

新疆耕地变化对区域碳平衡的影响

王渊刚^{1,2}, 罗格平¹, 赵树斌³, 韩其飞^{1,2}, 李超凡^{1,2}, 范彬彬^{1,2}, 陈耀亮^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家应用软件产品质量监督检验中心, 北京 100193)

摘要: 基于“Bookkeeping”模型, 对1975-2005年期间新疆耕地变化对区域碳平衡的影响进行了分析。荒漠土地开垦和耕地转移是新疆耕地变化的两种主要方式, 1975-2005年这两种耕地变化方式使新疆碳储量增加了20.6 Tg C, 其中土地开垦使区域碳储量增加了51.8 Tg C, 而耕地转移则向大气排放了31.2 Tg C。在1975-1985年期间, 新疆耕地大规模转移, 区域碳储量的变化趋势受耕地转移的影响较大; 1985年后随新疆土地开垦规模的增加, 碳储量变化趋势主要受土地开垦影响。30年间, 新疆碳储量增加主要是由草地开垦为耕地引起, 而耕地转移为草地是新疆碳储量减少的主要原因。新疆地区进行合理的水土开发活动有利于区域碳固定, 且长期的耕作管理活动会进一步增强耕地的碳汇功能。

关键词: 土地利用变化; 碳平衡; Bookkeeping模型; 新疆

DOI: 10.11821/dlxb201401011

土地利用/覆被变化是除工业化之外, 对自然生态系统影响最大的人类活动^[1]。土地利用变化通过影响大气和陆地间的CO₂流动, 进而影响大气对太阳辐射的吸收, 对全球气产生影响^[2]。土地利用覆被变化作为CO₂排放的重要来源, 其对全球气候变化的潜在影响受到越来越多的关注^[3]。

生态系统承载的碳是CO₂流入与流出平衡后的结果^[4], 而土地利用变化打破了陆地生态系统碳的流入流出平衡, 导致碳的排放或吸收, 使生态系统成为碳源或碳汇^[5]。据研究, 整个历史时期, 土地利用变化引起的碳净排放量约为171~199 PgC^[6-7], 而在过去的150年中, 由于人类大规模的土地开发活动已导致108~155 PgC的释放^[6, 8-10]。其中60%发生在20世纪上半叶的热带地区, 20世纪80年代, 大约90%的净碳源是由热带地区的土地利用变化造成的^[5, 11-12]。中国在过去300年间地上植被破坏引起的碳排放约为3.70 PgC, 土壤有机碳排放介于0.80~5.84 PgC之间^[13]。虽然目前土地利用覆盖变化对生态系统碳循环的影响机制逐渐清晰, 但利用遥感和模型手段估算大尺度土地利用覆盖变化对区域碳平衡的影响还存在很大的不确定性^[1]。同时, 由于干旱半干旱地区植被稀疏且生物量低、矿化强烈、土壤有机质低^[14], 以往的相关研究, 主要以碳密度较高的热带雨林和温带季风区的森林为研究对象, 对荒漠背景下的干旱半干旱区缺乏关注。全球性的相关研究对于干旱区的相关参数常采取简化处理, 干旱区土地利用变化引起的碳储量变化估算不够准确, 干旱区土地利用变化对碳平衡的影响已成为陆地碳收支估算中的薄弱环节。

近半个世纪以来, 中国西北干旱区以牺牲自然荒漠植被为代价扩张绿洲农业耕作区的

收稿日期: 2013-02-17; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41361140361) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41361140361]

作者简介: 王渊刚 (1986-), 男, 新疆奇台人, 硕士生, 主要从事土地利用变化、遥感与地理信息系统应用研究。

E-mail: wyg04@sina.com

通讯作者: 罗格平 (1968-), 男, 博士 研究员。E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn

活动使其土地利用发生显著变化。新疆作为干旱区的典型代表,自新中国成立以来开展了大规模以农业开发为主的水土开发,近年来随着人口增长和城市规模的不断扩大增加了占(耕)地面积,新疆加大了开荒面积^[15]。新疆大规模的耕地变化对新疆地区碳储量产生何种影响及其在全球碳循环中的地位有待探讨。鉴于此,本文基于国际上最普遍、最广泛的经验统计模型—Bookkeeping模型^[12, 16-18],结合野外调查访谈获取的第一手资料,研究新疆耕地变化对区域碳储量的影响,以期评估干旱区土地利用/覆被变化对全球碳平衡的贡献提供科学见解,降低区域尺度碳收支估算中的不确定性,并为该地区生态建设与区域社会经济的可持续发展模式的制定提供决策依据。

1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹地,中国西北边陲,位居E73°32'~96°21', N34°22'~49°33'之间,地处中温带极端干旱的荒漠带。全区总面积为166.31万km²,占全国土地总面积的六分之一,是我国最大的行政省区。新疆地形呈“三山夹两盆”的格局,北部为阿尔泰山,南部有昆仑山和喀喇昆仑山,天山横贯中部,从而形成南疆的塔里木盆地和北疆的准噶尔盆地,总的地形态势大致为南高北低,西高东低。

新疆是我国重要的农垦地区,占新疆土地总面积4.27%的绿洲承载着全疆95%以上的人口,是新疆经济、资源、人口综合作用的载体,绿洲农业是干旱区人类生存与发展的基本命脉^[19]。新中国成立以后,新疆耕地数量经历了迅速上升→波动→下降→回升的变化历程,在整个历程中受水资源不足、盐渍化的影响以及土地责任制和政府优惠政策的影响,新疆耕地变化呈现开荒—耕作—弃耕往复循环的特点^[20]。1990年前后受中央及自治区地方政府允许且鼓励土地开垦政策的影响,人口连续增长以及新疆地区节水灌溉技术大面积推广的影响,新疆加大了开荒面积,新疆开展的以农业开发为主的水土开发和绿洲建设不断取得巨大成就,促进了生产发展与社会进步^[15, 1-20]。

