

DOI: 10.5846/stxb201711302156

孔君洽, 杨荣, 苏永中, 付志德. 基于土地利用/覆被变化的荒漠绿洲碳储量动态评估. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Kong J Q, Yang R, Su Y Z, Fu Z D. Effect of land use and cover change on carbon stock dynamics in a typical desert oasis. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

## 基于土地利用/覆被变化的荒漠绿洲碳储量动态评估

孔君洽<sup>1,2</sup>, 杨 荣<sup>1,\*</sup>, 苏永中<sup>1</sup>, 付志德<sup>3</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 临泽内陆河流域综合研究站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 国家林业局甘肃濒危动物保护中心, 武威 733000

**摘要:**以典型的荒漠绿洲区为研究对象, 基于不同时期土地利用/覆被类型图, 运用 Bookkeeping 模型, 结合土壤、植被碳密度基础资料及调查数据, 评估了近 30 年临泽绿洲土地利用/覆被变化特征及其对碳储量的影响。结果表明: (1) 临泽荒漠绿洲区的土地利用/覆被变化特征主要表现为: 居民及建设用地、耕地、林地呈增加趋势, 增幅分别为 90.2%、75%、46.5%; 盐碱地、水体、沙地、荒漠草地则呈减少趋势, 减幅分别为 73.9%、67.8%、46.2%、5.5%。(2) 30 a 耕地面积增加了 269.38 km<sup>2</sup>, 其中耕地开垦面积为 372.57 km<sup>2</sup>, 开垦主要来源于盐碱地、荒漠草地和沙地, 分别占耕地开垦面积的 24.7%、24.4% 和 21.05%。耕地转变为其他土地覆被类型的面积为 103.19 km<sup>2</sup>, 转变后的主要去向分别是居民及建设用地、盐碱地和荒漠草地, 分别占耕地转变为其他土地覆被类型面积的 32.78%、17.8% 和 15.37%。(3) 土地利用/覆被变化导致总碳储量增加 5.89×10<sup>5</sup>t, 其中土壤碳储量增加量为 4.02×10<sup>5</sup>t, 植被碳储量增加量为 1.86×10<sup>5</sup>t; 耕地变化使碳储量增加 4.91×10<sup>5</sup>t, 其中使碳储量增加的转变分别是荒漠草地—耕地、沙地—耕地、盐碱地—耕地、耕地—林地, 相反的转变则使碳储量减少。总体来看, 临泽荒漠绿洲土地利用/覆被面积和结构均发生了变化, 耕地开垦为最主要的土地利用/覆被变化, 土地利用/覆被变化导致碳储量总体呈增加趋势, 耕地变化是影响碳储量变化的主要因素。

**关键词:**土地利用/覆被变化; Bookkeeping 模型; 碳储量; 耕地开垦; 绿洲

## Effect of land use and cover change on carbon stock dynamics in a typical desert oasis

KONG Junqia<sup>1,2</sup>, YANG Rong<sup>1,\*</sup>, SU Yongzhong<sup>1</sup>, FU Zhide<sup>3</sup>

1 Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

3 Gansu Endangered Animal Protection Center, National Forestry Bureau, Wuwei 733000, China

**Abstract:** Accurate estimations of the effects of land use and cover change (LUCC) on regional carbon stock has become one of the focuses in research on the regional carbon cycle. Based on the map of land use/cover and the data of soil/vegetation carbon density in different periods, the Bookkeeping model was used to assess the effects of LUCC on carbon stocks in the Linze desert oasis over the past 30 years. Results showed three points as follows: firstly, characteristics of LUCC in Linze Oasis were mainly affected by the increase of residential, construction, and arable land and woodland, at the rate of 90.2%, 75.0%, and 46.5%, respectively. At the same time, saline-alkali land, water area, sandy land, and desert grassland showed a decreasing trend at the rate of 73.9%, 67.8%, 46.2%, and 5.5%, respectively. Secondly, the total area of arable land increased by 269.38 km<sup>2</sup>. The new area of agricultural reclamation reached 372.57 km<sup>2</sup>, which was

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2017YFC0504306)

收稿日期: 2017-11-30; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangrong@lzb.ac.cn

mainly from the saline-alkali land, sandy land, and desert grassland, accounting for 24.7%, 24.4%, and 21.05% of the reclaimed arable land, respectively. Meanwhile, 103.19 km<sup>2</sup> of arable land had changed into saline-alkali land, sandy land, and desert grassland, accounting for 32.78%, 17.80%, and 15.37% of the lost arable land, respectively. Thirdly, influenced by the changes of land use in the study area, vegetation, soil, and the total carbon stock increased by  $1.86 \times 10^5$  t,  $4.02 \times 10^5$  t, and  $5.89 \times 10^5$  t, respectively. The carbon stock increased by  $4.91 \times 10^5$  t due to the changes of arable land, in which, transition processes from desert grassland, sandy land, woodland, and saline-alkali land to arable land led to an increase in carbon stock, while the reverse processes led to a decreasing trend in carbon stock. Overall, both the area and the structure of land use/cover types in Linze Oasis had changed over past 30 years, in which, the reclamation of arable land was the main change process. More importantly, land use/cover change led to a total increase in carbon stock in Linze Oasis, which can be mainly explained by the change of arable land.

**Key Words:** land use/cover change; Bookkeeping model; carbon stocks; arable land reclamation; oasis

人类活动对气候变化的影响是当前生态环境面临的紧迫挑战之一,土地利用/覆被变化(Land Use and Cover Changes, LUCC)作为人类活动影响气候变化最直接的表现形式,其对陆地生态系统碳循环的影响已成为当前气候变化研究领域的重要内容<sup>[1-3]</sup>。LUCC 可以通过改变生态系统的结构和功能来影响生态系统碳循环过程<sup>[4]</sup>,同时土地覆被变化过程中往往伴随着大量的碳交换,影响着陆地生态系统的碳储存和释放<sup>[5-6]</sup>。据 IPCC 报告<sup>[7]</sup>,LUCC 每年导致的碳排放量为  $1.5 \times 10^9$  t,已成为仅次于化石燃料燃烧的第二大温室气体排放源,同时 IPCC 报告也指出 LUCC 是导致陆地生态系统碳储存的主要因素。研究发现,近年来中国 LUCC 导致碳储量每年约增加  $0.24 \times 10^9$ — $0.61 \times 10^9$  t,其中频繁的农林活动对碳收支产生的影响不容忽视<sup>[8]</sup>。然而在区域碳收支的估算中,LUCC 仍是估算区域生态系统碳储存和释放的最大不确定因素<sup>[9]</sup>。因此,精确评估 LUCC 对陆地生态系统碳收支的影响,寻求更为合理的土地利用方式及管理,对平衡区域碳收支状况和理解人类活动对生态环境的影响具有重要意义。

