

基于 InVEST 模型重庆市建设用地 扩张的碳储量变化分析

虎 帅, 张学儒, 官冬杰

(重庆交通大学, 重庆 400074)

摘 要:建设用地的扩张是影响陆地生态系统碳储量变化的重要驱动因素。以重庆市为研究区域,基于重庆市土地利用数据、土壤数据、植被数据,从建设用地扩张的视角,采用 InVEST 模型,结合收集的碳密度数据,对重庆市 2000 年、2005 年及 2010 年碳储量的变化进行了分析。结果表明:2000—2010 年重庆市土地利用变化显著,建设用地是主要的转入者,共增长 1 505.58 km²,其中 90% 以上的区域来自耕地以及阔叶林,造成碳净损失 1.796 Mt。2005—2010 年重庆市建设用地变化更加剧烈,这期间建设用地共扩张 998.19 km²。建设用地主要是由西部中心逐渐向四周扩张,且增长速率加快。建设用地由 2000 年的 598.88 km² 增加到 2005 年的 1 097.27 km²,扩张导致总碳储量减少了 1 169 982.18 t,其中阔叶林的碳损失达到 72%;2010 年建设用地增加至 2 095.46 km²,占用耕地以及阔叶林是主要的扩张形式,扩张导致总碳储量减少了 1 169 982.18 t。可见,建设用地扩张过程中,碳损失的主要来源为耕地及阔叶林,其次是针叶林、草原、草地等。选择固碳能力较弱的裸地与草甸作为建设用地的扩张目标,有利于重庆市碳储量的保护与增长。

关键词:InVEST 模型;碳储量;固碳能力;碳损失;重庆市

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0323-09

Analysis on Carbon Storage Change of Construction Land Expansion in Chongqing Based on InVEST Model

HU Shuai, ZHANG Xueru, GUAN Dongjie

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The expansion of construction land is an important driving factor affecting the change of carbon storage in terrestrial ecosystem. Based on Chongqing land use data, soil data, vegetation data, from the perspective of expansion of construction land, we use InVEST model and combine with the collected carbon density data to analyze the changes in carbon stocks in Chongqing City in 2000, 2005 and 2010. The results show that the land use change is significant from 2000 to 2010, and the construction land is the main entrant, with a total growth of 1 505.58 km². Among them, more than 90% of the area comes from cultivated land and broad-leaved forest, resulting in a net carbon loss of 1.796 Mt. From 2005 to 2010, the construction land in Chongqing changed more intensely, the construction land expanded by 998.19 km². Construction land mainly expanded from the western center, gradually to the surrounding area, and the growth rate accelerated. The construction land increased from 598.88 km² in 2000 to 1 097.27 km² in 2005, and the total carbon storage decreased by 1 169 982.18 tons. The carbon loss of broad-leaved forest reached to 72%. In 2010, the construction land increased to 2 095.46 km², expansion occurred in broad-leaved forest, expansion led to the reduction of total carbon stocks of 1 169 982.18 tons. It can be seen that the main sources of carbon loss during the expansion of construction land are cultivated land and broad-leaved forest, and followed by coniferous forest, grassland and grassland. Construction land expansion targeting the bare land and the meadow with weak carbon sequestration are

收稿日期:2017-07-26

修回日期:2017-08-18

资助项目:国家自然科学基金(41501202);上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金(SHUES2012A04);国家自然科学基金(41501202);国家社科基金后期资助项目(16FJY010);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0210);上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金(SHUES2012A04)

第一作者:虎帅(1992—),男,新疆克拉玛依人,硕士研究生,主要从事于 GIS 应用与生态系统服务评估等方面的研究工作。E-mail: 610267114@qq.com

通信作者:张学儒(1982—),男,河北沧州人,副教授,主要从事土地利用与 GIS 应用。E-mail: zhangxueru5@126.com

beneficial to the protection and growth of carbon storage in Chongqing.