2 数据来源和研究方法

2.1 土地利用/覆被变化数据

本研究采用的土地利用/覆被数据来自中国科学院新疆生态与地理研究所遥感与地理信息系统实验室,包括1975年、1990年和2005年3期土地利用/覆被数据。1975年、1990年和2005年土地利用数据分别以1975年Landsat MSS、1990年TM和2005年TM、ETM遥感影像为数据源,利用ERDAS IMAGE软件和1:10万地形图对上述影像进行图像预处理、目视人工解译后获得。为突出不同土地利用类型的植被覆被状况,结合本研究特点以及研究需要,参照冉有华等^[21]的土地覆被综合分类方法,对土地利用图分类信息进行整合,将研究区分为农田、林地、灌木林地、草地、水域、建设用地和裸地7种土地覆被类型。

利用遥感资料获取的土地利用/覆被数据,虽然能从时空格局上反映土地利用/覆被变化信息,但难以获取历年土地利用/覆被变化信息,而耕地面积变化速度在一定程度上能够反映土地开垦和耕地转移的速度。本研究利用较高空间分辨率的遥感数据和来源于《新疆五十年》^[22]和《新疆统计年鉴2006》^[23]的新疆历年耕地面积数据,提取逐年土地开垦和耕地转移方向及面积数据,用以代替从单一数据源提取的土地利用变化信息,以便提高碳收支估算精度。计算方法如下:设定历年耕地面积向量为S:

$$S = (S_1, S_2, S_3, \cdots S_n) \tag{1}$$

则历年耕地增加面积向量 $\Delta S_{增}$ 为:

$$\Delta S_{\text{增}} = (\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3 \cdots, \Delta S_{n-1}) \tag{2}$$

式中： $\Delta S_{\text{增}i} = S_{i+1} - S_i$ ；考虑到有 $\Delta S_{\text{增}i} < 0$ ，而土地开垦面积只可能大于或等于0，因此需平滑历年耕地增加面积，历年土地开垦相对增加的耕地面积向量 $\Delta S_{\text{增}}'$ 为：

$$\Delta S_{\text{增}}' = (\Delta S_1 + |\min(\Delta S_{\text{增}})|, \Delta S_2 + |\min(\Delta S_{\text{增}})|, \cdots, \Delta S_{n-1} + |\min(\Delta S_{\text{增}})|) \tag{3}$$

历年耕地新增面积占总新增面积百分比 $P_{\text{增}}$ 为：

$$P_{\text{增}} = (\Delta S_{\text{增}1}' / \text{sum}(\Delta S_{\text{增}}'), \Delta S_{\text{增}2}' / \text{sum}(\Delta S_{\text{增}}'), \cdots, \Delta S_{\text{增}n-1}' / \text{sum}(\Delta S_{\text{增}}')) \tag{4}$$

$P_{\text{转移}}$ 的计算方法与 $P_{\text{增}}$ 相似，其区别在于计算 $P_{\text{转移}}$ 式(2)改为：

$$\Delta S_{\text{减}} = (\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \cdots, \Delta S_{n-1}) \tag{5}$$

式中： $\Delta S_{\text{减}i} = S_i - S_{i+1}$ ，其后计算方法相同。

利用土地利用/覆被数据获取的1975-1990年和1990-2005年土地开垦和耕地转移类型面积分别乘以同期 $P_{\text{增}}$ 和 $P_{\text{转移}}$ 向量，获取新疆1975-2005年历年不同土地开垦和耕地转移类型的面积。

2.2 植被和土壤碳密度资料

本研究中植被碳密度数据采用前人关于新疆不同植被类型生物量相关研究成果^[24-42]。草地类型仅指可被用于土地开垦的山地干草原和荒漠草原，林地指落叶阔叶林。采用0.45的转换系数将生物量转换为植被碳密度，并按土地覆被类型分类整理植被碳密度资料，取算术均值作为新疆不同土地覆被类型的植被碳密度(图1)。

本研究采用的土壤碳密度数据，是利用来自全国第二次土壤普查的汇编成果《昌吉州土壤》^[43]、《农八师土壤》^①以及《新疆土壤》^[44]获得共333组1m深度土壤剖面数据，通过计算获得的新疆不同土地利用覆被类型以及不同自然植被转换为农田后农田土壤有机碳密度(图1，图2)。

土壤有机碳密度计算公式为^[45]：

$$SOCD = \sum_{i=1}^n 0.58 * C_{Si} * h_i * p_i \tag{6}$$

式中： $SOCD$ 为土壤有机碳密度(kg/m^2)；0.58为有机质与有机碳的转换系数； C_{Si} 为*i*层土壤有机质含量(g/kg)； h_i 为*i*层土壤厚度(m)； p_i 为*i*层土壤容重(g/cm^3)。鉴于部分土壤剖面缺乏容重数据，本研究利用获得的195组土壤有机质和容重数据，建立了土壤容重和土壤有机质含量指数模型($p = 1.3263e^{-0.026C_S}$)。经相关性检验($R^2 = 0.6088$)和*F*检验($F = 1051.12$)，土壤容重和土壤有机质含量指数模型具有显著的统计学意义。

2.3 移走植被氧化速率资料

土地利用变化会引起植被碳的转移，在此过程中一部分植被碳以枯枝落叶的形式留在原地，进入土壤转化为土壤有机碳；另一部分植被碳被移走，并以不同的方式被利用。虽然移走植被最终进入大气，但受利用方式影响，植被碳氧化速率存在差异。

