

DOI: 10.5846/stxb201706291173

胡莹洁, 李月, 孔祥斌, 段增强, 陆明环. 1980—2010 年北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Hu Y J, Li Y, Kong X B, Duan Z Q, Lu M H. Response of agricultural land carbon storage to land use change in Beijing from 1980 to 2010. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

## 1980—2010 年北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应

胡莹洁<sup>1,2</sup>, 李月<sup>1,2</sup>, 孔祥斌<sup>1,2,\*</sup>, 段增强<sup>1,2</sup>, 陆明环<sup>3</sup>

1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193

3 河北省承德市城乡规划设计院, 承德 067000

**摘要:** 分析北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应, 对快速城市化和工业化区域及全国农用地低碳利用调控具有重要意义。利用 1980 年第二次土壤普查数据与 2010 年测土配方施肥项目成果土壤数据核算北京市农用地表层土壤碳储量, 利用生物量遥感信息 (NDVI) 模型反演林地、草地植被碳储量, 对北京市土地利用变化造成的农用地碳储量变化进行研究, 结果表明: 1) 1980—2010 年, 北京市农用地碳储量由 75.29 Tg-C 增至 81.13 Tg-C, 增加 5.83 Tg-C, 其中, 土壤碳储量减少 7.51 Tg-C, 植被碳储量增加 13.34 Tg-C; 2) 三十年间, 北京市农用地面积减少  $14.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 其中, 耕地流失最为显著, 主要去向为建设用地和林地, 林地面积略有增加; 3) 北京市用地类型保持不变的农用地土壤碳储量减少  $297.63 \times 10^4 \text{ t}$ , 植被碳储量增加  $1095.21 \times 10^4 \text{ t}$ , 共计增加  $797.58 \times 10^4 \text{ t}$ , 其中, 用地类型保持不变的耕地、林地碳储量增加, 草地碳储量减少; 4) 三十年间, 土地利用类型转化使北京市农用地土壤碳储量减少  $75.71 \times 10^4 \text{ t}$ , 植被碳储量增加  $212.49 \times 10^4 \text{ t}$ , 共计增加  $136.78 \times 10^4 \text{ t}$ , 其他用地类型转为林地使碳储量增加, 有利于碳汇的形成, 林地转出为其他用地类型均会造成一定碳排放; 5) 平原造林、退耕还林等工程有利于增加北京市农用地固碳量。未来北京市可通过控制农用地面积减少量, 优化农用地内部结构, 降低用地类型间的转换频率以提高农用地碳储量。本研究可为其他区域及全国在快速城市化工业化过程中提升农用地碳储量提供一定参考。

**关键词:** 北京市; 农用地; 碳储量; 土地利用变化; 土壤碳密度; 植被碳密度

## Response of agricultural land carbon storage to land use change in Beijing from 1980 to 2010

HU Yingjie<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1,2</sup>, KONG Xiangbin<sup>1,2,\*</sup>, DUAN Zengqiang<sup>1,2</sup>, LU Minghuan<sup>3</sup>

1 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Key Laboratory of Agricultural Land Quality and Monitoring of Land and Resource, Beijing 100193, China

3 Urban & Rural Planning and Design Institute of Chengde, Chengde 067000, China

**Abstract:** As the capital of China, Beijing has experienced rapid urbanization and industrialization during the past three decades. The analysis of variation of its carbon storage in agricultural land and response characteristics to land use change are of great significance for regional and national regulation of low carbon utilization in agricultural land. Using the second soil census data in 1980 and the results of soil testing and fertilization in 2010, the topsoil carbon storage of agricultural land were calculated and the vegetation carbon storage of forest and grassland were obtained from biomass inversion based on remote sensing. The response characteristics of carbon storage in agricultural land to land use change in Beijing from 1980 to 2010

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目 (8151001)

收稿日期: 2017-06-29; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kxb@cau.edu.cn

were analyzed by combining the soil and vegetation carbon storage and land use change information. The major results were as follows: 1) the carbon storage in agricultural land of Beijing increased from 75.29 Tg-C in 1980 to 81.13 Tg-C in 2010 by 5.83 Tg-C, the soil organic carbon (SOC) storage of in agricultural land in Beijing decreased by 7.51 Tg-C, whereas the vegetation carbon (VC) storage increased by 13.34 Tg-C; 2) the in agricultural land area in Beijing decreased by  $14.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$  during the past three decades and cropland decreased by  $14.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ . Most of the lost cropland was converted into construction and forest land. The forest land area increased slightly by  $1.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , whereas the grassland area decreased by  $6.29 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ; 3) the SOC storage of the maintained land use types of in agricultural land in Beijing decreased by  $297.63 \times 10^4 \text{ t}$ , and the loss was overcompensated by increased VC storage of  $1095.21 \times 10^4 \text{ t}$ . The carbon storage of maintained land use types of in agricultural land increased by  $97.58 \times 10^4 \text{ t}$ . The carbon storage of maintained cropland and forest land increased, whereas the carbon storage of maintained grassland decreased; 4) the land use type conversion resulted in a decrease of in agricultural land SOC storage in Beijing by  $75.71 \times 10^4 \text{ t}$  and increase in VC storage by  $212.49 \times 10^4 \text{ t}$ . The carbon storage increased by  $136.78 \times 10^4 \text{ t}$  through land use type conversion of in agricultural land in Beijing. The conversion of other land use types to forest land resulted in an increase in the carbon storage and the opposite conversions were not conducive to carbon absorption; 5) the implementation of plain afforestation, returning farmland to forests, and other projects would be beneficial to the carbon sequestration of in agricultural land in Beijing. In the future, we could improve the carbon fixation capacity of in agricultural land in Beijing by controlling the reduction of farmland area, optimizing the internal in agricultural land structure, and reducing the frequency of conversion between land use types. The results of this study could provide a reference for other regions and countries to improve the carbon storage of in agricultural land during rapid urbanization and industrialization.