Keywords: InVEST model; carbon storage; carbon capacity; carbon loss; Chongqing

全球气候变化已经直接影响到人类社会系统和自然生态系统,地球的碳循环系统在全球气候变化中占据着重要地位。对于全球碳循环系统而言,研究碳储量的变化具有十分重要的意义,有利于改善全球的气候变化^[1]。目前相关研究多集中于单一生态系统的研究,如土壤生态系统、水环境生态系统、森林生态系统等^[2]。碳储量包括了大气中的碳储量、海洋碳储量及陆地碳储量。其中,陆地碳储量直接影响到大气温室气体排放量以及碳循环的平衡。据中科院大气物理研究所最新统计,中国陆生系统碳储量达到 1 000 亿 t^[3]。城市扩张是人类活动的表现,在城市扩张过程中,土地利用/覆被都会受到不同程度的影响。研究城市扩张的碳储量变化有利于合理地处理人地关系的矛盾,也同时促进了人与自然的和谐发展^[4]。近年来,应用生态模型对陆地系统碳储量进行评估分析研究,受到学术界的关注,如张文华等分析了 InVEST 模型对郭勒草原碳储量评估的适用性,发现不同类型的草地碳储量也有所不同,且适用于此类研究^[5];修珍珍等利用 InVEST 模型估算了富阳市森林生态系统的碳储量,分析得出碳储量由多到少依次为常绿阔叶林、针阔混交林、竹林、马尾松林^[6];荣月静等利用 InVEST 模型研究了近 10 a 太湖流域土地利用变化下碳储量功能,发现碳储量逐年减少的规律^[7]。可见,InVEST 模型能有效评估陆地系统碳储量,但是利用 InVEST 模型开展建设用地扩张导致的陆地生态系统碳储量损失的研究并不多见。对于城市化进程不断加快的重庆而言,建设用地的需求量不断上升,这就造成建设用地侵占其他土地利用类型来满足需求,碳储量发生变化,从而直接影响到生态系统的变化。如果建设用地扩张的不合理,会造成各土地关系类型之间的矛盾,对生态影响造成不利影响^[8]。因此,根据建设用地转入与转出的变化情况,精确计算陆地生态系统碳储量,从建设用地扩张的角度,对碳储量变化进行深入分析,研究对碳储量的影响,有利于合理规划建设用地扩张方向,进而对生态系统服务影响最小有重要价值意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于我国西南部,长江上游地区,地处 105°11'—110°11'E,28°10'—32°13'N,2015 年末,辖区分为 38 个区县(自治县),面积达到 8.24 万 km²。重庆市是我国西南地区综合交通枢纽和最大的工商业城市,是国家重要的制造业基地。东邻湖北、湖南,南接贵州,西

连四川,北靠陕西。重庆市是西部地区唯一的直辖市,幅员面积最大,而农业用地比重较大,2005 年占总面积的 84.42%,因此具有大城市,大农村的特点。重庆市土地利用水平地区差异大,中西部地区单位城镇建设用地二三产业增值分别为渝东南及渝东北地区的 1.5 倍和 1.3 倍;耕地减少快,后备资源匮乏,城乡建设用地统筹不够^[9]。重庆市直辖以来,城镇化水平不断提高,2010 年重庆市城镇化率达到 53%,远高于平均水平。但由于重庆市建设用地几何重心的偏离,导致城乡二元结构突出^[10]。复杂的生态环境与城市化进程不断加快的耦合关系,对研究区建设用地扩张及生态系统服务影响深刻^[11]。

1.2 数据获取

1.2.1 土地利用数据 本文采用重庆市 2000 年、2005 年以及 2010 年土地利用数据,通过中科院数据共享网站下载获取。将土地利用进行重分类处理,合并地类后分为:耕地、园地、建设用地、水体、沼泽、草甸、草原/草地、针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、其他林地以及裸地 13 类。