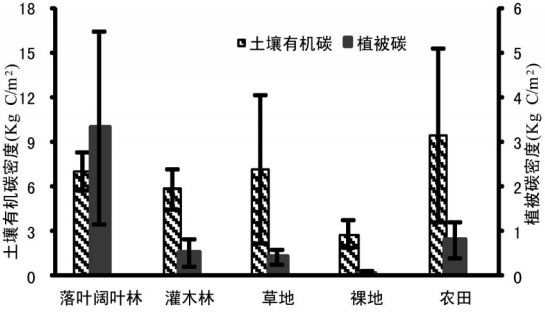


图1 不同土地覆被类型的碳密度
Fig. 1 Carbon density of different land cover types

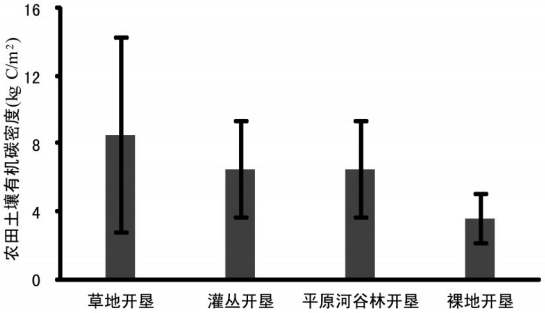


图2 不同自然植被开垦后土壤有机碳密度
Fig. 2 Soil organic carbon density of different reclaimed plant types

① 《农八师土壤》.兵团勘测设计院一分院，1986

表1 新疆土地开发过程中植被生物量不同利用方式的比例和氧化速率
Tab. 1 The proportion and oxidation rate of vegetation biomass with different utilization ways under reclamation in Xinjiang

利用方式	林地				灌木林				草地		
	留在原地	建房	薪柴	农具	留在原地	原地焚烧	薪柴	农具	留在原地	原地焚烧	薪柴
比例 (%)	17	35	42	6	22	13	60	5	49%	42%	9%
氧化速率 (年)	-	15	1	5	-	1	3.5	5	-	1	1

新疆的土地开垦主要以荒漠植被转化为耕地为主，受水土开发过程中社会经济条件与生产力限制，开发对象的差异，以及当地生活习惯影响，移走植被的利用方式与其他地区存在显著区别。为能更加准确的反应移走植被碳的氧化速率以及年释放量，本研究中植被碳氧化速率数据采用课题组成员于2011年7-10月赴玛纳斯河流域、伊犁河流域和阿勒泰地区，以当地军垦战士和农户为调查对象，获得的关于土地开垦过程中移走植被利用方式、比例和氧化速率的调查资料 (表1)。

2.4 Bookkeeping 模型

Houghton等^[46]建立的“簿记”(Bookkeeping)模型是研究土地利用/覆被变化对碳收支影响最普遍、最广泛的经验统计模型^[12, 16-18]。多年来，作者对该模型不断修正与完善^[9]，应用于赤道热带地区^[47]，美国^[16]、中国以及亚洲等地^[48]。该模型主要需要两类数据：一类是土地利用与覆被变化数据，另一类是因土地利用和土地管理方式不同而引起的碳密度变化数据。

Bookkeeping模型以年为时间步长，计算土地利用/覆被变化引起的陆地生态系统碳储量年净增量。模型考虑了单位土地面积上全部碳量，包括活生物体、土壤、受到干扰而产生的植物残体以及木材产品。模型强调腐烂和氧化导致的碳释放，考虑了不同产品氧化速率差异。同时在土地利用变化的最初几年内，由于凋落物腐烂、人为扰动后植被的再恢复以及土壤有机碳含量的变化，碳开始损失或聚集。将这些过程表达成植被和土壤碳密度在土地开垦、耕地撂荒、森林采伐和更新、放牧等人类活动下的响应曲线^[49]。统计年际每种土地利用/覆被变化类型面积以及该转换类型下的碳密度响应曲线，累加植被和土壤的碳储量的年际变化值即可评估生物碳库储量的变化及碳排放量^[18]。本文利用上文所述的1975-2005年新疆历年土地开垦和耕地转移数据、植被和土壤碳密度数据 (图1，图2)以及植被氧化速率调查资料 (表1)，采用“簿记”模型，部分参数采用前人研究成果的基础上研究了新疆土地开垦和耕地转移对区域碳储量的影响。

(1) 土地开垦和耕地转移引起的植被碳储量变化 本研究中所述土地开垦和耕地转移分别指平原河谷林、灌丛、草地、裸地开垦为耕地和耕地转移为这四种土地利用/覆被类型。自然植被在开垦为耕地过程中，遗留生物量，移走生物量利用方式、比例和氧化速率以调查资料 (表1) 为准。耕地转移为平原河谷林、灌丛、草地和裸地后系统生物量恢复所需时间分别为：25年^[26]、10年^[46]、10年^[46]和1年 (表2)。

(2) 土地开垦和耕地转移引起的土壤碳储量变化 土壤中的有机碳量是进入土壤中的植物残体量以及在土壤微生物作用下分解损失量平衡的结果^[50]。而土地利用变化会改变进入土壤中的植物残体，并影响土壤有机碳的分解损失量，打破土壤有机碳的平衡，使土壤碳密度发生改变。在本研究中认为，平原河谷林、灌丛、草地和裸地在开垦为耕地后的前15年^[46]、5年^[51]、5年^[51]和5年^[51]土壤碳变化量占总变化量的80%^[46] (表2)。开垦后土壤碳密度达到基本稳定所需要的时间分别为：30年^[46]、10年^[46]、20年^[46, 51]和10年^[46] (表2)。耕地弃耕后土壤碳密度的增加或者减少是匀速变化，土壤碳密度达到稳定所需时间参照Houghton等^[46]研究中土地开垦后土壤碳密度变化所需时间与耕地弃耕后土壤碳密度稳定所需时间的比例关系，并结合前人关于新疆耕地变化对碳密度影响的研究成果，实现参数本