**Key Words:** Beijing; in agricultural land; carbon storage; land use change; soil carbon density; vegetation carbon density

工业革命以来,包括  $\text{CO}_2$  在内的温室气体浓度不断上升,导致全球变暖以及降水格局改变等一系列气候问题<sup>[1-2]</sup>。陆地生态系统(植被和土壤)固碳被认为是最环境友好和经济可行的减缓大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的重要途径之一<sup>[3-4]</sup>,《京都议定书》中也规定:世界各国可以通过增加陆地生态系统碳储量来抵消经济发展中的碳排放量<sup>[3]</sup>,因此,如何增加陆地生态系统碳储量及其固持能力,已成为当前各国政府关注的焦点和全球气候变化研究的热点<sup>[5]</sup>。土地利用变化是影响陆地生态系统碳储量的重要因素<sup>[6-7]</sup>,包括土地利用类型转化(Conversion)和渐变(Modification),前者直接导致植被类型变化影响植被碳储量<sup>[8-9]</sup>,同时对植物残体回归土壤的过程亦有影响,加之其他土壤扰动,进而影响土壤碳储量<sup>[10]</sup>,后者土地利用类型虽未发生变化,但其系统内部变化过程亦会对植被和土壤碳储量产生影响<sup>[11]</sup>。众多学者对土地利用和碳储量变化开展研究,然而多数研究一般集中在碳储量的单一方面(土壤<sup>[12-15]</sup>或植被<sup>[16-17]</sup>)或者是单一或少数土地利用类型(耕地<sup>[18]</sup>、森林<sup>[19-20]</sup>等)。综合性的碳储量及其对土地利用变化响应的研究较少,且多基于文献资料或某一期数据得到各土地利用类型平均碳密度数据,结合土地利用变化得到碳储量变化情况,碳储量对土地利用变化的响应多集中于土地利用类型转化,而忽略土地利用类型保持的碳储量变化<sup>[7,10,21]</sup>。

我国自 2006 年起成为全球碳排放量最大的国家,在 2015 年的《巴黎气候协定》中承诺确保温室气体排放将于 2030 年之前达到峰值,减排压力巨大。大量研究表明,我国陆地生态系统具有强大的碳汇功能<sup>[22-24]</sup>,其中,作为陆地生态系统的重要组成部分,农用地具有巨大的固碳潜力,然而随着工业化城市化发展,建设用地不断挤占耕地,加之不合理的土地利用,使得固碳量减少,碳排放量增加<sup>[10]</sup>。作为我国首都和政治文化中心,北京市是我国快速工业化城市化发展的典型地区,精确估算北京市农用地土壤及植被碳储量,全面分析碳储量对土地利用变化的响应特征,对未来北京市以及我国提升农用地固碳能力具有重要参考意义。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 土壤碳密度和储量估算

由于土壤无机碳 (Soil Inorganic Carbon, SIC) 储量相对较低<sup>[25-26]</sup>且数据难以获取,本研究仅对土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 进行估算。由于区域土壤剖面数据难以获取,本研究仅对土壤表层 20 cm<sup>[14]</sup>有机碳密度及储量进行估算。土壤有机碳密度计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$\text{Doc} = \text{SOC} \times \gamma \times H \times 10^{-1}$$

式中:Doc 为碳密度 (tC/hm<sup>2</sup>);SOC 为有机碳含量 (g/kg),由有机质含量除以 1.724 得到; $\gamma$  为土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>); $H$  为土壤厚度 (cm),本研究取为 20 cm。

土壤有机碳储量计算公式如下:

$$\text{Poc} = \sum_{i=1}^n S_i \times \text{SOC} \times \gamma_i \times H \times 10^{-1}$$

式中:Poc 为土壤碳储量 (t); $S_i$  为各图斑面积 (hm<sup>2</sup>), $i=1,2,3,\dots$ ; $\gamma_i$  为第  $i$  个图斑土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>); $H$  含义同上。

#### 1.1.2 植被碳密度与储量核算

对于林地、草地植被,本研究通过遥感信息与生物量回归模型反演生物量,然后利用生物量含碳系数折算为植被有机碳,得到植被碳密度与碳储量。本研究主要采用归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 的生物量遥感信息模型方法。

林地植被遥感信息模型参考张慧芳<sup>[28]</sup>对北京市林地植被碳储量的研究,模型公式如下:

$$\text{Bio}_f = 13.007 \times \text{NDVI}^2 + 203.74 \times \text{NDVI} + 10.859$$

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R}$$

式中: $\text{Bio}_f$  为林地植被地上生物量 (t/hm<sup>2</sup>);NDVI 是归一化植被指数;NIR 和  $R$  分别为近红外波段和红光波段的反射率值。

由此得到林地植被地上生物量,然后通过根茎比得到植被地下生物量,再通过生物量含碳系数,折算出植被有机碳,进而得到植被碳密度与碳储量。林地植被根茎比与含碳系数参照 IPCC<sup>[29]</sup> 的研究,地上生物量密度大于 75 t/hm<sup>2</sup> 时,根茎比为 0.24,当地上生物量小于 75 t/hm<sup>2</sup> 时,根茎比为 0.39,阔叶林的含碳系数为 0.48,针叶林的含碳系数为 0.51,根据前人对北京森林植被研究,针叶林和阔叶林面积比约为 2:5<sup>[30]</sup>,二者加权后得到北京市林地含碳系数为 0.5,计算流程如下图 (图 1) 所示。

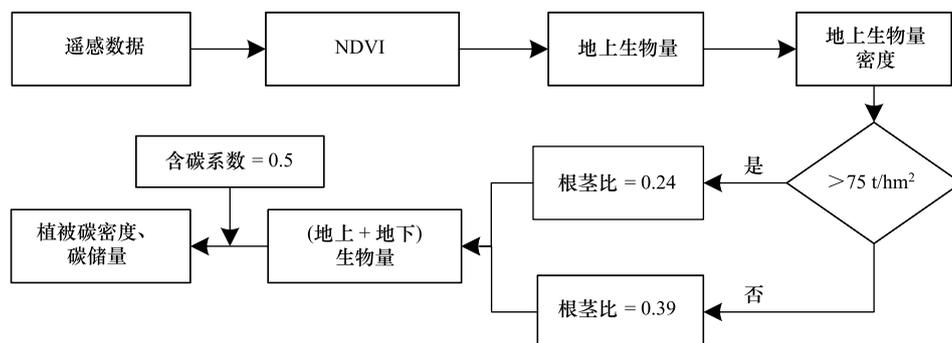


图 1 林地植被碳储量计算流程图

Fig.1 Flow chart of forest vegetation carbon pool's calculation

与林地类似,草地植被遥感信息模型参考渠翠平<sup>[31]</sup>的研究,模型公式如下:

$$\text{Bio}_g = 82.385 \times e^{4.825 \times \text{NDVI}}$$

式中: $\text{Bio}_g$ 为草地植被地上生物量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