1.2.2 碳密度数据 陆地系统碳储量主要包括地上碳储量、地下碳储量以及土壤碳储量,其中地上部分碳密度是指地表以上 0—20 cm 附近单位面积上碳储量的平均值;地下部分碳密度是指地表以下 0—20 cm 附近单位面积碳储量的平均值;土壤碳密度是指地表以下 20—100 cm 附近单位面积上碳储量的平均值^[12]。文中涉及的碳数据为碳密度,不同时期不同土地利用类型碳密度值均有差异。本文碳密度数据来源于重庆市森林资源调查数据,如无法获取的相关数据,根据其他碳库估算或默认设置为 0。汇总^[13-22]结果见表 1 至表 3 所示:

表 1 地上碳密度汇总			kg/m ²
年份	2000	2005	2010
草甸	0.20	1.39	0.50
草原、草地	0.23	3.53	2.93
耕地	0.55	3.15	3.87
灌木林	0.37	2.66	3.73
建设用地	0.01	0.28	0.33
阔叶林	5.13	5.83	5.85
裸地	0.01	2.08	2.26
其他林地	3.10	3.23	7.52
水体	0.06	1.52	2.14
园地	3.13	5.93	7.62
沼泽	0.41	4.22	8.90
针阔混交林	5.26	5.59	4.45
针叶林	7.12	7.07	4.17

表 2 地下碳密度汇总表 kg/m²

年份	2000	2005	2010
草甸	1.83	3.74	11.28
草原、草地	0.34	8.65	5.29
耕地	0.57	3.48	8.07
灌木林	0.11	6.75	7.25
建设用地	0.78	2.62	8.73
阔叶林	8.09	11.30	12.60
裸地	6.47	8.51	13.69
其他林地	7.06	6.25	11.59
水体	3.21	5.60	7.31
园地	6.27	9.22	11.05
沼泽	13.85	7.30	18.75
针阔混交林	5.34	14.04	23.02
针叶林	7.90	10.58	21.41

表 3 土壤碳密度汇总表 kg/m²

年份	2000	2005	2010
草甸	9.69	11.28	14.90
草原、草地	9.99	5.29	13.50
耕地	5.84	8.07	9.29
灌木林	5.43	7.25	12.76
建设用地	4.23	8.73	11.53
阔叶林	18.04	12.6	16.03
裸地	10.27	13.69	17.18
其他林地	18.53	11.59	38.05
水体	6.54	7.31	11.30
园地	8.35	11.05	14.22
沼泽	16.52	18.75	32.78
针阔混交林	22.57	23.02	24.85
针叶林	17.98	21.41	17.96

1.3 研究方法

本研究以 2000—2010 年重庆市 3 个时段的土地利用数据为基础,研究碳储量的时空变化,主要包括:土地利用变化及建设用地变化分析、InVEST 模型对碳储量估算、以及建设用地扩张对碳储量的影响。

1.3.1 土地利用变化分析 在 ArcMAP 10.2 中将两期土地利用图进行叠加计算,得出相交部分新的面积;将属性表导入 Excel 中,利用数据透视表功能计算出两期数据的土地利用转移矩阵。矩阵中 $r(i,j)$ 表示 i 类型向 j 类型转移的土地面积,空值表示未发生转移,相同土地利用类型之间的值表示保留的土地利用类型面积^[23]。

通过土地利用类型转移矩阵可以直接观察出土地利用类型的转化情况,同时可以直接提取出建设用地的转入与转出情况,结合 ArcMap 对建设用地进行

空间及时间变化分析。

1.3.2 碳储量估算 碳储量作为陆地生态系统的重要指标,不同地区不同土地利用类型碳储量不同,其变化直接影响着生态系统的变化。InVEST 模型全称为 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool,即生态系统服务功能综合估价和权衡得失评估模型,由美国斯坦福大学、TNC 和世界自然基金会联合开发^[24]。InVEST 模型主要用于研究淡水生态系统、海洋生态系统以及陆地生态系统,对于陆地生态系统而言,主要研究生物多样性、粉尘分析、木料分析以及碳储量分析。InVEST 是对生态系统进行定量评估,并把结果用图形的方式表达出来,能够模拟预测不同土地利用下生态系统服务功能的变化,变化包括物质和价值量两个方面^[25]。