表2 Bookkeeping模型参数表
Tab. 2 Parameters of Bookkeeping Model

	平原河谷林	灌木林	草地	裸地
未被扰动的生态系统中植被碳密度 (10 ⁶ g/ha)	33.16	5.14	4.08	0.55
恢复后的生态系统中植被碳密度 (10 ⁶ g/ha)	33.16	5.14	4.08	0.55
作物的植被碳密度	8.06	8.06	8.06	8.06
弃耕后系统生物量恢复所需要的时间 (yr)	25	10	10	1
未扰动的生态系统中土壤碳密度 (10 ⁶ g/ha)	69.40	57.99	70.91	27.99
恢复后的生态系统中土壤碳密度 (10 ⁶ g/ha)	69.40	57.99	70.91	27.99
清理后以枯枝落叶形式遗留在土壤中的部分	0.17	0.22	0.49	0.49
清理后移走植被碳库不同氧化速率的百分比				
1 (yr)	0.42	0.13	0.51	0.51
5 (yr)	0.06	0.60		
15 (yr)	0.35	0.05		
清理后初始快速变化后土壤碳密 (10 ⁶ g/ha)	65.94	63.65	82.41	34.47
稳定农田生态系统中土壤碳密度 (10 ⁶ g/ha)	65.07	65.07	85.29	36.09
清理后土壤碳快速变化所需时间 (yr)	15	5	5	5
耕作过程中土壤碳密度达到最大值所需时间 (yr)	30	10	20	10
弃耕后土壤碳达到恢复后水平所需要的时间 (yr)	40	10	20	10

地化。耕地转移为平原河谷林、灌丛、草地和裸地后土壤碳密度达到稳定所需要的时间分别为：40年^[46]、10年^[46]、20年^[46, 51]和10年^[46] (表2)。

3 研究结果

3.1 新疆耕地变化特征

1975-2005年的30年间，新疆历年土地开垦规模呈以下特点 (图3)。1975-1985年的10年间历年土地开垦面积虽有波动，但总体呈下降趋势，1985年后土地开发力度逐步上升，1998年土地开发力度达到最高点，其后至2002年开发力度呈下降趋势，2002年以后出现急速上升趋势。耕地转移规模与土地开垦规模的变化趋势相反 (图3)，在1975-1985年耕地转移规模增大，但1985年后土地弃耕规模急剧降低，1990年后，土地弃耕规模平缓波动，每年变化较小。

总体来看，新疆耕地变化可以分为1975-1985年和1985-2005年两个时期。1975-1985年间新疆耕地变化以耕地转移为主，土地开垦面积小于耕地转移面积，10年间新疆耕地总面积减少2622.6 km²，其中新增耕地面积10384.5 km²，耕地转移面积13007.1 km²。在1985-2005年的20年间新疆加大了开垦面积，耕地转移规模急剧缩小，20年间新疆新增耕地面积为32988.7 km²，耕地转移面积16471.5 km²，总面积增加16517.2 km²。

从转移类型开看 (表3)，新疆新增耕地主要来源草地，其次为裸地 and 建设用地，再次

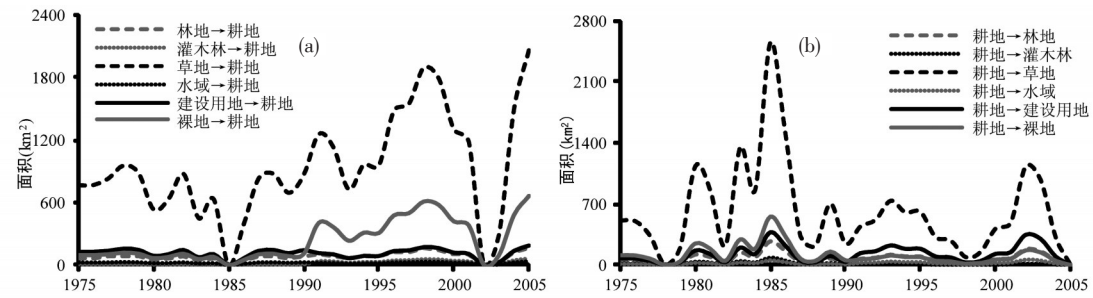


图3 新疆历年土地开垦(a)和耕地转移(b)的类型及面积

Fig. 3 The pattern (a) and annual area (b) of reclamation and arable land transfer in Xinjiang

表3 新疆不同时期土地开垦和耕地转移面积 (10³ km²)

Tab. 3 Reclamation and arable land transfer area in Xinjiang of different periods (10³ km²)

年份	土地开垦						总计	耕地转移						总计
	林地	灌木	草地	水域	建设用地	裸地		林地	灌木	草地	水域	建设用地	裸地	
1975-1990	1.0	0.1	11.0	0.3	1.8	1.3	15.6	1.2	0.4	11.5	0.2	1.7	2.5	17.6
1990-2005	1.5	0.5	18.1	0.3	1.6	5.8	27.8	1.1	0.1	7.1	0.4	2.2	1.0	11.9

