型对近 300 年中国土地利用变化的碳收支进行了估算，将中国划分为 6 个研究单元，东北 3 省作为一个单元。葛全胜等 (2008a) 采用簿记模型对中国近 300 年土地利用变化和碳收支进行了研究，研究单元为省。Houghton 和 Hackler (2003) 以及葛全胜等 (2008a) 的研究中 1700~1949 年东北 3 省的碳排放量估算结果分别为 2.39 和 1.97 Pg C。本文的估值在 0.51~2.06 Pg C，适中的估值为 1.28 Pg C，高值情景与葛全胜等 (2008a) 的研究较为接近，小于 Houghton 和 Hackler (2003) 的估值，中值情景的结果均小于 Houghton 和 Hackler (2003) 以及葛全胜等 (2008a) 两项研究的估值。与其他两项研究结果的差异，主要来自模型输入的土地利用数据和干扰情景的设置上。在上文精度分析中，分省数据会提高碳排放量估算结果，而 Houghton 和 Hackler (2003) 以及葛全胜等 (2008a) 两项研究的基本单元为东北 3 省和分省；此外 Houghton 和 Hackler (2003) 以及葛全胜等 (2008a) 在干扰情景设置主要考虑森林生态系统的干扰情景，并未对草地、灌丛和沼泽开垦的碳收支进行分析，而森林开垦的单位排放量较高，因此在考虑了非森林生态系统干扰情景后，估算结果会有所降低。

本文采用空间分辨率较高的 CNEC 数据，对东北地区近 300 年来耕地开垦的碳收支进行了评估，得到以下结论：(1) 1683~1980 年，森林开垦面积为 3.55~9.74 万 km²，草地开垦面积为 9.34~9.47 万 km²，沼泽开垦和灌丛开垦的面积分别为 1.00~1.11 万 km² 和 1.11~6.18 万 km²，森林、草地、沼泽和灌丛开垦面积的中值数据分别为 7.42 万 km²，9.47 万 km²，1.00 万 km² 和 2.31 万 km²。(2) 中值情景，1683~1980 年东北地区耕地开垦导致的碳排放量为 1.45 Pg C，土壤碳库占总碳排放量的 69%；20 世纪上半叶的碳排放量最大，年均碳排放量最高值阶段在 1923~1937 年，达

到 20~21 Tg C/a. (3) 东北地区耕地开垦导致的碳排放量省际差异较大, 黑龙江省碳排放量最大(适中值为 0.89 Pg C), 其碳排放量约为吉林省的 2.6 倍, 约为辽宁省的 4.1 倍. 中值情景中, 森林和灌丛生态系统排放量之和占到总排放量的 60%, 另外约 40% 的碳排放量来自草地和沼泽生态系统, 东北地区近 300 年来毁林开荒是最大的碳排放源. (4) 本文采用分县土地利用变化率数据, 数据的空间分辨率较高, 保证碳排放量估算精度达到分县, 使用分省数据会导致区域碳排放量比分县数据高估 11%, 其中植被碳排放量偏高 29%, 土壤碳排放量高估 3%. (5) 与 Houghton 和 Hackler(2003)以及葛全胜等(2008a)的研究结果相

比, 本文对东北地区耕地开垦碳排放量的估值较低, 主要原因在于使用了较高空间分辨率的土地利用数据, 增加了草地、灌丛和沼泽非森林生态系统的干扰情景.

本文的估算结果尚存在一些不确定性, 这也是后续研究的重点, 主要是在农田分类、响应曲线参数等需要加强. 每个地区不同历史时期的农垦方式都存在差别, 本文农田分类只涉及两种旱田, 还需要对东北地区历史上水田进一步研究. 沿用了簿记模型原有的中国区域参数, 在东北 3 省碳排放估算中还需要进一步收集区域研究, 验证和修订簿记模型响应曲线参数.

参考文献

- 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2007. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37: 1-9
- 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 2008a. 过去 300 年中国土地利用、土地覆盖变化与碳循环研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38: 197-210
- 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 等. 2008b. 过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支. 北京: 科学出版社. 182
- 何凡能, 李士成, 张学珍, 等. 2012. 中国传统农区过去 300 年耕地重建结果的对比分析. 地理学报, 67: 1190-1200
- 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 2006. 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 30: 539-544
- 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 2010. 全球土地利用数据集精度的区域评估——以中国东北地区为例. 中国科学: 地球科学, 40: 1048-1059
- 陆大道. 2011. 中国地理学的发展与全球变化研究. 地理学报, 66: 147-156
- 马钦彦, 陈遐林, 王娟. 2002. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. 北京林业大学学报, 24: 96-100
- 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 28: 491-498
- 全国土壤普查办公室. 1994. 中国土种志(第 6 卷). 北京: 中国农业出版社. 1-924
- 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 2004. 基于 1:100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究——以中国东北三省为例. 地理科学, 24: 568-572
- 王绍强, 刘纪远. 2002. 土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状. 地球科学进展, 17: 528-534
- 杨永兴, 王世岩, 何太蓉, 等. 2002. 三江平原典型湿地生态系统生物量及其季节动态研究. 中国草地, 24: 1-7
- 叶瑜, 方修琦, 任玉玉, 等. 2009. 东北地区过去 300 年耕地覆盖变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 340-350
- 衣保中. 2002. 朝鲜移民与近代东北地区的水田技术. 中国农史, 21: 37-46
- 张金波, 宋长春, 杨文燕. 2005. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响. 中国环境科学, 25: 343-347
- 张学珍, 王维强, 方修琦, 等. 2011. 中国东北地区 17 世纪后期的自然植被格局. 地理科学, 31: 184-189
- Bondre N R, Kiefer T, Gunten L V. 2012. Paired perspectives on global change. PAGES News, 20: 12-13
- Boyle J F, Gaillard M J, Kaplan J O. 2011. Modeling prehistoric land use and carbon budgets: A critical review. Holocene, 21: 715-722
- Foley J A, Costa M H, Delire C, et al. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. Front Ecol Environ, 1: 38-44
- Goldewijk K K, Beusen A, Dreht G, et al. 2011. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. Glob Ecol Biogeogr, 20: 73-86
- Goldewijk K K. 2001. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. Glob Biogeochem Cycle, 15: 417-433
- Houghton R A, Hackler J L. 2003. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. Glob Biogeochem Cycle, 17: 1034
- Houghton R A, Hobbie J E, Mellilo J M, et al. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to atmosphere. Ecol Monogr, 53: 235-262
- Houghton R A. 2001. Counting terrestrial sources and sink of carbon. Clim Change, 19: 99-118
- Houghton R A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. Tellus, 55B: 378-390

- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 180–185, 512
- Lambin E F, Turner B L II, Geist H J, et al. 2001. The causes of land use and land cover change: Moving beyond the myths. *Glob Environ Change*, 11: 261–269
- Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333: 988–993
- Ramankutty N, Foley J A. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Glob Biogeochem Cycle*, 13: 997–1027
- Ruddiman W F, Ellis E C. 2009. Effect of per-capita land-use changes on Holocene forest clearance and CO₂ emissions. *Quater Sci Rev*, 28: 3011–3015
- Strassmann K M, Joos F, Fischer G. 2008. Simulating effects of land use changes on carbon fluxes: Past contributions to atmospheric CO₂ increases and future commitments due to losses of terrestrial sink capacity. *Tellus*, 60B: 583–603
- Turner B L II, Skole D L, Sanderson S, et al. 1997. Land use and land cover change. *Earth Sci Fron*, 4: 26–33
- Ye Y, Fang X Q, Khan M A. 2012. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years. *Region Environ Chang*, 12: 193–206