InVEST 模型的碳储量模块计算方法如下:

$$C=C_{above}+C_{below}+C_{Soil}+C_{dead}$$

式中: C 表示碳总量 (t/km^2); C_{above} 表示地上部分碳储量; C_{below} 表示地下部分碳储量; C_{soil} 土壤部分碳储量; C_{dead} 死亡有机质碳储量^[25]。

本文采用新版的 InVEST 3.3.2 版本,与之前相比,不再是 ArcGIS 里的一个工具,而是独立的处理系统。因此,在运行模型时,可参照对应模块的案例,将数据调整为所需格式,必要数据缺一不可。

1.3.3 建设用地扩张对碳储量的影响 将建设用地与碳储量数据进行空间叠加,找出因建设用地转化影响碳储量不同程度变化的方向,进而确立合理的建设用地演化机制。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

根据土地利用现状图,做出重庆市 2000—2010 年土地利用转移矩阵:

从表 4 与表 5 中得出:2000—2010 年重庆市土地利用变化显著,其中耕地是主要的转出者,主要转换为建设用地和阔叶林;建设用地是主要的转入者,主要通过耕地、阔叶林等转化而来;草甸面积变化很小,转化不明显。其中最明显的变化主要有:耕地转化为建设用地,2005 年转化了 295.65 km²,2010 年转化了 754.55 km²;耕地转化为阔叶林,2005 年转化了 512.94 km²,2010 年转化了 691.34 km²;耕地转化为园地,2005 年转化了 229.04 km²,2010 年转化了 393.53 km²。建设用地的扩张来源于耕地,土地利用变化的主要矛盾在于耕地与建设用地的关系。

将建设用地转化关系提取得出表 6:

表 42000—2005 年土地利用类型转移矩阵

km²

类型	草甸	草原、草地	耕地	建设用地	阔叶林	裸地
草甸	173.01					
草原、草地		5794.58	102.73	0.10	5.39	
耕地		3.14	26218.42	1.64	96.48	
建设用地		1.27	295.65	567.96	215.62	
阔叶林		11.82	512.94	0.10	24237.54	
裸地						19.55
其他林地			1.27			
水体		10.30	121.02	18.52	213.49	9.78
园地		1.92	229.04	1.55	4.11	
针阔混交林		1.27	3.92		0.81	
针叶林		1.27	191.43		19.69	
总计	173.01	5825.56	27676.41	589.88	24793.15	29.33

类型	其他林地	水体	园地	针阔混交林	针叶林	总计
草甸						173.01
草原、草地			0.09	0.10	1.26	5904.25
耕地	0.10	2.37	1.23	0.20	21.33	26344.92
建设用地		0.10	5.12	0.10	11.45	1097.27
阔叶林	13.03	0.89	0.35	0.81	13.01	24790.50
裸地						19.55
其他林地	399.41					400.68
水体		771.64	11.51		29.22	1185.48
园地		0.10	851.92		2.60	1091.24
针阔混交林				1832.29		1838.29
针叶林				1.27	19192.42	19406.09
总计	412.54	775.11	870.22	1834.78	19271.29	82251.28

2000—2005 年期间,重庆市建设用 地转化为其他用地类型共 21.91 km²,大部分转化为水体,面积为 18.52 km²,占总转化的 85%;建设用地扩张占 用其他用地类型的面积达到 529.31 km²,耕地占总面积的 56%,阔叶林占 41%;这期间建设用地共增长了 507.39 km²,除草甸、裸地、其他林地未发生相互转化,水体侵占 18.42 km² 的建设用地面积,其他用地类型均对建设用地扩张具有补给作用。

2005—2010 年重庆市建设用地变化更加剧烈,转出面积有所减少,仅有 8.44 km²,且耕地和水体是主要的侵占来源,各占 40%。转出面积达到前 5 a 的 2 倍,面积为 1 066.63 km²,补给来源最多的耕地比例达到 75%,是建设用地最主要的扩张方向。这期间建设用地共扩张 998.19 km²,除草甸、裸地无明显变化之外,其余用地类型均被建筑用地侵占。