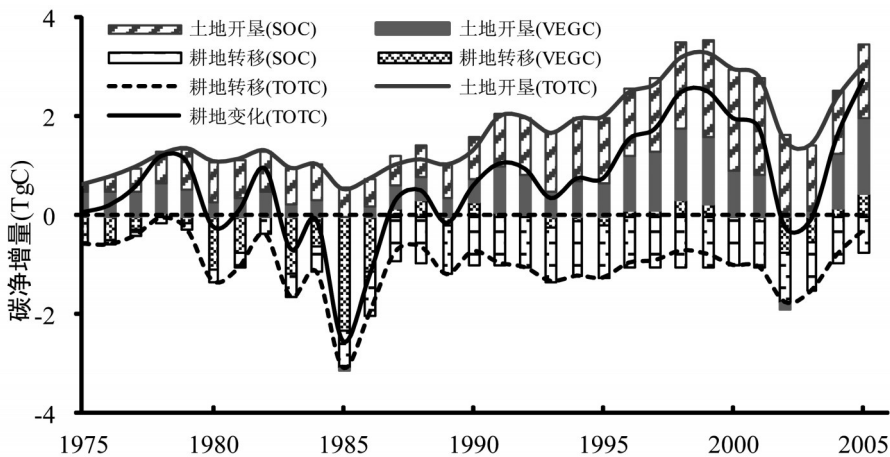


图4 新疆耕地变化对区域碳平衡的影响

Fig. 4 The impact of arable land change on carbon balance in Xinjiang in different periods

为林地、灌木林和水域转移为耕地的面积占总新增耕地面积比重最小。在1975-1990年和1990-2005年两个时期，新疆新增耕地不同来源所占比重存在差异。草地开垦为耕地的面积占总面积的比重在1975-1990年间为70.5%，1990-2005年下降为64.9%；裸地开垦所占比重从1975-1990年的8.7%，上升为1990-2005年的20.9%；建设用地转移为耕地面积占总新增面积的比重下降了1倍；两个时期林地开垦面积占总开垦面积的比重变化不大，均在6%左右；灌木林和水域开垦为耕地面积占总变化面积的比重之和低于3%。与耕地开垦相似的是，耕地转移为草地是新疆耕地流失的主要方向，这两个时期新疆耕地转移为草地所占耕地流失总面积的比重分别为65.5%和59.5%；与耕地转移为草地所占比重下降相比，耕地转移为建设用地和林地所占比重均有所上升，增加比重分别为8.6%和2.6%，是新疆耕地流失的次要方向；耕地转移为灌丛和水域的面积所占最高比重分别为：2.2%和3.2%。

3.2 新疆耕地变化对区域碳平衡的影响

本研究关注土地开垦和耕地转移引起的耕地变化对区域碳平衡的影响。在1975-2005年的30年间，新疆耕地变化使区域碳储量增加了20.6 Tg C。研究表明 (图4)，在1986年以前新疆耕地变化对区域碳储量影响的变化趋势与耕地转移情形下的变化趋势较为一致，1986年以后其变化趋势受土地开垦影响较大。

在耕地转移情形下，新疆碳储量净增量在1975-1986年波动幅度较大，自1986年后由耕地转移引起的年碳储量净增量变化幅度较小。在1987年以前植被碳排放量占总碳排放量的比重总体大于土壤碳排放量所占比重，多年均值为51.4%，1987年以后则为16.6%。在1975-2005年的30年间由于耕地转移新疆地区向大气总共排放了31.2 TgC，其中植被和土壤碳的排放量分别为8.2 TgC和23.0 TgC。耕地转移为不同土地覆被类型对区域碳储量净增量的影响存在显著差异 (图5A)，耕地转移为草地、灌丛、裸地均会引起区域碳排放的增加，而转移为林地会增加区域碳储量，减少碳排放。耕地转移情形下区域碳储量净增量的变化趋势与耕地转移草地的趋势相似，其引起的碳排放量占耕地转移引起碳排放量的

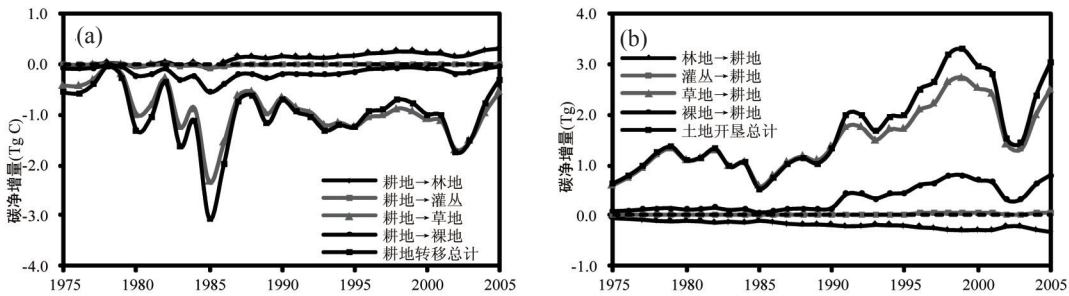


图5 不同转移类型对区域碳平衡的影响

Fig. 5 The impact of different land use conversion types on carbon balance in Xinjiang

92.2%，耕地转移为林地、灌丛和裸地引起的碳排放量分别为：-3.3 TgC、0.5 TgC、5.3 TgC。

在1975-2005年，新疆土地开垦情形下的碳储量净增量为正值，有利于新疆碳储量增加。30年间由于土地开垦新疆碳储量增加了51.8 TgC，土壤碳增量约占总增量的63%。与耕地转移相比，土地开垦情形下新疆历年碳储量净增量在整个研究时期均为正值且波动较小，碳储量净增量总体呈上升趋势。在整个研究时段内土壤碳和植被碳储量净增量占总增量的比重无明显的时间段差异。草地开垦为耕地是新疆土地开垦情形下对区域碳平衡影响最大的土地利用变化类型(图5B)，30年间由草地开垦引起的碳增量为46.7 TgC，约为总碳增量的90.2%，林地、灌丛和裸地转移为耕地引起的碳增量分别为：-5.7 TgC、0.6 TgC、0.2 TgC。