因草地生物量地域差异较大,较难获取不同区域草地生物量特征,梳理总结现有研究成果,将北京市地下地上生物量比例系数取 5.125<sup>[32]</sup>,含碳系数取 0.5<sup>[33]</sup>。

对于耕地,由于农作物固定的碳被消费后即被排放,因此多数研究认为耕地农作物碳汇量为零,本研究核算耕地农作物生育期内固定的碳,通过农作物的碳吸收率(耕地植被每合成 1g 干重有机物需要吸收碳的量)和经济系数进行核算<sup>[7]</sup>。其公式如下:

$$C_d = C_f D_w = C_f Y_w / H_i$$

$$D_w = Y_w / H_i$$

式中: $C_d$ 是耕地农作物碳储量(t); $C_f$ 是农作物碳吸收率; $D_w$ 是生物总干物质质量(t); $Y_w$ 是农作物的经济产量(t); $H_i$ 是经济系数。

本研究所用北京市主要作物碳转换系数  $C_f$  以及经济系数  $H_i$  主要参照李克让的研究<sup>[34]</sup>,具体参数数值如表 1 所示。

表 1 北京市农作物固碳量计算参数

Table 1 Parameters for vegetation carbon storage of crops in Beijing

类别 Category	作物种类 Crop types	$H_i$	$C_f$	类别 Category	作物种类 Crop types	$H_i$	$C_f$
粮食作物 Food crop	稻谷	0.45	0.41	经济作物 Economic crop	棉花	0.10	0.45
	冬小麦	0.40	0.49		花生	0.43	0.45
	玉米	0.40	0.47		蔬菜	0.30	0.45
	薯类	0.70	0.42		其它 <sup>3</sup>	0.42	0.45
	大豆	0.34	0.45				

注: $H_i$ :经济系数,Economic coefficient; $C_f$ :碳转换系数 Carbon content ratio;其它经济作物包括瓜果、药材等

### 1.1.3 土地利用变化引起的农用地碳储量变化计算

利用 ArcGIS 9.3 软件的栅格计算器(Raster Calculator)对 1980 和 2010 年的土地利用图进行联合计算,得到北京市 1980—2010 年的土地利用转化矩阵。对于土地利用变化引起的农用地土壤碳储量变化,利用 ArcGIS 9.3 软件工具箱里 Spatial Analyst Tool 中 Zonal 下的 Zonal Statistics 模块,将北京市 1980—2010 年土壤有机碳变化数据与土地利用转移矩阵栅格数据进行叠加区域统计,即得到北京市土地利用类型变化(包括转化和保持)对应的土壤碳储量变化情况。对于土地利用变化引起的农用地植被碳储量变化,考虑北京市耕地利用的复杂性,设施农业用地占地面积较大,难以获取耕地植被碳密度空间分布,因此本研究未研究耕地植被碳储量对土地利用变化的响应,仅核算耕地农作物固碳量及其变化情况。对于土地利用变化引起的林地和草地植被碳储量变化,本文假设研究期间气候无剧烈变化,不考虑其它用地(如建用地中的城市绿地等)植被,将 1980—2010 年土地利用转移矩阵栅格图与两个时期和草地林地植被碳密度图进行叠加统计分析,研究土地利用变化对农用地植被碳储量的影响。

## 1.2 数据来源

### 1.2.1 土壤数据

1980 年北京市土壤数据源于全国第二次土壤普查结果,样点共计 13290 个,采样时间为 1979—1984 年;2010 年北京市土壤数据源于北京市土肥站测土配方施肥项目成果,采样时间为 2006—2008 年,样点共计 24009 个。取样时在样点四周 100 m 范围进行选择 3—5 个点,取 10—20 cm 表层土壤,将按照四分法混合采集样品,将其中的石块、植物根系残体等杂物剔除,并进行风干。采用重铬酸钾氧化容量分析法测定土壤有机质<sup>[35]</sup>,通过环刀法测定土壤容重<sup>[36]</sup>。结合 GPS 坐标,通过反距离加权法(Inverse Distance Weighted)将调查

样点数据插值获得北京市全市面状数据,其地理坐标系为西安 80 坐标系,投影坐标系为高斯-克吕格。

### 1.2.2 土地利用数据

1980、2010 年两期北京市土地利用数据源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),由中国科学院遥感应用研究所利用 Landsat-TM 和 MODIS 卫星遥感影像解译形成,其中 1980 年土地利用栅格数据分辨率为 1 km,2010 年为 100 m,由于遥感数据的缺乏,1980 年的土地利用数据采用的是 1980s 的遥感影像。该系列数据在许多土地利用变化相关研究中得到广泛应用<sup>[7,37]</sup>,其土地利用分类包括 6 个一级类,分别为:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。本文以农用地为研究对象,包括耕地、林地、草地。

### 1.2.3 遥感数据

本文利用遥感数据获取林地与草地归一化植被指数(NDVI)以计算植被碳密度及碳储量,1980、2010 年北京市遥感数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。其中,北京市 2010 年遥感影像主要来自 Landsat TM(主题成像仪)数据,Band 4 为近红外波段,Band 3 为红色波段,分辨率为 30 m。该数据地图投影为 UTM-WGS 84 南极洲基地投影,并经过系统辐射校正和地面控制点几何校正,通过 DEM 进行地形校正,其大地测量校正基于高精度 DEM 数据及精确的地面控制点,校正精度较高。1980 年遥感影像来自 Landsat MSS(多光谱扫描仪)数据,所有波段分辨率为 60 m。

## 2 研究区概况

北京市地处华北平原北部(39°28′—41°05′N,115°25′—117°30′E),西部、北部和东北部环太行山脉和燕山山脉,东南是向渤海倾斜的平原,全市平均海拔 43.5 m,下辖 16 个市辖区县(图 2)。北京属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候, $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温为 4100—4500 $^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 550—570 mm<sup>[38]</sup>,土壤类型主要有褐土、潮土、水稻土、棕壤等<sup>[30]</sup>;地带性植被为温带落叶阔叶林并有温性针叶林,山区主要植被为次生落叶阔灌丛及温性针叶林和落叶阔叶林,典型种植制度为冬小麦-夏玉米。