随着重庆市城市化进程的加快,建设用地需求量增大,重庆市建设用地 10 a 共增长了 1 505.58 km²,占耕地面积 1 045.16 km²,阔叶林 375.72 km²,针叶林 43.38 km²,草原、草地 32.72 km²。而水体则占据

建设用地面积 18.12 km²,是唯一占用建设用地面积较多的用地类型。

根据 2000 年、2005 年与 2010 年土地利用分布情况,做出建设用地变化图 1—2。

建设用地主要是由西部中心,逐渐向四周扩张,且增长速率加快。建设用地由 2000 年的 598.88 km² 增加到 2005 年的 1 097.27 km²,面积扩大至近 2 倍;从表 5 中看出,2010 年建设用地增加至 2 095.46 km²,面积扩大至近 2 倍,且增长量加倍。其中,两段时期耕地以及阔叶林被占用面积分别达到建设用地增长面积的 96.6%和 90.9%。因此建设用地占用耕地以及阔叶林是主要的扩张形式。

2.2 InVEST 模型对碳储量的估算

运行 InVEST 的 Carbon 模块,计算 2000 及 2005 年碳储量分布,结果见图 3—4。

根据运算结果得出 2000 年重庆市碳储量为 214.02 Mt,2005 年增长到 291.60 Mt,平均每年增长了 15.52 Mt。从图 3 与图 4 中可以看出,2000 年栅格单元碳储量最大的地区为 138.97 Mt,最小

37.90 Mt;2 005 碳储量最大的地区分布在耕地较多的中部地区,碳储量为 19 980.5 t,最少的分布在水体及裸地较多的地区,碳储量为 3 789.62 t,整体呈现增长趋势;纵观整个重庆市,碳储量呈现由西向东递增的趋势,这与东部地区植被覆盖度大于西部地区有关;图 5 表示单元栅格碳储量变化情况分布图,表

示碳储量增加与减少的情况。可以看出,重庆市西部地区碳储量明显减少,东部地区明显增多,减少最大量为 8 938.03 t,增长最大量为 10 315.4 t。运用 InVEST 模型中的碳价值评估模块得到图 6,以 43 \$ 每 t 的碳价格,按照 7%的市场折扣率计算得出 2005 年碳储量的经济价值共增长 11 908 842 \$。

表 5 2005—2010 年土地利用类型转移矩阵 km²

类型	草甸	草原、草地	耕地	建设用地	阔叶林	裸地
草甸	173.01					
草原、草地	5833.77	46.06		7.17		
耕地		3.57	24182.75	3.39	92.72	
建设用地		31.55	754.55	1088.83	160.60	
阔叶林		14.85	691.34	0.40	24442.58	
裸地						13.03
其他林地			1.23			
水体		17.92	173.74	3.36	51.42	6.52
园地		0.91	393.53	1.29	10.86	
针阔混交林		8.80		1.62		
针叶林		2.04	85.76		19.66	
总计	173.01	5904.61	26337.77	1097.27	24790.62	19.55

类型	其他林地	水体	园地	针阔混交林	针叶林	总计
草甸						173.01
草原、草地					0.91	5887.92
耕地	0.10	5.31	0.20	0.30	19.80	24308.15
建设用地	0.38	3.66	17.44	6.52	31.93	2095.46
阔叶林		2.54	1.27	1.48	23.24	25177.70
裸地						13.03
其他林地	406.48					407.71
水体		1173.86	6.52		1.08	1434.41
园地		0.10	1066.19	0.20	2.95	1475.66
针阔混交林				1829.70	1.27	1841.40
针叶林				0.10	19324.89	19432.45
总计	406.96	1185.48	1091.62	1838.29	19406.09	82251.28