在探究区域气候变化和人类活动对环境的影响过程中,对土地利用生态效应的研究逐渐深入,有关 LUCC 对陆地生态系统碳收支影响的研究也日趋增加<sup>[4]</sup>。在研究区域方面,国外学者通常关注大洲或国家层面<sup>[10-11]</sup>的 LUCC 对碳收支的影响,如 Houghton 等<sup>[10]</sup>结合历史土地利用变化数据与陆地碳循环模型计算美国陆地生态系统碳收支变化,Hirsch 等<sup>[11]</sup>对巴西亚马逊地区森林干扰和森林恢复两类主要土地利用变化造成的碳储量变化进行研究。我国学者更多关注流域、省域<sup>[12-13]</sup>及乡村、农林交错带、喀斯特地区、黄土丘陵区<sup>[14-17]</sup>等典型生态区 LUCC 的碳储存与碳释放变化特征;如魏文佳等<sup>[12]</sup>对比研究太湖流域和呼伦湖流域所有土地利用类型的碳库变化,揣小伟等<sup>[13]</sup>以江苏省为研究对象综合考虑整个生态系统来探讨 LUCC 对植被和土壤碳储量的影响。在研究方法方面,一些学者采用经验统计模型、IPCC 清算法<sup>[12]</sup>、遥感模型<sup>[18]</sup>以及 TEM、LPJ 等<sup>[19-20]</sup>生态系统过程模型来探讨 LUCC 对碳收支的影响。Houghton 等<sup>[10,21-24]</sup>根据不同生态系统和不同的地理区设定固定参数建立的“簿记”(Bookkeeping)模型为最常见的经验统计模型,该模型经过多年修正完善不仅被广泛应用于美国<sup>[10]</sup>、中国<sup>[25]</sup>、中亚<sup>[26]</sup>等大尺度区域,也对具有独特地理环境特征的典型区域研究最为行之有效。除上述基于不同区域和方法的研究外,还有一些研究着重探讨不同的土地利用类型的转换对植被或者土壤碳储量的影响,如 Guo 等<sup>[27]</sup>揭示草地和原始森林转变为人工林及农田后土壤碳储量的变化特征。虽然此类研究从不同角度探讨了 LUCC 对陆地生态系统碳收支的影响,但有关干旱半干旱区 LUCC 对碳收支影响的研究较为缺乏,对支撑干旱半干旱区的独特地理单元荒漠绿洲的研究更是为之甚少,这限制了全面理解生态系统碳循环过程的多样性。

自上世纪 50 年代以来,中国西北干旱区持续的绿洲农业土地开发使土地覆被发生了显著变化<sup>[28]</sup>。以河西走廊中段临泽荒漠绿洲为例,在过去 35 年流域水土资源开发致使绿洲面积增加了近 1.5 倍<sup>[29]</sup>,这种在干旱气候条件下以荒漠为基质,依托水分条件发育的独特绿洲景观,迭加了自然植被生态体系与人工生态体系,其

植被和土壤碳密度状况有别于其他地区<sup>[30]</sup>。因此,本研究选择河西走廊中段荒漠绿洲区临泽县,结合土地利用和植被、土壤碳密度数据,基于 Bookkeeping 模型研究干旱荒漠绿洲区 LUC 对碳储量的影响,在客观评估区域碳储量状况的基础上,以期理解荒漠绿洲生态系统 LUC 对区域碳循环的响应机制,为区域合理的土地利用管理和决策提供参考依据,有利于荒漠绿洲区甚至干旱区的稳定可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为河西走廊中段临泽县(99°51'—100°30'E, 38°57'—39°42'N),隶属于甘肃省张掖市,总面积为 2679 km<sup>2</sup>(图 1)。该区为典型的荒漠绿洲过渡带,内部以绿洲为主,绿洲外围分布着大面积的荒漠和戈壁。本区为典型的温带大陆性荒漠气候,年平均气温为 7.7℃,多年平均降水量为 118 mm,年平均潜在蒸散量达 2390 mm,无霜期 165 d。主要地带性土壤类型为灰棕漠土和灰钙土,绿洲北部边缘由于与巴丹吉林沙漠南缘相接,长期受到风沙侵袭,形成非地带性的沙质土;近几十年来开垦的绿洲农田通过不同形式的田间管理,形成了灌淤旱耕人为土。林地以人工林地和河岸树林为主,主要树种为小叶杨、红柳、沙枣、梭梭等;荒漠戈壁植被稀少,以红砂、泡泡刺、猪毛菜、碱蓬等为主;耕地以种植玉米、小麦为主。

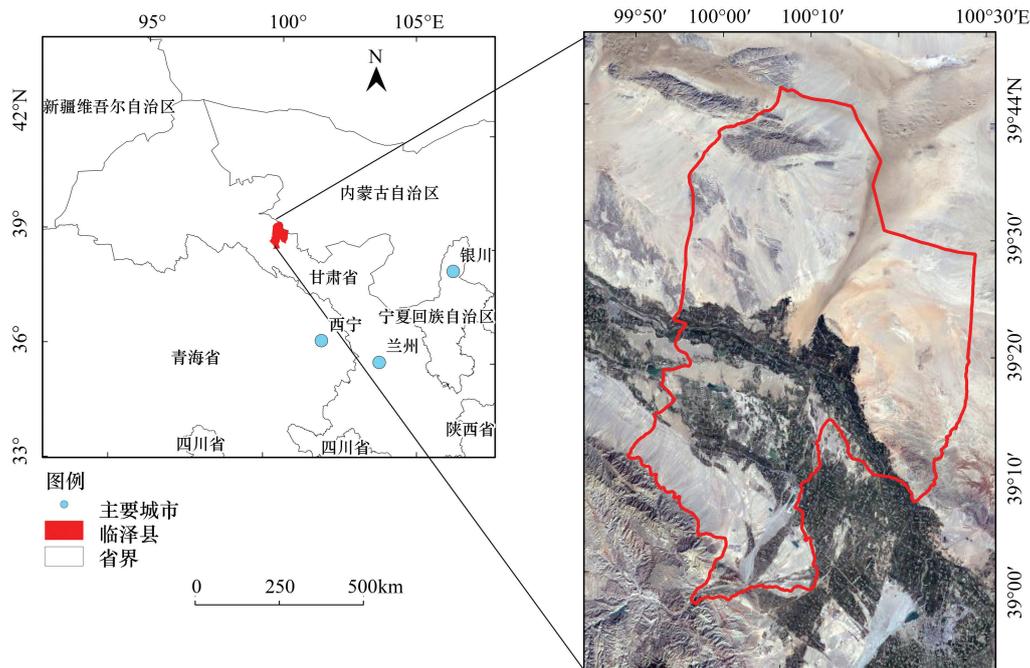


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 The sketch map of the study area

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 土地利用/覆被变化数据

以 TM、ETM 为数据源,经过几何校正、辐射校正、影像增强和图像裁剪等预处理,基于 ENVI 遥感图像处理软件目视解译出 1987、1996、2005 和 2016 年 4 期土地利用/覆被变化数据,经精度评价 Kappa 系数分别为 73.78%、79.88%、80.46% 和 82.86%。在便于碳储量计算的前提下,根据中国科学院土地利用覆盖分类体系整合不同等级土地利用分类信息,将研究区分为林地、耕地、水体、裸地及裸岩、居民及建设用地、荒漠草地、盐碱地和沙地 8 种土地利用类型,其中高覆盖草地、灌木林地归为林地。最后利用 Arcgis10.0 计算出 1987—1996 年、1996—2005 年和 2005—2016 年土地利用转移矩阵获取土地利用转移面积数据。