## 3 研究结果

### 3.1 北京市农用地碳储量变化分析

过去三十年间,北京市农用地有机碳呈增加趋势(表 2)。1980 年北京市农用地碳储量为 75.29 Tg-C,相当于同时期全国碳排放量的 5.52%<sup>[39]</sup>,2010 年碳储量为 81.13 Tg-C,相当于同时期全国碳排放量的 1.05%<sup>[39]</sup>,三十年间北京市农用地碳储量共计增加了 5.83 Tg-C。其中,1980 年土壤碳储量为 46.33 Tg-C,2010 年为 38.82 Tg-C,年均减少 0.25 Tg-C;1980 年植被碳储量为 28.97 Tg-C,2010 年为 42.31 Tg-C,年均增加 0.45 Tg-C。比较不同土地利用类型的碳储量,林地、耕地、草地碳储量依次递减,除林地碳储量呈增加趋势外,耕地和草地碳储量均有减少。从土壤碳储量和植被碳储量的角度上看,三十年间,耕地、林地和草地植被碳储量均呈增加趋势,分别增加 1.71 Tg-C、13.08 Tg-C 和 0.27 Tg-C;而耕地、林地和草地的土壤碳储量均呈减少趋势,依次减少 3.20 Tg-C、3.60 Tg-C 和 0.71 Tg-C;需要指出的是,耕地土壤碳储量减少主要源于面积大幅减少,其土壤碳密度增加了 0.1 tC/hm<sup>2</sup>。

由图 3 可知,北京市西部和北部山区土壤碳密度最大,大多集中在 48—66 tC/hm<sup>2</sup> 范围内,另外平原近郊区的土壤碳密度多为 35—48 tC/hm<sup>2</sup>,略高于平原其它地区,1980 年到 2010 年,北京市耕地土壤碳密度略有增加,农用地整体土壤碳密度略有下降。

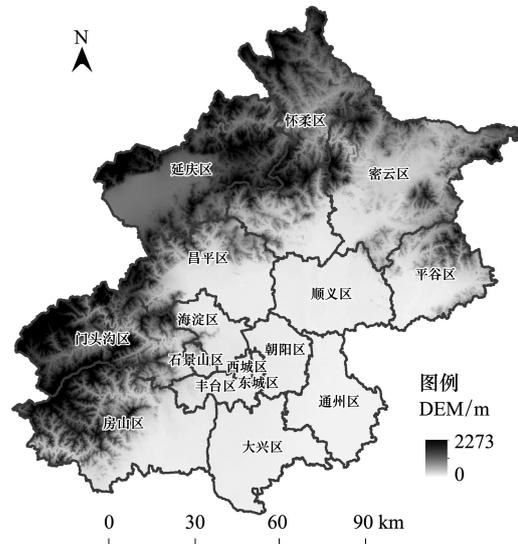


图 2 北京市行政区划及数字高程

Fig.2 The administrative division and DEM of Beijing

表 2 1980、2010 年北京市农用地碳储量

Table 2 Carbon storage of agricultural land in Beijing in 1980 and 2010

土地利用类型 Land use type		碳密度 Carbon density/(tC/hm <sup>2</sup> )			碳储量 Carbon storage/Tg-C		
		1980	2010	变化量	1980	2010	变化量
耕地 Cropland	总计 Total	30.68	39.79	9.11	13.11	9.91	-3.20
	土壤 Soil	22.40	22.50	0.1	13.11	9.91	-3.20
	植被 Vegetation	8.28	17.29	9.01	4.58	6.29	1.71
林地 Forest land	总计 Total	77.64	91.82	14.18	57.44	66.93	9.48
	土壤 Soil	39.43	34.39	-5.04	28.65	25.06	-3.60
	植被 Vegetation	38.21	57.43	19.22	28.79	41.87	13.08
草地 Grassland	总计 Total	35.62	33.63	-2.09	4.74	4.3	-0.45
	土壤 Soil	34.26	30.17	-4.09	4.56	3.85	-0.71
	植被 Vegetation	1.36	3.46	2.10	0.18	0.44	0.27
总计 Total	总计 Total	55.52	67.39	11.87	75.29	81.13	5.83
	土壤 Soil	32.06	29.94	-2.12	46.33	38.82	-7.51
	植被 Vegetation	23.46	37.45	13.99	28.97	42.31	13.35

本表中耕地植被碳密度为农作物固碳密度,耕地植被碳储量实为农作物固碳量,消费后即被排放,不计入总碳储量中

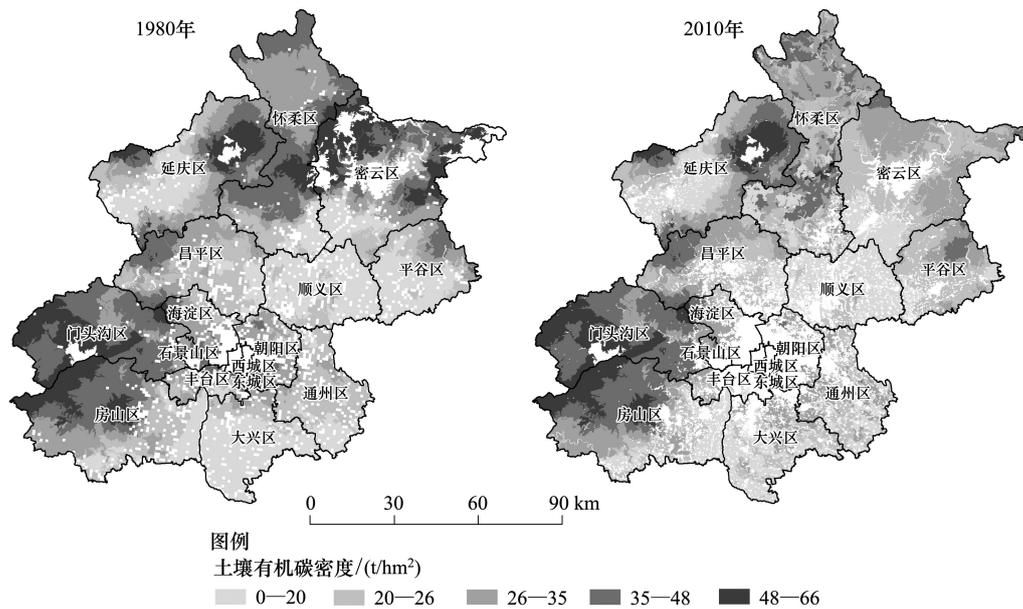


图 3 北京市土壤密度图(1980、2010)