表 6 重庆市建设用地变化统计 km²

类型	2000—2005 年			2005—2010 年			合计
	转出	转入	合计	转出	转入	合计	
草甸	0	0	0	0	0	0	0
草原、草地	0.10	1.27	1.17	0	31.55	31.55	32.72
耕地	1.64	295.65	294.00	3.39	754.55	751.16	1045.16
阔叶林	0.10	215.62	215.52	0.40	160.60	160.20	375.72
裸地	0	0	0	0	0	0	0
其他林地	0	0	0	0	0.38	0.38	0.38
水体	18.52	0.10	−18.42	3.36	3.66	0.30	−18.12
园地	1.55	5.12	3.57	1.29	17.44	16.15	19.73
针阔混交林	0	0.10	0.10	0	6.52	6.52	6.62
针叶林	0	11.45	11.45	0	31.93	31.93	43.38
总计	21.91	529.31	507.39	8.44	1006.63	998.19	1505.58

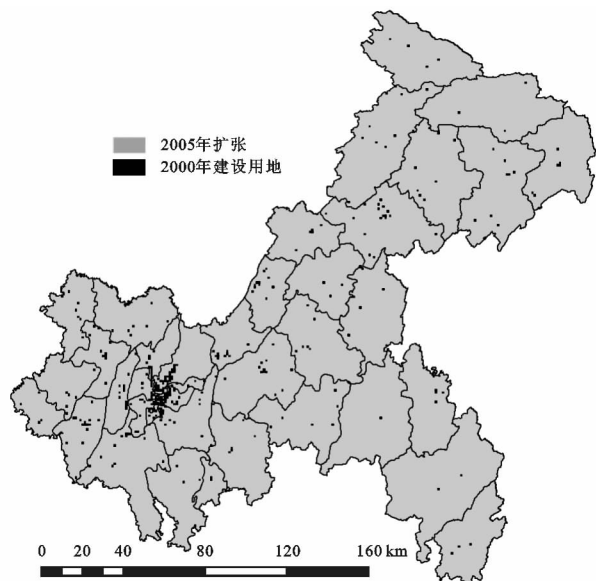


图 1 2000—2005 年建设用地扩张

运行 Carbon 模块,得到 2010 年碳储量分布,结果见图 7。根据运算结果得出 2010 年碳储量增长到 331.90 Mt,平均每年增长了 17.40 Mt。2010 年碳储量最大的地区分布在耕地较密集的地区,碳储量为 30 490.8 t,最少分布在水体及裸地较密集的区域,碳储量为 5 334.14 t,整体呈现增长趋势;纵观整个重庆市,碳储量呈现由西向东递增的趋势;从图 8 可以

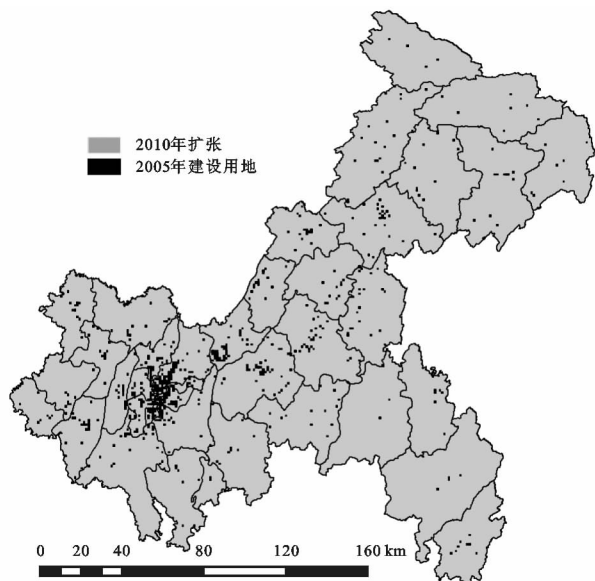


图 2 2005—2010 年建设用地扩张

看出,重庆市西部地区碳储量明显减少,东部地区明显增多,减少最大量为 9 602.76 t,增长最大量为 8 505.77 t;从图 9 可以看出,重庆市碳储量增长最多的地区贡献 320 923 \$,而碳储量减少最多的地区损失 362 312 \$。重庆市东部地区碳储量始终多于西部地区,从 2000—2010 年重庆市碳储量增长了 117.88 Mt,且碳储量的增长速率加快。