### 1.2.2 土壤与植被碳密度数据

本研究中植被和土壤碳密度数据采用实地采样和文献获取相结合的方法,参考文献的研究区均为临泽荒漠绿洲区(表1)。对实地采样的土壤数据,每种土地利用类型采用环刀法按样方取0—20 cm土样测定土壤容重,同时将风干后的土壤样本过筛后重铬酸钾外加热法测土壤有机碳含量。其中土壤有机碳密度( $g/m^2$ )计算方法如下:

$$C_d = 0.58 \times C \times h \times \rho \times 10^3$$

式中,常数0.58为土壤有机质转换成土壤有机碳的转换系数; $C$ 为样品土壤有机质含量( $g/kg$ ); $h$ 为土壤有机质含量为土层厚度( $h=0.2 m$ ); $\rho$ 为土壤容重( $g/cm^3$ )。

对实地采样的植被数据,乔木生物量的获取采用IPCC森林生物量估算法<sup>[36-37]</sup>,灌木和草本按样方取样后清洗干净阴干后测定鲜重,烘干至恒重记录其生物量干重;乔木、灌木、草本分别采取0.520、0.445、0.327碳含量转换系数<sup>[38]</sup>转化为碳密度。本文林地、草地植被碳密度取二者平均值。

表1 不同土地覆被类型植被和土壤碳密度

Table 1 Vegetation and soil carbon density of different land use types

土地利用类型 Land use types	植被碳密度 Vegetation carbon density/( $g C/m^2$ )	土壤碳密度 Soil carbon density/ ( $g C/m^2$ )	资料来源 Data sources
荒漠草地 Desert grassland	65	420	Zhang等(2013) <sup>[31]</sup> ,王敏和苏永中等 <sup>[32]</sup>
耕地 Arable land	1150	2330	Liu等(2011) <sup>[33]</sup> ,Li等(2013) <sup>[34]</sup> *
盐碱地 Saline-alkali land	165	1820	Liu等(2010) <sup>[35]</sup> #
林地 Woodland	2059	2400	实地采样
裸地裸岩 Bare land	50	620	实地采样
沙地 Sandy land	232	222	实地采样

#该文献提供的植被碳密度只代表地上部分,利用根冠比计算植被碳密度<sup>[39]</sup>; \* 该文献提供的生物量采样0.43的转化系数转化为植被碳密度

### 1.3 研究方法

本研究应用Bookkeeping模型计算LUCC导致的碳储量变化量,模型定义的主要土地利用变化(干扰)包括:开垦耕地和牧场、弃耕、木材采伐、造林及转变种植。Bookkeeping模型计算的碳储量变化量 $\Delta C$ 可以用如下公式表达:

$$\Delta C = \sum_{t=1}^{\min(T,N)} \Delta SOC_t + \Delta VC_t$$

式中, $N$ 为研究年限; $T$ 表示碳密度达到稳定时所需要的时间; $\Delta SOC_t$ 为第 $t$ 年土壤碳储量变化量; $\Delta VC_t$ 为第 $t$ 年植被碳储量变化量。

#### 1) 研究时段内第 $t$ 年LUCC导致的土壤碳储量变化量

$$\Delta SOC_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^t A_{i,j,n} \times SD_{i,j,t}$$

式中, $i,j$ 表示土地利用/覆被类型; $m$ 表示土地利用/覆被类型;总数 $n$ 表示第 $n$ 年, $0 \leq n \leq t$ ;  $A_{i,j,n}$ 表示第 $n$ 年土地利用/覆被类型 $i$ 向 $j$ 转换的面积, $SD_{i,j,t}$ 表示土地利用/覆被类型 $i$ 向 $j$ 转换后在第 $t$ 年的土壤碳密度变化速率,表示如下:

$$SD_{i,j,t} = (SD_{i,j,t_2} - SD_{i,j,t_1}) / (t_2 - t_1)$$

式中, $SD_{i,j,t_2}$ 、 $SD_{i,j,t_1}$ 为土地利用/覆被类型 $i$ 向 $j$ 转换后在 $t_2$ 和 $t_1$ 不同生长或恢复阶段的土壤碳密度, $t_1 \leq t \leq t_2$ 。

#### 2) 研究时段内第 $t$ 年LUCC导致的植被碳储量变化量

$$\Delta VC_t = \Delta VC_{原地} - \Delta VC_{移走}$$

式中,  $\Delta VC_{\text{原地}}$  为第  $t$  年留在原地的植被碳储量变化量;  $\Delta VC_{\text{移走}}$  为第  $t$  年移走的植被碳储量变化量。

$$\Delta VC_{\text{原地}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^t A_{i,j,n} \times VD_{i,j,t}$$

式中,  $VD_{i,j,t}$  表示土地利用/覆被类型  $i$  向  $j$  转换后在第  $t$  年的植被碳密度变化速率:

$$VD_{i,j,t} = (VD_{i,j,t_2} - VD_{i,j,t_1}) / (t_2 - t_1)$$

式中,  $VD_{i,j,t_2}$ ,  $VD_{i,j,t_1}$  为土地利用/覆被类型  $i$  向  $j$  转换后在  $t_2$  和  $t_1$  两个不同生长或恢复阶段的植被碳密度,  $t_1 \leq t \leq t_2$ 。

$$\Delta VC_{\text{移走}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^t A_{i,j,n} \times \frac{VD_i \times a_k}{x_k}$$

式中,  $VD_i$  表示土地利用/覆被变化  $i$  的植被碳密度,  $a_k$  表示  $x_k$  年氧化速率的植被碳储量占总碳储量的比例; 本文假设其利用方式仅为焚烧薪柴, 且氧化速率为 1 年。综上, Bookkeeping 所需参数如下:

表 2 Bookkeeping 模型参数  
Table 2 Parameters of Bookkeeping Model

模型参数 Model parameters	荒漠草地 Desert grassland	耕地 Arable land	沙地 Sandy land	林地 Woodland	盐碱地 Saline-alkali land	裸地裸岩 Bare land
未扰动的生态系统中植被碳密度 Carbon in vegetation of undisturbed ecosystems/(t/km <sup>2</sup> )	6.5	—	232	2059	165	50
恢复后的生态系统中植被碳密度 Carbon in vegetation of recovered ecosystems/(t/km <sup>2</sup> )	6.5	—	232	2059	165	50
未扰动的生态系统中土壤碳密度 Carbon in soil of undisturbed ecosystems/ (t/km <sup>2</sup> )	420	2330	221	2400	1820	620
恢复后的生态系统中土壤碳密度 Carbon in soil of recovered ecosystems/ (t/km <sup>2</sup> )	420	2330	221	2400	1820	620
弃耕后系统恢复所需要的时间 Time required for an abandoned system to recover/a	—	20	—	—	—	—
农作物的植被碳密度 Carbon in crops/(t/km <sup>2</sup> )	—	1150	—	—	—	—
稳定农田生态系统中土壤碳密度 Minimum carbon content of soil in cultivated system/(t/km <sup>2</sup> )	—	2330	—	—	—	—
耕作过程中土壤碳密度达到最小值所需时间 Time required for carbon in soil to reach minimum value during cultivation/a	—	20	—	—	—	—
弃耕后土壤碳达到恢复后水平所需要的时间 Time required for soil carbon to reach recovered level in an abandoned system/a	—	20	—	—	—	—
清理后以枯枝落叶形式遗留在土壤中的部分 Fraction of carbon in vegetation left dead in soil at time of clearing	0.5	—	0.5	0.33	0.5	0.5
清理后移走植被碳库 1 年氧化速率 Fraction of carbon in vegetation assigned to decay pools after clearing	0.5	—	0.5	0.4	0.5	0.5

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区近 30 年土地利用/覆被变化特征

研究区土地利用类型以荒漠草地、耕地、裸土裸岩和沙地为主,占研究区土地面积的 90%以上,水体、居民及建设用地和林地仅占 4%左右。在 1987—2016 年的 30 年间,耕地、林地和居民及建设用地面积呈增加趋势,分别增加 269.42、17.04 km<sup>2</sup>和 15.49 km<sup>2</sup>,增幅分别为 75%、46.5%和 90.2%,其中耕地增加面积最多,但增幅最高的为居民及建设用地,其次为耕地;沙地、盐碱地、荒漠草地及水体呈减少趋势,面积分别减少 114.59、94.41、63.23 km<sup>2</sup>和 36.47 km<sup>2</sup>,减幅分别为 46.2%、73.9%、5.5%和 67.8%,其中沙地减少面积最多,但减幅最高的为盐碱地,其次为水体和沙地,荒漠草地占研究区面积比重最大但减幅最小(图 2,表 3)。

对比研究区不同时段土地利用/覆被变化规律,结果表明:1987—1996 年是区域内水土资源开发的初期,居民及建设用地和耕地小幅扩张,增幅分别为 23.4%、17.5%,其他土地利用/覆被类型的变化不明显。1996—2005 年是区域水土资源大规模开发的时段,虽然沙地、荒漠草地及林地变化不明显,甚至较上时段变幅有所减小,但该时段耕地面积增加和水体面积减少最显著,变幅分别达 23.3%、40.1%,盐碱地与居民及建设用地的变幅也达到 3 个研究时段内最大,变幅分别达 54.6%、27.7%。2005—2016 年区域水土资源开发较上个时段有所减缓,耕地和水体面积变动逐渐放缓,林地、沙地和荒漠草地较前两个时段的变动明显,变幅分别为 54.84%、34.5%和 3.6%。

表 3 不同时期各土地利用类型变化面积与幅度  
Table 3 Area and extent of land use change in different periods

土地利用类型 Land use types	1987— 1996/km <sup>2</sup>	变幅 Range of variation/%	1996— 2005/km <sup>2</sup>	变幅 Range of variation/%	2005— 2016/km <sup>2</sup>	变幅 Range of variation/%	30 年变幅 Total range of variation/%	平均变化速率 Average rate of change/ (km <sup>2</sup> /a)
耕地 Arable land	62.63	17.50%	97.66	23.30%	109.1	21%	75%	8.98
盐碱地 Saline-alkali land	-17.48	16.90%	-46.89	54.60%	-12.04	30.90%	-73.90%	2.55
沙地 Sandy land	-30.9	12.50%	-13.23	6.10%	-70.46	34.50%	-46.20%	3.82
林地 Woodland	-1.02	2.80%	-0.95	2.70%	19.01	54.80%	46.50%	0.57
荒漠草地 Desert grassland	-23.19	1.50%	-5.91	0.40%	-54.16	3.60%	-5.50%	2.78
居民及建设用地 Residential and construction land	4.02	23.40%	5.88	27.70%	5.6	20.70%	90.20%	0.52
水体 Water area	-7.39	13.70%	-18.75	40.10%	-10.33	37.40%	-67.80%	1.22

### 2.2 研究区近 30 年耕地变化动态

总体来看,1987—2016 年的 30 年间,耕地面积增加了 269.38 km<sup>2</sup>,其中耕地开垦总面积为 372.57 km<sup>2</sup>,主要来源于盐碱地,其次为荒漠草地、沙地及林地,四类来源开垦为耕地的面积占耕地开垦总面积的 78%;耕地转变为其他土地利用类型的面积为 103.19 km<sup>2</sup>,主要转变为居民及建设用地、荒漠草地和盐碱地,转变为三者的面积占耕地转变为其他土地利用类型面积的 66%(图 3)。

耕地开垦的不同来源占耕地开垦总面积的比重存在差异。沙地和荒漠草地开垦为耕地的面积占耕地开垦总面积的比重呈现先降低后升高的趋势,但沙地开垦为耕地所占比重在 1987—1996 年达到最高,荒漠草地开垦为耕地所占比重在 2005—2016 年达到最高,二者占比分别为 25%和 34.5%。盐碱地开垦为耕地的面积占耕地开垦总面积的比重呈现出先升高后降低的趋势,在 1996—2005 年间达到最高 34.4%。3 个时段内林地开垦为耕地的面积占耕地开垦总面积的比重较小且变化不大,与盐碱地相似,在 1996—2005 年占比达到最高 8.6%。

耕地转变后的不同去向占耕地转变为其他土地覆被类型总面积的比重存在差异。耕地转变为居民及建

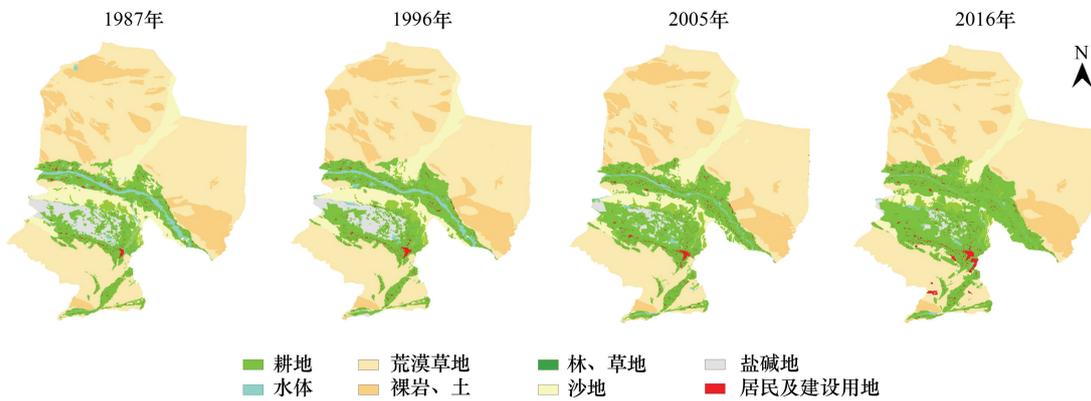


图 2 研究区 1987—2016 年土地利用变化空间格局

Fig.2 Spatial pattern of the land use in study area from 1987 to 2016

设用地是耕地转变的主要方向,3 个时段耕地转变为居民及建设用地的面积占耕地转变为其他土地覆被类型面积的比重为 32.8%,占比在 1996—2005 年达到最高;耕地转变为盐碱地和荒漠草地所占比重分别为 17.8% 和 15.4%,是耕地转变后的次要方向,二者占比分别在 1987—1996 年和 1996—2005 年达到最高。