Fig.3 SOC densities in Beijing(1980,2010)

由图 4 可知,北京市林地和草地的植被碳密度较高的区域位于北部及西部山区。三十年间,林地和草地的植被碳密度整体呈增加趋势。结合表 2 的分析结果,耕地农作物植被碳密度亦呈增加趋势。

### 3.2 北京市农用地利用变化分析

北京市农用地面积变化图(图 5)显示,过去三十年,北京市农用地面积大幅减少,减少量为  $14.11 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,降幅达 9.70%。其中,耕地面积减少最为迅速,降幅高达 24.77%,面积减少  $14.62 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ 。林地和草地面积变化相对较小,林地面积增加  $1.13 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,增幅为 1.56%,草地面积减少  $6.29 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ ,降幅为 4.64%。与此同时,北京市农用地的土地利用类型转化非常剧烈。1980 年到 2010 年,北京市农用地土地利用类型转化面积占北京市总面积的 31.07%,远高于全国水平<sup>[10]</sup>。北京市农用地类型保持与转化空间分布图(图 6)显示,耕地集中于北京东南部平原区城市周边,三十年间流失严重,由城市边缘向外延伸,主要去向是建设用地

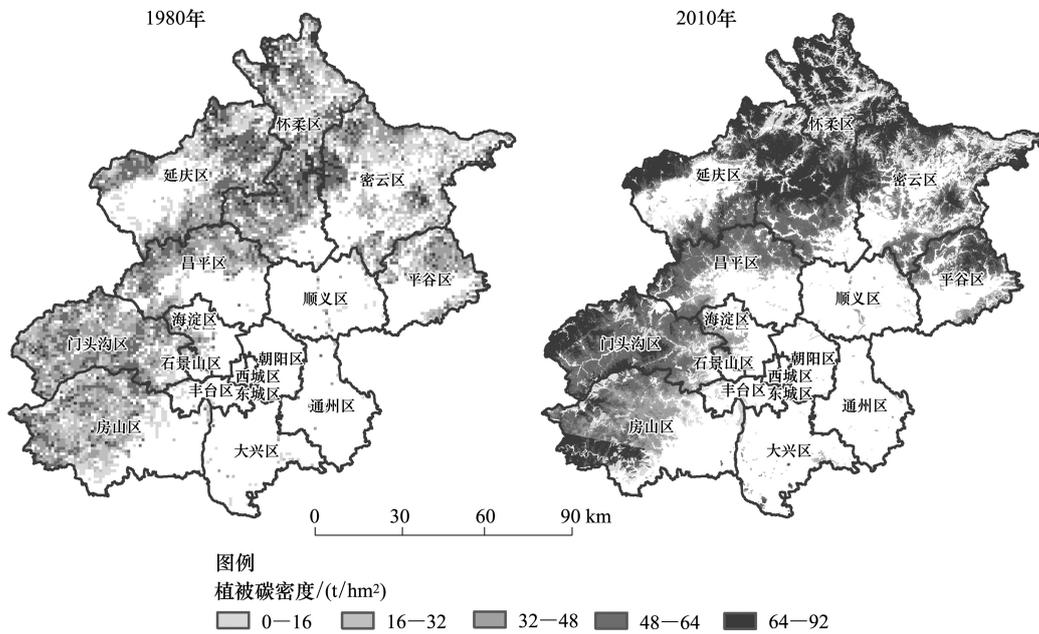


图 4 北京市林地和草地植被密度图 (1980,2010)

Fig.4 Vegetation carbon densities of agricultural land in Beijing (1980,2010)

和林地;林地和草地集中于北京西部、北部及东北部山区,二者之间的相互转化较为活跃。

### 3.3 北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应

#### 3.3.1 保持用地类型碳储量变化

保持用地类型的碳密度及储量变化情况如表 3 所示。结果表明,1980—2010 年各保持用地类型农用地总碳储量增加  $797.58 \times 10^4$  t,其中,土壤碳储量减少  $297.63 \times 10^4$  t,植被碳储量增加  $1095.21 \times 10^4$  t。比较不同用地类型,林地碳储量增加值最大,为  $776.82 \times 10^4$  t,占总增加值的 97.40%。

从土壤碳储量的角度看,保持用地类型的耕地土壤碳储量增加  $38.29 \times 10^4$  t,主要是三十年来北京市耕地利用强度增加,伴随化肥、有机肥投入增加,使得土壤有机碳含量增加。保持用地类型的林地和草地土壤碳储量分别减少  $304.50 \times 10^4$  t 和  $31.42 \times 10^4$  t。

从植被碳储量的角度看,保持用地类型的林地和草地植被碳密度和碳储量均呈增加趋势,保持林地平均碳密度增加了  $17.14$  tC/hm<sup>2</sup>,低于北京市林地整体植被碳密度的增加量  $19.22$  tC/hm<sup>2</sup>,原因可能为原始林地的生长速率及生物量累积速度小于新增林地。未发生转换的林地植被碳储量增加  $1081.32 \times 10^4$  t,年均增加  $36.04 \times 10^4$  t。未发生类型转化的草地平均植被碳密度增加  $2.04$  tC/hm<sup>2</sup>,碳储量增加  $13.89 \times 10^4$  t。

#### 3.3.2 转化用地类型碳储量变化

1980—2010 年北京市土地利用类型转化引起的农用地储量变化情况见表 4,结果表明,由于土地利用类型转化,三十年来北京市农用地碳储量增加  $136.78 \times 10^4$  t,其中,土壤碳储量减少  $75.71 \times 10^4$  t,植被碳储量增加  $212.49 \times 10^4$  t。各土地利用类型转出汇总结果显示,耕地转出使得碳储量增加  $205.89 \times 10^4$  t,林地转出使碳储量减少  $314.45 \times 10^4$  t,草地转出使碳储量增加  $189.98 \times 10^4$  t,耕地和草地的转出使碳储量增加的原因主要在于该两种类型转为林地,使得植被碳储量大量增加。其中,耕地-林地、草地-林地、水域-林地、建设用地-林地等