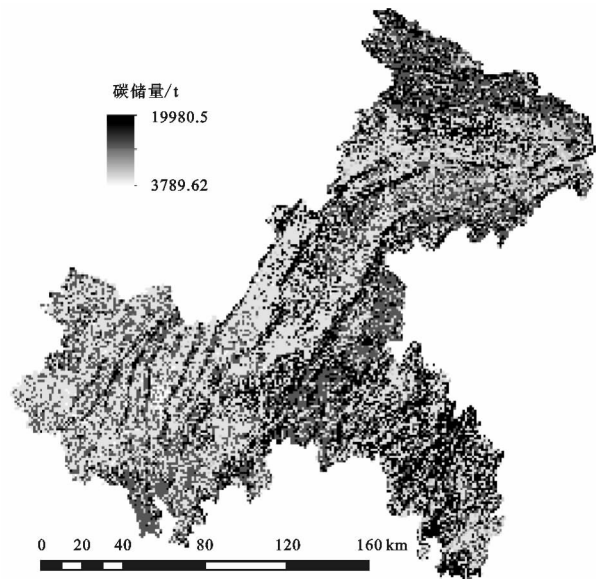


图 3 2000 年碳储量分布

2.3 建设用地扩张对碳储量的影响

建设用地的扩张区域与碳吸收量图相对应,明显可以看出建设用地扩张区域部分碳吸收量为负值,且占据的是固碳能力较强的耕地与阔叶林,大幅度地降低了整体的碳储量值。

将 InVEST 模型运行结果与土地利用图进行叠加,统计出不同土地利用类型碳储量的变化,见表 7。

从表 7 中可以看出,2000—2005 年耕地面积减少最

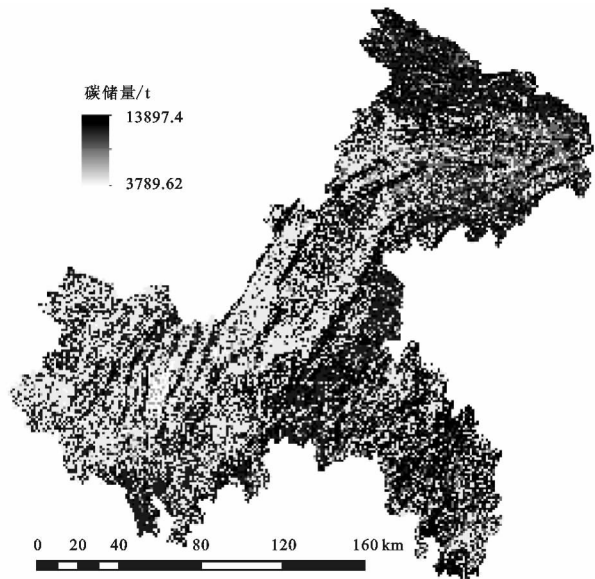


图 4 2005 年碳储量分布

多为 1 331.49 km²,但碳储量增加 15.17 Mt,占总增长的 50%;建设用地面积增长最多为 507.39 km²,其碳储量增加 1.12 Mt;针叶林面积增加 134.80 km²,碳储量却减少最多为 9.15 Mt;草甸面积未发生明显变化,但碳储量增加 0.07 Mt。2005—2010 年耕地面积依然减少最多为 2 029.63 km²,碳储量减少 4.02 Mt;建设用地面积增加最多 998.19 km²,碳储量增加 1.64 Mt;针叶林转化增加的碳储量最多为 31.24 Mt,面积增加了 26.37

km²;草甸依旧无明显变化,碳储量增加 0.26 Mt。裸地 10 a 共减少了16.40 km²,共减少 0.04 Mt 碳储量。由此可见,重庆市固碳能力较强的是耕地与阔叶林,固碳能力较弱的是裸地。尽管固碳能力较强的耕地面积大