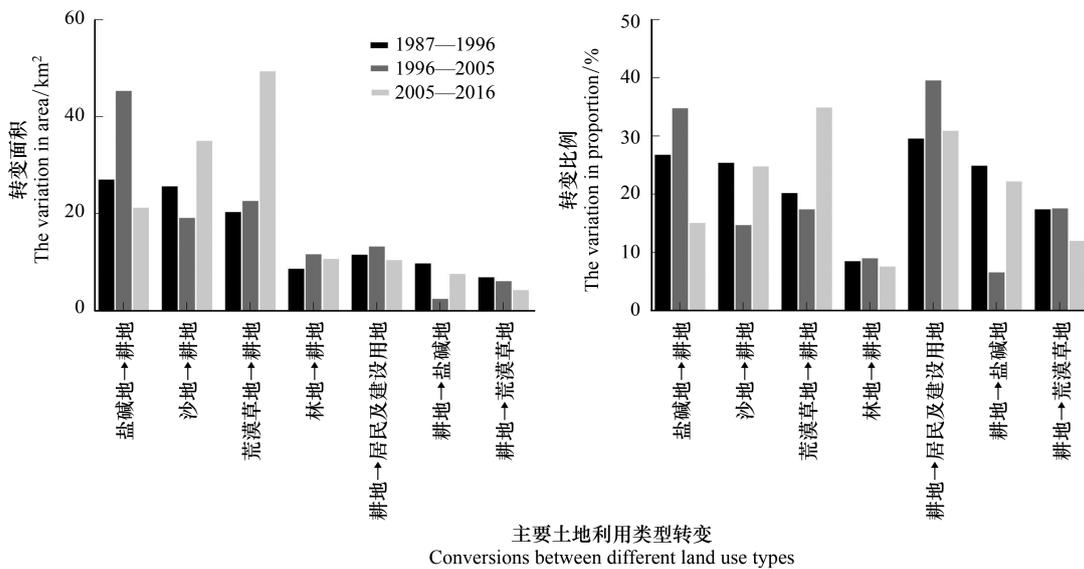


图 3 不同时期主要土地利用类型转变面积及占比

Fig.3 Land use change area and proportion of different periods

### 2.3 土地利用/覆被变化对碳储量影响特征

通过分析不同时段以及整个研究时段内各土地利用类型变化导致的植被、土壤及总碳储量变化量来探讨 LUCC 对研究区碳储量影响的动态特征。从各时段 LUCC 导致的碳储量变化量来看,除林地和裸地裸岩的变化导致碳储量略有减少外,其他土地利用类型变化均导致碳储量增加。其中耕地变化是碳储量增加的主要贡献者,在 3 个时段的增加量分别为  $1.12 \times 10^5$ 、 $1.37 \times 10^5$ 、 $2.42 \times 10^5$ t,其次为沙地,在 3 个时段的增加量分别为  $7.25 \times 10^4$ 、 $5.31 \times 10^4$ 、 $1.72 \times 10^5$ t;与沙地相似,荒漠草地变化导致碳储量的增加呈现出先减少后增加的趋势;林地变化在前两个时段导致碳储量变化不明显,2005—2016 年是林地变化导致碳储量增加最多的时段,碳储量增加量为  $6.62 \times 10^4$ t;而各时段裸地裸岩变化导致碳储量变化量均不大(表 4)。

总体来看,1987—2016 年 30 年间 LUCC 导致的总碳储量增加量为  $5.89 \times 10^5$ t,土壤与植被碳储量增加量分别为  $4.02 \times 10^5$ 、 $1.86 \times 10^5$ t,二者分别占总碳储量增加量的 68.3%和 31.7%。其中 1987—1996 年间,土壤、植

被和总碳储量增加量分别为  $9.59 \times 10^4$ 、 $3.23 \times 10^4$  t 和  $1.28 \times 10^5$  t; 1996—2005 年土壤碳储量较上个时段减少了 9.6%, 植被和总碳储量增加量分别较上个时段增加了 61.6% 和 8.2%; 2005—2016 年, 土壤、植被及总碳储量增加量分别为  $2.20 \times 10^5$ 、 $1.02 \times 10^5$  t 和  $3.22 \times 10^5$  t, 该时段是整个研究时段内土壤、植被及总碳储量增加量最多的时段(图 4)。

表 4 不同时期各土地利用类型碳储量变化/( $10^4$ t)

Table 4 Carbon storage changes of different land use types in different periods

土地利用类型 Land use tapes	1987—1996 年		1996—2005 年		2005—2016 年		总计 Total		
	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	总计 Total
盐碱地 Saline-alkali land	1.32	1.71	1.89	3.86	0.82	1.19	4.03	6.76	10.79
沙地 Sandy land	5.62	1.63	4.02	1.29	11.8	5.35	21.44	8.28	29.72
荒漠草地 Desert grassland	3.12	0.98	2.43	1.58	9.43	4.26	14.98	6.82	21.8
林地 Woodland	0.93	-0.90	1.02	-1.36	4.58	2.04	6.53	-0.22	6.31
裸地裸岩 Bare land	0.24	-0.25	-0.43	-0.17	0.65	0	0.46	-0.42	0.04
耕地 Arable land	7.93	3.30	8.42	5.25	16.66	7.51	33.02	16.04	49.06
总碳储量 Total carbon stocks	9.59	3.23	8.67	5.22	21.97	10.18	40.23	18.63	58.86

因各土地利用类型的转换是相互的,总碳储量变化是各土地利用类型碳储量变化之和的 1/2

## 2.4 耕地变化对碳储量的影响特征

30 年间研究区耕地变化使碳储量增加  $4.9 \times 10^5$  t, 土壤碳储量增加  $3.3 \times 10^5$  t, 植被碳储量增加  $1.6 \times 10^5$  t, 其中耕地变化是研究区碳储量增加的主要贡献者(表 5)。本研究重点关注耕地开垦和与之相反的耕地转变为其他土地覆被类型对碳储量的影响, 其中耕地开垦对碳储量的影响主要表现在沙地、荒漠草地、盐碱地和林地开垦为耕地引起的碳储量变化, 耕地转变为其他土地覆被类型对碳储量的影响主要表现在与耕地开垦相反的转变引起的碳储量变化。