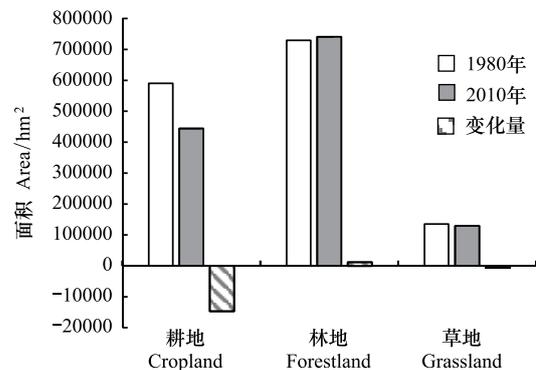


图 5 1980—2010 年北京市农用地各类型面积变化

Fig.5 The area change of agricultural land in Beijing from 1980 to 2010

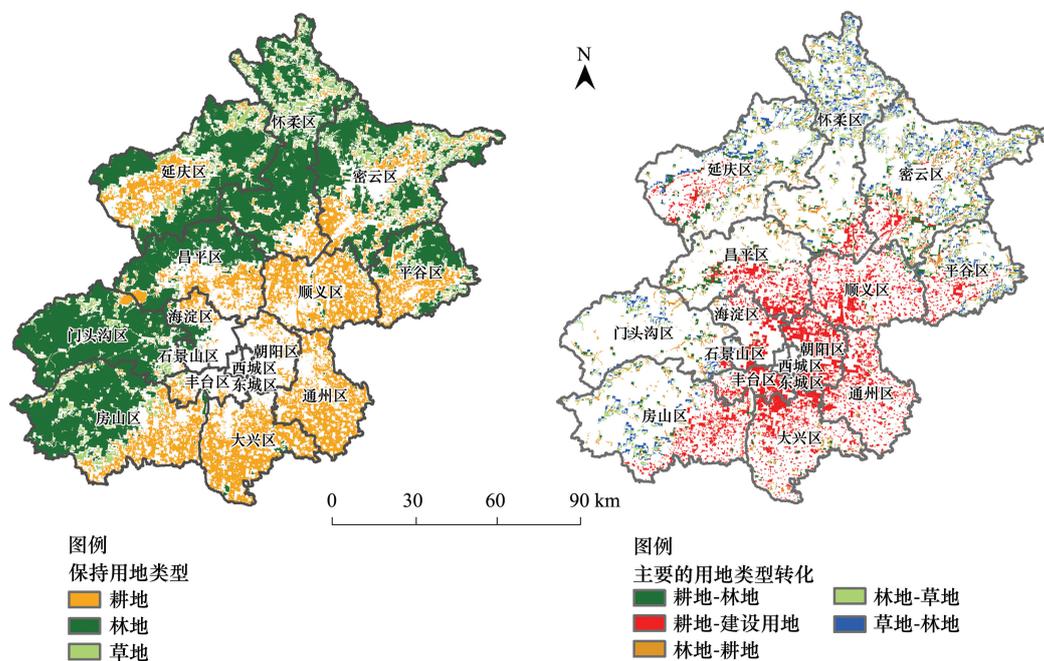


图 6 1980—2010 年北京市农用地类型保持(左)与转化(右)空间分布图

Fig.6 Distribution of land use types maintained and conversion of agricultural land in Beijing from 1980 to 2010

土地利用类型转化类型使得碳储量均增加,有助于碳汇的形成。林地转出为其他用地类型均体现为碳储量减少,不利于碳汇的形成。

表 3 保持土地利用类型的农用地碳密度及碳储量变化

Table 3 Carbon storage variation of maintained land use types of farmland in Beijing

土地利用类型 Land use type	面积 Area/hm <sup>2</sup>	土壤碳密度变化 SOC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	土壤碳储量变化 SOC storage change /10 <sup>4</sup> t	植被碳密度变化 VC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	植被碳储量变化 VC storage change /10 <sup>4</sup> t	总碳储量变化 Carbon storage change /10 <sup>4</sup> t
耕地 Cropland	343156	1.12	38.29	-	-	38.29
林地 Forest land	627334	-4.85	-304.50	17.14	1081.32	776.82
草地 Grassland	67370	-4.66	-31.42	2.04	13.89	-17.53
合计 Total	1037860	-2.87	-297.63	10.55	1095.21	797.58

表 4 土地利用类型转化引起的农用地碳密度及碳储量变化

Table 4 Carbon storage variation caused by land use type conversion of agricultural land in Beijing

土地利用类型转化 Conversion of land use type	面积 Area/hm <sup>2</sup>	土壤碳密度变化 SOC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	土壤碳储量变化 SOC storage change /10 <sup>4</sup> t	植被碳密度变化 VC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	植被碳储量变化 VC storage change /10 <sup>4</sup> t	总碳储量变化 Carbon storage change /10 <sup>4</sup> t
耕地-林地 Cropland-Forest land	44661	-3.03	-13.55	46.29	206.75	193.20
耕地-草地 Cropland-Grassland	15408	-5.12	-7.90	3.45	5.31	-2.58
耕地-水域 Cropland-Water area	15645	0.76	1.19	-	-	1.19
耕地-建设用地 Cropland-Construction land	156691	0.9	14.08	-	-	14.08
小计 Subtotal	232405	-0.27	-6.17	35.3	212.07	205.89
林地-耕地 Forest land-Cropland	32761	-3.31	-10.85	-32.43	-106.25	-117.10
林地-草地 Forest land-Grassland	39635	-6.55	-25.98	-28.91	-114.57	-140.53
林地-水域 Forest land-Water area	4599	-5.49	-2.53	-40.62	-18.68	-21.21
林地-建设用地 Forest land-Construction land	13559	-0.66	-0.89	-25.61	-34.73	-35.62
小计 Subtotal	90554	-4.44	-40.23	-30.28	-274.23	-314.45