4 讨论

在1975-2005年的30年间，新疆耕地变化大致分为1975-1985年耕地大规模转移的第一阶段和1985-2005年土地大面积开垦的第二阶段。其主要原因可能为：在1975-1985年受水资源限制和管理不善引起土壤次生盐渍化而被迫弃耕，以及工矿用地的增加导致了新疆耕地大面积转移^[20]；1985年后中央和地方政府允许且鼓励土地开垦，喷灌、滴管等先进技术的推广使水资源利用效率得以提高，进一步提高土地开发潜力，并随着社会人口的增加，新疆耕地需求增大^[15, 20]，新疆在深度开发的基础上进行广度开发，增加了开荒面积，耕地总面积呈稳定增加态势。

新疆以荒漠土地为开垦对象的开垦模式，决定了新疆的土地开垦会增加区域碳储量。土地利用转移类型只能够决定区域碳储量增加或减少，其变化幅度则受历年耕地变化面积和转移类型构成影响。与历年土地开垦和耕地转移面积相比，耕地变化对碳平衡的影响具有一定的滞后性，同时其变化较为平缓(图3，图4)，这主要是由于本研究中考虑了土地利用覆被变化对多年后碳平衡的影响，第n年的碳储量净变化量是之前多年耕地变化综合作用的结果。同时本文研究表明，与熟化农田土壤碳密度11.3 kg/m²和新疆农田平均土壤碳密度9.5 kg/m²相比，平原河谷林、灌木林、草地和裸地开垦为农田后，在30~40年内农田土壤碳密度取值较低仅为6.5 kg/m²、6.5 kg/m²、8.5 kg/m²、3.6 kg/m²。这表明经更长时间耕种、灌排、施肥等农业技术措施，土壤熟化程度不断提高，新疆地区30~40年内开垦的农田的土壤有机碳密度会进一步增加。新疆耕地变化对区域碳储量的贡献还会进一步的增大。

考虑到Bookkeeping模型以年为时间步长计算土地利用变化对碳平衡的影响，不同于以往默认多年间历年土地利用变化面积相同的假设，本研究利用统计数据 and 土地利用覆被

数据获取了新疆历年土地开垦和耕地转移的主要类型及面积,以期有效提高 Bookkeeping 模型的估算精度。然而,本文虽然将土地利用/覆被数据和统计数据结合以提高土地利用覆被变化数据的精度,但受土地利用/覆被数据和新疆弃耕地面积数据缺乏的影响,历年新疆不同耕地变化类型的面积还不够精确。目前,虽然开垦荒漠土地会增加植被和土壤碳储量已经成为共识,但相关研究仍存在不确定性,特别是植被和土壤碳对土地利用变化的响应曲线仍是通过简单直线来刻画。相对于其他研究,本研究虽然考虑的更为全面,数据更为详细,获得的结果也更为准确和精确,但与区域碳动态实际变化仍然具有一定的差异。同时,考虑到水域和耕地相互转换面积较小,并且其变化对碳密度的影响机制尚不清楚,而耕地和城市建设用地相互转换对碳循环的影响并不显著^[1]。本文中未涉及水域和建设用地与耕地的相互转移对区域碳平衡的影响,这些问题都有待于随土地利用变化对碳密度影响相关机理认识的深入,逐步得到提高与解决。

5 结论

1975-2005年新疆耕地开发和转移构成变化不大,草地是新疆耕地转入与转出的主要覆被类型。30年间,土地开垦和耕地转移面积变化幅度较大,是影响区域碳变化幅度最大的因素。1975-1985年新疆耕地弃耕幅度较大,新疆耕地变化对区域碳平衡的影响受耕地转移控制,自1985年以后新疆土地开垦面积增加、弃耕地减少,土地开垦力度是影响新疆区域碳平衡最大的因素。受耕地变化影响,30年间新疆碳储量共增加了20.6 TgC,其中土地开垦使碳储量增加了51.8 TgC,耕地转移则向大气排放了31.2 TgC碳,草地开垦与耕地转移为草地分别是新疆碳储量增加和减少的主要原因。总体而言,长期合理的水土开发和耕作管理能促进新疆耕地的固碳能力。

参考文献 (References)

- [1] Chen Guangsheng, Tian Hanqin. Land use/cover change effect on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 189-204. [陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆被变化对陆地生态系统碳循环的影响. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 189-204.]
- [2] Müller-Wenk R, Brand M. Climatic impact of land use in LCA: Carbon transfers between vegetation/soil and air. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(2): 172-182.
- [3] Rhoades C C. The influence of American Chestnut (*Castanea dentata*) on nitrogen availability, organic matter and chemistry of silty and sandy loam soils. *Pedobiologia*, 2007, 50(6): 553-562.
- [4] Fearnside P M, Imbrozio B R. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 1998, 108(1): 147-166.
- [5] Watson R T, Noble I R, Bolin B et al. Land Use, Land-use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2000.
- [6] Pongratz J, Reick C, Raddatz T et al. Effects of anthropogenic land cover change on the carbon cycle of the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): GB4001, doi: 10.1029/2009GB003488.
- [7] Defries R, Field C, Fung I et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 803-815.
- [8] Shevliakova E, Pacala S W, Malyshev S et al. Carbon cycling under 300 years of land use change: Importance of the secondary vegetation sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2022, doi:10.1029/2007GB003176.
- [9] 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 B*, 2003, 55(2): 378-390.
- [10] Houghton R A. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change?. *Tellus B*, 2010, 62(5): 337-351.
- [11] Li Kerang. Land Use Change and Net Greenhouse Gases Emissions and the Carbon Cycle of Terrestrial Ecosystems. Beijing: China Meteorological Press, 2002. [李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2002.]