在耕地开垦情形下, 30 年间耕地开垦使碳储量增加  $5.8 \times 10^5$  t, 其中土壤碳储量增加  $3.9 \times 10^5$  t, 植被碳储量增加  $1.9 \times 10^5$  t。主要土地利用类型开垦为耕地对碳储量的影响存在差异: 荒漠草地、沙地和盐碱地开垦为耕地碳储量呈

增加趋势, 林地开垦为耕地碳储量呈减少趋势。荒漠草地开垦为耕地是研究区耕地开垦情形下对碳储量影响最大的土地利用变化, 30 年间由荒漠草地开垦引起的碳储量增加量为  $2.7 \times 10^5$  t, 约占耕地开垦总碳储量增加量的 46.5%; 沙地开垦为耕地引起的碳储量增加量为  $2.3 \times 10^5$  t, 与荒漠草地开垦相似, 由二者开垦引起的土壤碳储量增加量大于植被碳储量的增加量, 2005—2016 年是二者开垦为耕地碳储量增加最多的时段; 盐碱地开垦为耕地引起碳储量增加量为  $1.3 \times 10^5$  t, 土壤碳储量增加量小于植被碳储量的增加量, 其中 1996—2005 年是其开垦为耕地碳储量增加最多的时段。与上面 3 种土地利用类型变化不同的是, 研究时段内林地开垦为耕地碳储量呈减少趋势, 碳储量减少  $5.5 \times 10^4$  t, 其中植被碳储量减少  $5.3 \times 10^4$  t, 土壤碳储量减少量仅为植被碳储量减少量的 3.9%(表 5)。

在耕地转变为其他土地覆被类型的情形下, 30 年间耕地转变为其他土地覆被类型导致碳储量减少  $8.9 \times 10^4$  t, 其中土壤碳储量减少  $5.8 \times 10^4$  t, 植被碳储量减少  $3.1 \times 10^4$  t。耕地转变为不同土地利用类型对碳储量的影响存在差异: 耕地转变为荒漠草地、盐碱地和沙地碳储量呈减少趋势, 而转变为林地碳储量呈增加趋势, 其中耕地转变为荒漠草地是研究区耕地转变为其他土地覆被类型下对碳储量影响最大的土地利用变化方式, 30

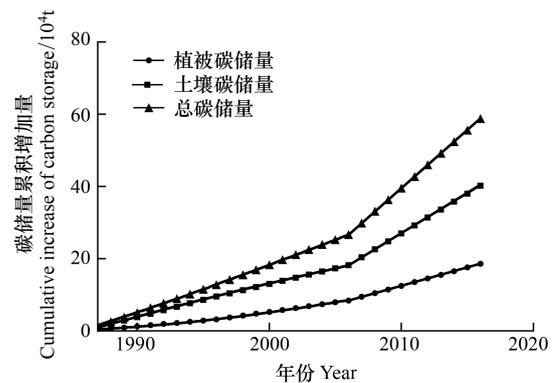


图 4 碳储量累积变化量

Fig.4 Cumulative change of carbon storage

年间由耕地转变为荒漠草地的碳储量减少量为  $4.8 \times 10^4 \text{t}$ , 耕地转变为盐碱地和沙地引起的碳储量减少量分别为  $2.8 \times 10^4$ 、 $2.7 \times 10^4 \text{t}$ , 而耕地转变为林地碳储量增加量为  $1.4 \times 10^4 \text{t}$  (表 5)。

表 5 耕地变化碳储量累积变化量/ $10^4 \text{t}$ 

Table 5 Cumulative change of carbon storage in arable land change

主要转变 Major conversion	1987—1996 年		1996—2005 年		2005—2016 年		总计 Total		
	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	土壤 Soil	植被 Vegetation	总计 Total
盐碱地→耕地 Saline-alkali land conversion to arable land	1.35	2.4	2.29	4.05	1.06	1.87	4.7	8.32	13.02
沙地→耕地 Sandy land conversion to arable land	5.31	2.02	3.94	1.5	7.29	2.77	16.53	6.29	22.82
荒漠草地→耕地 Desert grassland conversion to arable land	3.8	2.1	4.24	2.34	9.35	5.15	17.38	9.58	26.97
林地→耕地 Woodland conversion to arable land	-0.06	-1.41	-0.08	-1.93	-0.07	-1.98	-0.21	-5.32	-5.53
新垦耕地 The reclamation of arable land	10.42	5.11	10.41	5.97	18	8.05	38.83	19.13	57.96
耕地→林地 Arable land conversion to woodland	0.01	0.14	0.03	0.47	0.05	0.7	0.1	1.31	1.41
耕地→沙地 Arable land conversion to sandy land	-0.76	-0.33	-0.81	-0.35	-0.27	-0.12	-1.85	-0.8	-2.65
耕地→盐碱地 Arable land conversion to saline-alkali land	-0.47	-0.92	-0.1	-0.19	-0.36	-0.7	-0.94	-1.81	-2.75
耕地→荒漠草地 Arable land conversion to desert grassland	-1.23	-0.7	-1.07	-0.61	-0.73	-0.41	-3.03	-1.72	-4.75
耕地转变 The conversion of arable land	-2.48	-1.82	-1.99	-0.72	-1.33	-0.54	-5.81	-3.09	-8.9
耕地变化 The change of arable land	7.93	3.3	8.42	5.25	16.66	7.51	33.02	16.04	49.06

### 3 讨论

1987—2016 年的 30 年间, 临泽荒漠绿洲区土地开发大致分为两个阶段: 20 世纪 80 年代中后期至 2006 年土地大面积开垦和绿洲不断扩张的第一阶段, 2006 年后土地开发放缓和绿洲扩张减缓的第二阶段。其主要原因可能为: 80 年代中期至 2002 年间, 省内移民(即两西移民)带来的人口增加促使耕地需求增大, “日元贷款”项目治理了大面积的盐碱地并营造了防风固沙带, 在稳定老绿洲的基础上, 使绿洲进一步向外扩张; 2002—2006 年, 制种玉米的普及使农民获得更多的经济效益, 人们不断开荒以扩大耕地面积, 加之生态移民政策的影响也使绿洲水土开发力度加大。2006 年以后, “黑河分水”和“三禁政策”的实施, 开荒受到了一定的限制, 水土开发力度逐渐减缓。贯穿整个时段, 机械化程度的不断加深、绿洲渠系及其配套工程建设的不断完善等为耕地面积的扩大创造了有利的条件, 在一定程度上进一步促进了绿洲水土资源的开发<sup>[40]</sup>。因此, 30 a 研究区耕地面积增加了  $269.38 \text{ km}^2$ , 表现出稳定增加态势, 绿洲逐渐由内部向外部扩张(图 2)。

在干旱半干旱区, 土地利用方式的转变已被证明是增加区域碳储存的重要方式<sup>[41]</sup>, 本项研究表明, 研究区沙地、荒漠草地、盐碱地、林地和耕地变化均导致碳储量增加, 其中耕地变化是碳储量增加的主要贡献者。就耕地变化对土壤碳储量的影响而言, 土壤碳库及其动态主要取决于土壤中碳(植物残体)的输入与流失(有