续表

土地利用类型转化 Conversion of land use type	面积 Area/hm <sup>2</sup>	土壤碳密度变化	土壤碳储量变化	植被碳密度变化	植被碳储量变化	总碳储量变化
		SOC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	SOC storage change /10 <sup>4</sup> t	VC density change /(tC/hm <sup>2</sup> )	VC storage change /10 <sup>4</sup> t	Carbon storage change /10 <sup>4</sup> t
草地-耕地 Grassland-Cropland	18016	-4.27	-7.69	1.23	2.22	-5.47
草地-林地 Grassland-Forest land	38971	-5.98	-23.30	56.17	218.92	195.61
草地-水域 Grassland-Water area	1802	-7.35	-1.32	2.32	0.42	-0.91
草地-建设用地 Grassland-Construction land	4788	0.48	0.23	1.06	0.51	0.74
小计 Subtotal	63577	-5.05	-32.09	34.93	222.06	189.98
水域-耕地 Water area-Cropland	9672	0.39	0.37	-	-	0.37
水域-林地 Water area-Forest land	5547	-4.53	-2.51	49.39	27.40	24.88
水域-草地 Water area-Grassland	1517	-4.52	-0.69	3.32	0.50	-0.18
小计 Subtotal	16736	-1.69	-2.82	39.5	27.90	25.08
建设用地-耕地 Construction land-Cropland	33472	1.6	5.35	-	-	5.35
建设用地-林地 Construction land-Forest land	6637	0.28	0.19	35.87	23.80	23.99
建设用地-草地 Construction land-Grassland	1422	0.2	0.03	2.07	0.29	0.32
小计 Subtotal	41531	1.34	5.56	29.9	24.10	29.66
未利用地-耕地 Unused land-Cropland	142	2.44	0.03	-	-	0.03
未利用地-林地 Unused land-Forest land	142	0.33	0.00	41.59	0.59	0.60
小计 Subtotal	284	1.39	0.04	41.59	0.59	0.63
总计/均值 Total/Average	445087	-1.7	-75.71	9.26	212.49	136.78

值得注意的是,本研究结果显示,耕地转为林地表现为土壤碳储量降低,可能是由于自 2000 年起北京市开始实施退耕还林政策,新增加的林地植被生物量输入被较快的土壤有机碳损失抵消,且造林工程对土壤有机碳积累的影响尚不明确,对土壤有机碳库可能有正向影响或者负面效应,也可能是“零效应”<sup>[40]</sup>,也有研究表明,在造林早期土壤碳储量可能存在下降趋势<sup>[41]</sup>。此外,本研究中耕地转为建设用地表现为土壤碳储量增加,这与现有多数研究结果存在一定差异,造成该结果的主要原因有以下 3 个方面:首先,现有研究多基于一期的各用地类型的平均碳密度数据,结合土地利用变化得到碳储量变化情况进行碳储量变化研究<sup>[7]</sup>,在建设用地平均碳密度低于耕地时,耕地转为建设用地时即表现为碳储量的降低,本研究采用两期土壤数据,耕地土壤碳密度呈增加趋势,若耕地在离研究时间节点(2010 年)较近的时期内发生了土地利用类型转化,即可能造成耕地转为建设用地而碳储量增加的研究结果;其次,本研究中的建设用地包括一定数量的城市绿化用地,相较于自然土壤可能具有更大的碳储量<sup>[42-43]</sup>;最后,建设用地的地面硬化造成土壤封闭(Soil sealing),隔绝了土壤与外界的碳和水的交换,长期将导致土壤碳含量降低,但是在短期内也可能造成土壤微生物呼吸减弱,对有机碳的分解降低,导致土壤碳储量不变或略有升高<sup>[44]</sup>。

#### 4 讨论

分析经历快速工业化城市化的北京市的农用地碳储量对土地利用变化的响应,对未来提升北京市以及我国农用地固碳能力具有重要参考意义。由于数据限制,本文采用的 1980 年的土地利用类型图是基于 1980s 的遥感影像制作而成,且分辨率相对较低(1 km),这可能导致土地利用变化研究结果存在误差。本研究结果表明,过去三十年北京市农用地面积减少量为  $14.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,其中以耕地最为显著,耕地面积减少  $14.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。韩会然等人<sup>[45]</sup>的研究结果显示,1985 年到 2010 年北京农用地面积减少  $12.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,其中,耕地面积减少  $14.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。将本研究结果与上述结果相比较,二者趋势较为一致,表明本研究因数据精度导致的土地利用变化误差在可接受范围内。

根据我们的研究结果,过去三十年间北京市农用地碳储量虽然略有增加,但这主要是由于林地转入导致植被碳储量增加,同时发生类型转化的林地植被碳密度增加。林地的转入表现为土壤碳储量降低,可能是由

于造林后土壤有机碳含量在初期可能呈下降趋势,一段时期后(温带地区少于10年)开始积累增加<sup>[46-47]</sup>,因此,2010—2020正是退耕还林(草)之后土壤有机碳含量开始恢复并逐渐积累的过程,北京市退耕还林、平原造林等工程具有巨大固碳潜力。值得注意的是,包括林地在内,农用地各类型的转入和转出均体现为土壤碳储量降低,表明频繁的土地利用转化不利于土壤有机碳的积累,未来可通过农用地内部结构优化,减少用地类型间的转换频率降低土地利用变化对碳储量造成的损失。

过去三十年,北京市经历了快速城市化与工业化,体现在土地利用变化上是大量的耕地转为建设用地,本研究结果显示耕地转为建设用地表现为土壤碳储量增加,这或许高估了碳储量的增加值。城市建设用地仅有少数为城市绿化用地,更多的是硬化地面、道路和建筑物,建筑物建设过程中往往伴随着大量的土壤移除,从这个角度上讲,建设用地的土壤碳含量应该是极低的。然而现有土地利用变化对碳储量影响研究中均未考虑该问题,现有研究均假定建设用地同其他用地类型一样,土壤有机碳在水平方向连续分布<sup>[7,10,12,48]</sup>,本研究也是基于该假设进行核算。对于建设用地土壤碳相关研究也多集中于土壤封闭和压实<sup>[42-44]</sup>对土壤碳的影响,关于城市建设中土壤移除对土壤碳储量的影响研究尚未见报道。

土地利用变化及其对碳储量的影响是持续的和动态,本研究仅对1980年和2010年两个时间节点之间的土地利用变化及碳储量变化进行分析,三十年内更为详细具体的土地利用变化过程以及碳储量变化过程还需要增加数据进行深入研究。此外,在植被碳储量计算过程中,本研究采用生物量遥感信息模型方法,在根茎比与含碳系数等参数的确定上参照IPCC研究结果,不一定能准确反映北京市的真实情况;在土壤碳储量计算过程中,由于数据缺乏未考虑土壤无机碳含量,仅对表层(20 cm)土壤有机碳含量进行了测算。以上不足之处导致本研究可能未能准确全面体现北京市农用地碳储量对土地利用变化的响应特征,相关模型参数的本地化、土壤无机碳测算等方面将是未来土地利用变化及其碳效应研究的重点方向。