- [12] Houghton R. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B*, 1999, 51(2): 298-313.
- [13] Ge Quansheng, Dai Junhu, He Fanneng et al. Land use changes and their relations with carbon cycles over the past 300 a in China. *Science in China. Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(2): 197-210. [葛全胜, 戴君虎, 何凡能 等. 过去300年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究. *中国科学: D辑*, 2008, 38(2): 197-210.]
- [14] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3): 199-209.
- [15] Qian Yibing, Fang Zili, Lei Jiaqiang et al. Exploitation of water and land resources and its ecoenvironment issues in Xinjiang of China in recent 50 a. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 58-63. [钱亦兵, 樊自立, 雷加强 等. 近50年新疆水土开发及引发的生态环境问题. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 58-63.]
- [16] Houghton R, Hackler J, Lawrence K. The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [17] Houghton R, Van Der Werf G, Defries R et al. Chapter G2 carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences Discuss*, 2012, 9(1): 835-878.
- [18] Ren Wei, Wang Qiufeng, Liu Yinghui et al. Certified carbon inventory methods of carbon sequestration rate and potential in terrestrial ecosystem at region scale and their uncertainty analysis. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 795-804. [任伟, 王秋凤, 刘颖慧 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和潜力定量认证方法及其不确定性分析. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 795-804.]
- [19] Tian Changyan, Zhou Hongfei, Liu Guoqing. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21st century in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2000, 23(2): 177-181. [田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议. *干旱区地理*, 2000, 23(2): 177-181.]
- [20] Cai Wenchun, Yang Degang. Variation of cultivated land and its driving forces in Xinjiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(2): 144-149. [蔡文春, 杨德刚. 新疆耕地变化及驱动力分析. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(2): 144-149.]
- [21] Ran Youhua, Li Xin, Lu Ling. China land cover classification at 1km spatial resolution bases on a multisource data fusion approach. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 192-203. [冉有华, 李新, 卢玲. 基于多源数据融合方法的中国1km土地覆盖分类制图. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 192-203.]
- [22] Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Statistics. *Xinjiang Fifty Years*. Beijing: China Statictics Press, 2005. [新疆维吾尔自治区统计局. *新疆五十年*. 北京: 中国统计出版社, 2005.]
- [23] Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Statistics. *Xinjiang Statictics Yearbook-2006*. Beijing: China Statictics Press, 2006. [新疆维吾尔自治区统计局. *新疆统计年鉴2006*. 北京: 中国统计出版社, 2006.]
- [24] Luo Tianxiang. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and their mathematical models [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1996. [罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京: 中国科学院, 1996.]
- [25] Wu Xiaocheng. Research on the productivity and carbon density of natural poplar and willow forest in Ergis River, Xinjiang [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural College Forestry College, 2009. [吴晓成. 新疆额尔齐斯河天然杨柳林生产力与碳密度的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.]
- [26] Hu Shasha, Zhang Yutao, Li Jimei et al. Characteristics of spatial distribution of the biomass of populus alba var pyramidalis bge. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(6): 1059-1065. [胡莎莎, 张毓涛, 李吉玫 等. 新疆杨生物量空间分布特征研究. *新疆农业科学*, 2012, 49(6): 1059-1065.]
- [27] Wei Yanmin. Research on biomass and carbon stock for large-scale implementation of poplar plantation in desert environment [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010. [魏艳敏. 荒漠环境规模化人工杨树树林生物量和碳储量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.]
- [28] Zhao Haizhen, Barur Bake, Li Hong et al. Analysis on biomass of new forest in desert area and surrounding desert vegetation. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2011, 34(3): 244-248. [赵海珍, 巴特尔·巴克, 李宏 等. 荒漠区新建林及外围荒漠植被生物量分析. *新疆农业大学学报*, 2011, 34(3): 244-248.]
- [29] Wang Chunling, Guo Quanshui, Tan Deyuan et al. Haloxylon ammodendron community patterns in different habitats alongs outheastern edge of Zhunger Basin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1224-1229. [王春玲, 郭全水, 谭德远 等. 准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1224-1229.]
- [30] Zhao Zhenyong, Wang Ranghui, Zhang Huizhi et al. Aboveground biomass of Tamarix on piedmont plain of Tianshan Mountains south slope. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1557-1562. [赵振勇, 王让会, 张慧芝 等. 天山南麓山前平原怪柳灌丛地上生物量. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1557-1562.]
- [31] Zhou Bin, Qiao Mu, Feng Ying. Ecological investigation and restoration strategies of spring and autumn pasture in