机质的分解)之间的平衡,LUCC 会改变进入土壤中的植物残体量,并影响土壤有机碳的分解损失量,打破了土壤有机碳的平衡,使土壤碳密度发生改变<sup>[42-43]</sup>;同时适当的施肥措施、覆盖耕作管理、种植方式等农田管理措施对土壤碳库的影响也不容忽视<sup>[44]</sup>。就耕地变化对植被碳储量的影响而言,LUCC 会导致植被碳的转移,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,另一部分植被碳以不同的方式被利用移走,最终进入大气;在不同土地类型与耕地转变过程中,遗留生物量、移走生物量利用方式、氧化速率及转变后系统生物量恢复所需时间不同,会造成转换后植被碳密度发生改变。受不同土地利用转移面积和土壤与植被碳密度差异的影响,不同土地利用类型开垦为耕地对碳储量的影响存在差异。沙地开垦为耕地 10 a 后土壤碳储量增加量为  $5.31 \times 10^4$  t,开垦为耕地 30 a 后土壤碳储量累积增加  $1.65 \times 10^5$  t,即沙地开垦为灌溉农田后土壤表现出巨大的固碳潜力,开垦不同年限的土壤有机碳养分有明显的积累,与一些研究结果一致;如 Li 等<sup>[45]</sup>在河西走廊高台绿洲的研究表明,沙地开垦为灌溉农田 10 a 后,土壤有机碳贮量显著增加;苏永中等<sup>[44,46]</sup>在临泽绿洲的研究表明,沙地开垦为灌溉农田的 40 a 后土壤有机碳含量增加了 6.4 倍,但沙地土壤向可持续耕作土壤的演化至少需要 50 年,要实现土地可持续利用和生产力的持续提高,须采取提升土壤肥力水平的农田管理措施。研究表明,干旱区沙地土壤开垦为灌溉农田后,增施有机肥、秸秆覆盖还田、种植多年生苜蓿或苜蓿插入轮作体系是培肥地力的有效农田管理措施<sup>[43]</sup>。荒漠草地是西北干旱区的主导性土地利用类型,是绿洲土地开发的目标和后备,土地开发导致原始荒漠草地转变为农田,农作物取代荒漠植被,改变了荒漠生态系统较为封闭的碳循环模式<sup>[47]</sup>。本研究结果表明,荒漠草地开垦为耕地碳储量增加量为  $2.70 \times 10^5$  t,占耕地开垦总碳储增加量的 46.5%,而王渊刚等<sup>[47]</sup>基于相似荒漠绿洲研究区的玛纳斯河流域的估算结果为 54.3%。存在差异的主要原因可能为:一方面不同的土地利用类型的划分导致荒漠草地类型界定上存在差异;另一方面,土壤和植被碳密度是直接影响土壤和植被碳储量的主要因素,本研究中荒漠草地植被和土壤碳密度远小于玛纳斯河流域。王渊刚等采用公开发表文献中的数据获取植被和土壤碳密度数据,而本文采用的植被和土壤碳密度数据来自于同一研究区基于实地采样的 748 个数据,较前者更为准确。

本研究在利用 Bookkeeping 模型探讨 LUCC 对碳储量的影响时,研究结果的不确定性主要源于模型所需参数、土地利用变化数据和碳密度数据的误差<sup>[48]</sup>。首先,模型所用参数是根据不同的地区和不同的生态系统设置的<sup>[21-22]</sup>,具体参数的选取可能与实际自然条件不相符合,参数选取时应当更多地参考研究区域的自然特征。其次,本研究默认土地利用变化为匀速变化,且各土地利用/覆被类型的土壤和植被碳密度是依据某一固定年份获取的,若需准确定量评估研究区 LUCC 对碳储量的影响,需要对土地利用类型转变后土壤和植被碳密度进行长时间序列的跟踪监测,同时将高精度遥感数据和统计资料相结合提取逐年土地覆被变化数据,将有助于提高估算精度保证估算的可靠性。另外,考虑到居民及建设用地、水域与耕地相互转换的面积相对较小,并且其变化对碳密度的影响机制尚不清楚,本研究没有考虑水域、居民及建设用地与耕地的相互转换对区域碳收支的影响,这些问题都有待于随水域、居民及建设用地变化对碳收支影响机理认识的深入而逐步得到解决。最后,鉴于 LUCC 对表层土壤碳密度影响最为显著,本文以 0—20 cm 取样深度的土壤碳密度来估算土壤碳储量,同时碳密度数据的不同来源和计算方法可能会导致碳储量估算不够精确,因此,可针对不同的土地覆被类型,实地采样获取碳密度数据以提高估算精度。

水资源是制约干旱区土地资源开发利用和农林牧业发展的主要自然因素,水资源的多寡将直接影响绿洲的面积和稳定<sup>[49-50]</sup>。研究区地处黑河流域中游区域,灌溉水源以河水为主,所以黑河的消长从某种程度上决定了研究区绿洲土地利用的兴衰。30 a 临泽绿洲研究区水体面积减少了  $36.47 \text{ km}^2$ ,耕地转变为其他土地利用类型的面积  $103.19 \text{ km}^2$ ,其中转变为盐碱地、荒漠草地的面积为  $18.38$ 、 $15.56 \text{ km}^2$ ,说明人类土地利用活动的扰动使得区域水资源状况急剧恶化,以致现有水资源状况无法承载已垦殖的耕地。虽然耕地在土地利用转变中表现出巨大的固碳潜力,但若超出区域水资源所能承载的限度无节制的开垦耕地,必然会造成土地盐碱化、荒漠化逆转、水土流失等生态环境问题。可见在干旱的临泽荒漠绿洲区,自然条件和人类活动共同驱动下的土地利用/覆被变化,对区域的可持续发展产生了影响。因此,从维持区域生态平衡的角度出发,重视对临泽