## 5 结论

(1) 1980年北京市农用地碳储量为75.29 Tg-C,其中土壤碳储量为46.33 Tg-C,植被碳储量为28.97 Tg-C;2010年北京市农用地碳储量为81.13 Tg-C,其中土壤碳储量为38.82 Tg-C,植被碳储量为42.31 Tg-C;研究期间北京市农用地碳储量共计增加了5.83 Tg-C。

(2) 三十年间,北京市农用地面积减少 $14.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,降幅达9.70%。其中,耕地面积减少最为迅速,面积减少 $14.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,主要去向为建设用地和林地;林地和草地面积变化相对较小,林地面积增加 $1.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,草地面积减少 $6.29 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,二者之间的相互转化较为活跃。

(3) 1980—2010年北京市用地类型保持不变的农用地总碳储量增加 $797.58 \times 10^4 \text{ t}$ ,其中,土壤碳储量减少 $297.63 \times 10^4 \text{ t}$ ,植被碳储量增加 $1095.21 \times 10^4 \text{ t}$ ,耕地、林地碳储量增加,草地碳储量减少。

(4) 1980—2010年,由于土地利用类型转化,北京市农用地土壤碳储量减少 $75.71 \times 10^4 \text{ t}$ ,植被碳储量增加 $212.49 \times 10^4 \text{ t}$ ,总碳储量增加 $136.78 \times 10^4 \text{ t}$ ,其他用地类型转为林地使得碳储量增加,有助于碳汇的形成。林地转出为其他用地类型均体现为碳储量减少,造成一定的碳排放。

(5) 过去三十年北京市农用地面积减少,碳储量略有增加,主要是林地转入导致的植被碳储量增加,农用地各类型的转入和转出均造成土壤碳储量降低。平原造林、退耕还林等工程实施有助于增加北京市农用地固碳量。未来北京市可通过控制农用地面积减少量、减少用地类型间的转换频率以降低碳储量损失,通过优化农用地内部结构、增加具有较高碳密度的林地面积、合理利用耕地提高耕地碳密度以提高碳储量。本研究可以为其他区域及全国在快速城市化工业化过程中提升农用地碳储量提供一定参考。

## 参考文献(References):

- [1] Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R B, Piao S, Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 465-570.
- [ 2 ] Kashiwagi H. Atmospheric carbon dioxide and climate change since the Late Jurassic ( 150 Ma ) derived from a global carbon cycle model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 454: 82-90.
- [ 3 ] United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. *Review of European Community and International Environmental Law*, 1998, 7(2): 214-217.
- [ 4 ] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [ 5 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [ 6 ] Leite C C, Costa M H, Soares-Filho B S, de Barros Viana Hissa L. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): GB2011.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Bailis R, McCarthy H. Carbon impacts of direct land use change in semiarid woodlands converted to biofuel plantations in India and Brazil. *GCB Bioenergy*, 2011, 3(6): 449-460.
- [ 9 ] Houghton R A. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climatic Change*, 1991, 19(1/2): 99-118.
- [ 10 ] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, Yang H, Lai L, Tan J Z. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10233.
- [ 11 ] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 76-83.
- [ 12 ] 李雪梅. 天津市滨海新区 1979—2013 年土地利用及土壤有机碳储量空间变化. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 136-140.
- [ 13 ] 田多松, 傅碧天, 吕永鹏, 杨凯, 车越. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(4): 613-620.
- [ 14 ] 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 张梅. 基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 1-6.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 张兴榆, 黄贤金, 赵小风, 陆汝成, 赖力. 环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1343-1353.
- [ 18 ] 姜群鸥, 邓祥征, 战金艳, 刘兴权. 黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响. *地理研究*, 2008, 27(4): 839-846.
- [ 19 ] 陆君, 刘亚风, 齐珂, 樊正球. 福州市森林碳储量定量估算及其对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5411-5420.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, Zhang Y J, Xu Z H. Carbon carry capacity and carbon sequestration potential in China based on an integrated analysis of mature forest biomass. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(12): 1218-1229.
- [ 23 ] Penman J, Gytarsky M, Hiraishi T, Krug T, Kruger D, Pipatti R, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Wagner F. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2003, 35(5): 103-105.
- [ 24 ] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013: 710-719.
- [ 25 ] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [ 26 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [ 27 ] 许信旺, 潘根兴, 侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 193-196, 200.
- [ 28 ] 张慧芳. 北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2008: 1-85.
- [ 29 ] IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa, Japan: Institute For Global Environmental Strategies, 2006.
- [ 30 ] 王光华. 北京森林植被固碳能力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 1-127.

- [31] 渠翠平, 关德新, 王安志, 金昌杰, 倪攀, 袁凤辉, 张晓静. 基于 MODIS 数据的草地生物量估算模型比较. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2028-2032.
- [32] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 391-397.
- [33] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [34] 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.
- [35] 南京农学院. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1980: 36-39.
- [36] 郭国双. 谈谈土壤容重的测定. 灌溉排水, 1983, (2): 39-40, 38.
- [37] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [38] 赵丽琼. 北京山区森林碳储量遥感估测技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010: 1-64.
- [39] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion Highlights 2016. Paris: OECD Observer, 2016.
- [40] 窦晓琳. 森林恢复对土壤有机碳氮循环的影响[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉植物园), 2014: 1-125.
- [41] Chen Y Q, Yu S Q, Liu S P, Wang X L, Zhang Y, Liu T, Zhou L X, Zhang W X, Fu S L. Reforestation makes a minor contribution to soil carbon accumulation in the short term: evidence from four subtropical plantations. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 400-405.
- [42] Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, Li J T, Zhao Q G. Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces. Pedosphere, 2014, 24(1): 56-64.
- [43] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. Environmental Pollution, 2002, 116(S1): S107-S118.
- [44] Fini A, Frangi P, Mori J, Donzelli D, Ferrini F. Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas: results from a 4-year study comparing permeable, porous, and impermeable pavements. Environmental Research, 2017, 156: 443-454.
- [45] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制. 经济地理, 2015, 35(5): 148-154, 197.
- [46] Turner J, Lambert M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. Forest Ecology and Management, 2000, 133(3): 231-247.
- [47] Paul K I, Polglase P J, Richards G P. Sensitivity analysis of predicted change in soil carbon following afforestation. Ecological Modelling, 2003, 164(2-3): 137-152.
- [48] 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.