- Yili River valley. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 528-532. [周斌, 乔木, 冯纓. 伊犁河谷春秋草场草地生态调查及其恢复对策. 生态学杂志, 2007, 26(4): 528-532.]
- [32] Mohammad Anwar, Yang Yuanhe, Guo Zhaodi et al. Grassland aboveground biomass in Xinjiang. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 521-526. [安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪等. 新疆草地植被的地上生物量. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 521-526.]
- [33] Mohammad Anwar. Carbon and nitrogen storage of grassland ecosystem in Xinjiang [D]. Beijing: Peking University, 2006. [安尼瓦尔·买买提. 新疆草地生态系统碳、氮储量研究[D]. 北京: 北京大学, 2006.]
- [34] Guo Yongsheng, Li Luhua, Wei Changzhou et al. Effect of nitrogen fertilizer on biomass amount and soil enzymes activity of desert grassland in Xinjiang. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 249-256. [郭永盛, 李鲁华, 危常州等. 施氮肥对新疆荒漠草原生物量和土壤酶活性的影响. 农业工程学报, 2011, 27(1): 249-256.]
- [35] Yu Rong, Cai Bofeng, Wen Qingke et al. Crop biomass estimation in irrigated agricultural areas, northwestern China using MODIS vegetation indices. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 141-144. [于嵘, 蔡博峰, 温庆可等. 基于MODIS植被指数的西北农业灌溉区生物量估算. 农业工程学报, 2008, 24(10): 141-144.]
- [36] Li Weihong, Zhou Honghua, Yang Xiaoming et al. Temporal and spatial distribution characteristics of aboveground biomass of grassland plant communities in an arid area. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(5): 186-195. [李卫红, 周洪华, 杨晓明等. 干旱荒漠区草地植物群落地上生物量时空分布对地下水的响应. 草业学报, 2010, 19(5): 186-195.]
- [37] Cui Duo, Li Yulin, Wang Xinyuan et al. Spatial distribution of aboveground biomass of grassland in desert and desertified regions in northern China. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 868-872. [崔夺, 李玉霖, 王新源等. 北方荒漠及荒漠化地区草地地上生物量空间分布特征. 中国沙漠, 2011, 31(4): 868-872.]
- [38] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 841-850.
- [39] Luo Xinning, Chen Bing, Zhang Jusong et al. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation of cotton plant on different soil textures. Acta Agriculturae Boreali: Occidentalis Sinica, 2009, 18(4): 160-166. [罗新宁, 陈冰, 张巨松等. 氮肥对不同质地土壤棉花生物量与氮素积累的影响. 西北农业学报, 2009, 18(4): 160-166.]
- [40] Meng Fande, Ma Lin, Shi Shubing et al. Dynamics change of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(4): 693-698. [孟凡德, 马林, 石书兵等. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究. 麦类作物学报, 2007, 27(4): 693-698.]
- [41] Li Chenhua, Li Yan, Tang Lisong et al. Layered characters of organic carbon storage and release in salinized gray desert soil before and after reclamation. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 385-391. [李晨华, 李彦, 唐立松等. 盐化灰漠土开垦前后碳存贮与碳释放的分层特征. 干旱区研究, 2010, 27(3): 385-391.]
- [42] Zhang Hongfeng, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua et al. Evaluation of agricultural ecosystem services value in Manas River Watershed of China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1259-1264. [张宏锋, 欧阳志云, 郑华等. 玛纳斯河流域农田生态系统服务功能价值评估. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1259-1264.]
- [43] Changji Autonomous Prefecture Bureau of Agriculture. Soils in Changji Hui Autonomous Prefecture. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Publishing House, 1993. [昌吉回族自治州农业局. 昌吉州土壤. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993.]
- [44] Agriculture Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Soils in Xinjiang. Beijing: Science Press, 1996. [新疆维吾尔自治区农业厅, 新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [45] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu. Estimate soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. Geographical Research, 1999, 18(4): 349-356. [王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18(4): 349-356.]
- [46] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere. Ecological Monographs, 1983, 53(3): 236-262.
- [47] Houghton R, Skole D, Nobre C A et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. Nature, 2000, 403(6767): 301-304.
- [48] Houghton R. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia. Science in China Series C Life Sciences, 2002, 45(Suppl.): 10-17.
- [49] Houghton R. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? Global Change Biology, 2003, 9(4): 500-509.
- [50] Jin Feng, Yang Hao, Zhao Qiguo. Advances in soil organic carbon storage and influencing factors. Soil, 2000, 32(1): 11-17. [金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32(1): 11-17.]
- [51] Xu Wanli, Tang Guangmu, Sheng Jiandong et al. Effect of cultivation on organic carbon fractionation and aggregate stability in Xinjiang oasis soils. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1773-1779. [徐万里, 唐光木, 盛建东等. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2010, 30(7): 1773-1779.]

Effects of arable land change on regional carbon balance in Xinjiang

WANG Yuangang^{1,2}, LUO Geping¹, ZHAO Shubin³, HAN Qifei^{1,2}, LI Chaofan^{1,2}
FAN Binbin^{1,2}, CHEN Yaoliang^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *National Application Software Testing Labs, Beijing 100193, China)*

Abstract: The potential effect of land use change on global climate change is attracting more and more attention, but in terms of estimation of terrestrial carbon budget, there have been relatively few studies on the effects of land use change on carbon balance in arid region. The large-scale change of arable land has occurred in Xinjiang, and its influences on the regional carbon balance needs to be discussed. First, we analyzed the annual arable land area change of Xinjiang based on the remote-sensing land use/cover data and the statistical arable land area data. Then, we obtained a set of local parameters for Bookkeeping model by exploring published scientific literature, soil census data and field investigation data. Finally, we analyzed the impacts of arable land change on region carbon balance of Xinjiang from 1975 to 2005 by combining mathematical statistics method and Bookkeeping model. The research shows that: land reclamation and arable land transfer were the major forms of arable land change during 1975-2005. The carbon storage of Xinjiang increased by 20.6 Tg C due to these two change forms, while land reclamation and arable land transfer led to the increments of 51.8 Tg C and -31.2 Tg C, respectively. In the period 1975-1985, owing to the large-scale arable land transfer, the changing trend of carbon storage was mainly impacted by the arable land transfer. With the increase of land reclamation scale, the changing trend of carbon storage was mainly impacted by the land reclamation after 1985. Over the past 30 years, the increase of carbon storage in Xinjiang was mainly caused by the grassland reclamation, while the transfer of arable land to grassland was the main reason for the reduction of carbon storage. Generally speaking, proceeding reasonable land and water development is beneficial to the regional carbon sequestration, and long-term management of farming activities will further enhance the carbon sink function of arable land.

Key words: LUCC; carbon balance; Bookkeeping model; Xinjiang