荒漠绿洲区水土资源的合理开发与配置,对荒漠绿洲生态系统的稳定发展意义重大。

#### 4 结论

在 1987—2016 年的 30 年间,临泽荒漠绿洲的土地开发使耕地表现出稳定增加、绿洲逐渐由内向外扩张的态势,影响土地开发的因素主要包括自然因素和人文因素,其中以水资源为主的自然因素是决定绿洲土地开发的主导因素,人口增加、政策驱动、技术进步等人文因素则加剧了绿洲的土地开发。LUCC 导致碳储量增加量为  $5.89 \times 10^5 \text{ t}$ ,其中耕地变化导致碳储量增加  $4.91 \times 10^5 \text{ t}$ ,是影响区域碳储量变化的主要因素。对耕地而言,主要土地利用类型与耕地的转换对碳储量的影响存在差异,使碳储量增加的转变分别是荒漠草地—耕地、沙地—耕地、盐碱地—耕地、耕地—林地,相反的转换则使碳储量减少;要实现耕地的可持续利用和生产力的持续提高,仍须采取必要的农田管理措施。由于河西走廊地区缺乏对荒漠绿洲生态系统土地利用碳收支的估算成果,因此,本研究有利于进一步深化人类活动对荒漠绿洲生态系统影响的认识。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Shevliakova E, Pacala S W, Malyshev S, Hurtt G C, Milly P C D, Caspersen J P, Sentman L T, Fisk J P, Wirth C, Crevoisier C. Carbon cycling under 300 years of land use change: Importance of the secondary vegetation sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2022.
- [ 2 ] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. *生态学报*, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [ 3 ] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 陈佑启, Verburg P H. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468.
- [ 4 ] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖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.
- [ 5 ] Bolin B, Sukumar R, Ciais P, Cramer W, Jarvis P, Ksheshgi H, Nobre C, Semenov S, Steffen W. *Global perspective*//Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Dokken D J, eds. *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 23-51.
- [ 6 ] Canadell J G. Land use effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Science in China (Series C)*, 2002, 45(s1): 1-9.
- [ 7 ] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 123-124.
- [ 8 ] 付超, 于贵瑞, 方华军, 王秋风. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 88-96.
- [ 9 ] Levy P E, Friend A D, White A, Cannell M G R. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. *Climatic change*, 2004, 67(2/3): 185-209.
- [ 10 ] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. Carbon Budget: Contributions from Land-Use Change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [ 11 ] Hirsch A I, Little W S, Houghton R A, Scott N A, White J D. The net carbon flux due to deforestation and forest re-growth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 908-924.
- [ 12 ] 魏文佳, 桂智凡, 薛滨, 段洪涛, 姚书春, 李相憲. 土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响——以太湖流域和呼伦湖流域为例. *第四纪研究*, 2012, 32(2): 327-336.
- [ 13 ] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 张梅, 廖启林, 赖力, 卢俊宇. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. *资源科学*, 2011, 33(10): 1932-1939.
- [ 14 ] 赵玮, 胡中民, 李胜功, 郭群, 杨浩, 张铜会. 内蒙古农牧交错带土地利用变化对土壤碳储量的影响研究 (英文). *地理学报*, 2017, 27(8): 999-1010.
- [ 15 ] 蔡广鹏, 韩会庆, 张凤太, 郜红娟, 朱建. 喀斯特地区贵州省绥阳县土地利用/覆被变化对陆地植被碳储量的影响. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 122-124, 130-130.
- [ 16 ] 刘迎春, 王秋风, 于贵瑞, 朱先进, 展小云, 郭群, 杨浩, 李胜功, 胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. *生态学报*, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [ 17 ] 武俊喜, 程序, 焦加国, 肖红生, 杨林章, 王洪庆, 张福锁, Ellis E C. 1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中土地利用覆被及其土壤有机碳储量变化. *生态学报*, 2010, 30(6): 1397-1411.
- [ 18 ] 柳梅英, 包安明, 陈曦, 刘海隆, 张红利, 陈晓娜. 近 30 年玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 926-938.
- [ 19 ] Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan S F, Liu J Y, McGuire A D, Moore III B. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 2003, 37(3/4): 201-217.
- [ 20 ] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.

- [21] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, Moore B, Peterson B J, Shaver G R, Woodwell G M. Changes in the Carbon Content of Terrestrial Biota and Soils between 1860 and 1980: A Net Release of CO<sub>2</sub> to the Atmosphere. *Ecological Monographs*, 1983, 53(3): 235-262.
- [22] Houghton R A. Terrestrial sources and sinks of carbon inferred from terrestrial data. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1996, 48(4): 420-432.
- [23] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(2): 298-313.
- [24] 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: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378-390.
- [25] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 潘娜, 王梦麦. 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: 地球科学*, 2008, 38(2): 197-210.
- [26] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 王渊刚, 黄小涛, 张琪, 蔡鹏. 1975—2005 年中亚土地利用/覆被变化对森林生态系统碳储量的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 397-408.
- [27] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [28] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 1-9.
- [29] 巩杰, 钱大文, 张玲玲, 谢余初, 高彦净. 近 35a 临泽县绿洲-荒漠土地变化及其景观响应. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 805-813.
- [30] 马明国, 王雪梅, 角媛梅, 陈贤章. 基于 RS 与 GIS 的干旱区绿洲景观格局变化研究——以金塔绿洲为例. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 53-58.
- [31] Zhang P P, Shao M A. Spatial variability and stocks of soil organic carbon in the gobi desert of northwestern China. *PLoS One*, 2014, 9(4): e93584.
- [32] 王敏, 苏永中, 杨荣, 杨晓. 黑河中游荒漠草地地上和地下生物量的分配格局. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 209-219.
- [33] Liu W J, Su Y Z, Yang R, Yang Q, Fan G P. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in a typical oasis cropland ecosystem in arid region of Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2247-2257.
- [34] Li F R, Feng Q, Liu J L, Sun T S, Ren W, Guan Z H. Effects of the Conversion of Native Vegetation to Farmlands on Soil Microarthropod Biodiversity and Ecosystem Functioning in a Desert Oasis. *Ecosystems*, 2013, 16(7): 1364-1377.
- [35] Liu W J, Su Y Z, Yang R, Wang X F, Yang X. Land use effects on soil organic carbon, nitrogen and salinity in saline-alkaline wetland. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2010, 2(3): 263-270.
- [36] 程鹏飞, 王金亮, 王雪梅, 岳彩荣, 徐天蜀, 程峰, 周晓, 王小花. 基于样地调查的香格里拉县森林生态系统碳储量与碳密度初步研究. *林业调查规划*, 2011, 36(4): 12-15.
- [37] 杨传金, 杨帆, 梅浩, 刘金山, 戴前石. 区域森林碳储量估算方法概述. *中南林业调查规划*, 2012, 31(3): 62-66.
- [38] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 王玉涛, 康峰峰, 冯仲科, 张彦林, 邓向瑞. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征. *生态学报*, 2008, 28(1): 33-44.
- [39] 马文红, 方精云. 内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 774-778.
- [40] 林兴周. 临泽绿洲时空变化过程及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [41] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environmental management*, 2004, 33(4): 528-544.
- [42] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 138-143.
- [43] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [44] 苏永中, 杨荣, 杨晓, 范桂萍. 农业管理措施对新垦荒漠沙地农田土壤有机碳及其组分的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2867-2876.
- [45] Li X G, Li Y K, Li F M, Ma Q F, Zhang P L, Yin P. Changes in soil organic carbon, nutrients and aggregation after conversion of native desert soil into irrigated arable land. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 263-269.
- [46] Su Y Z, Yang R, Liu W J, Wang X L. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China. *Soil Science*, 2010, 175(5): 246-254.
- [47] 雷春英, 田长彦. 干旱区荒漠新垦土地土壤有机碳含量特征. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(6): 105-110.
- [48] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 韩其飞, 范彬彬, 陈耀亮. 近 50a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对碳储量的影响. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 994-1006.
- [49] 马兴旺, 李保国, 程远. 干旱区水土资源时空变化的定量研究. *干旱区地理*, 2002, 25(2): 109-114.
- [50] 郝丽娜, 粟晓玲. 黑河干流中游地区适宜绿洲及耕地规模确定. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 262-268.