量减少,相对较多的建设用地面积大量增加,由于大部分土地利用类型固碳能力随着时间增强即碳密度增加,因此碳总量持续增长。耕地虽然大量减少,并不代表碳总量会减少。

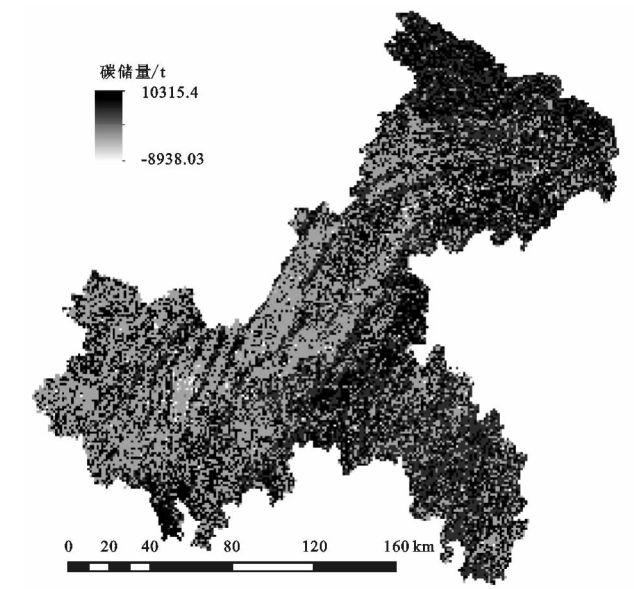


图 5 2000—2005 年碳储量变化

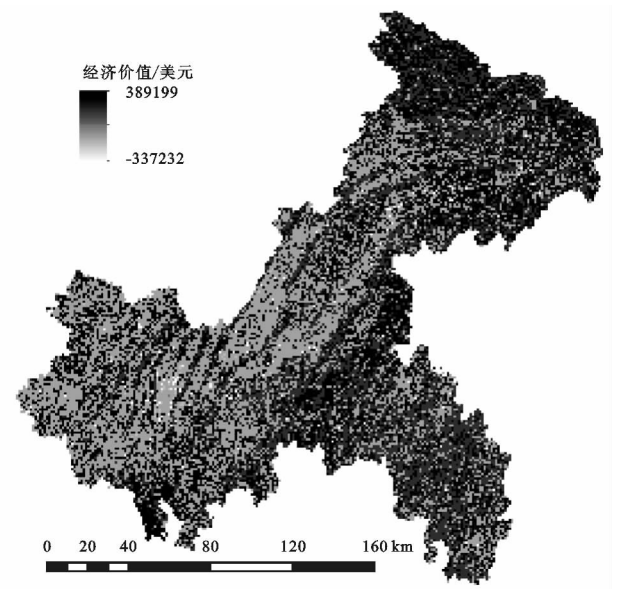


图 6 2005 年碳经济价值分布

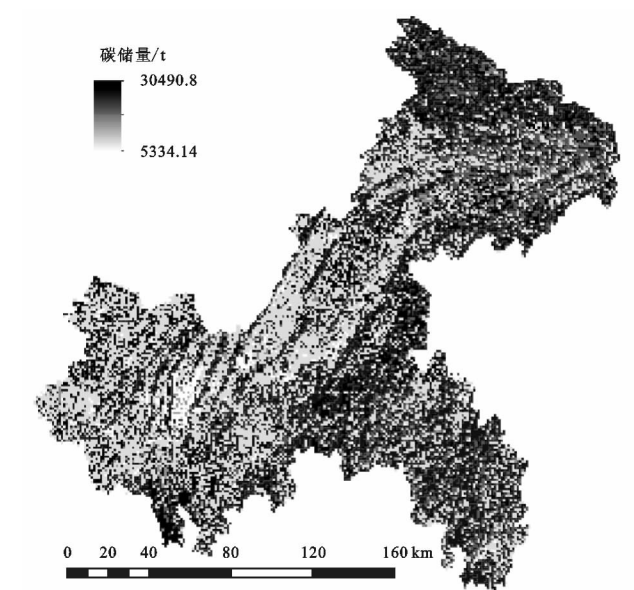


图 7 2010 年碳储量分布

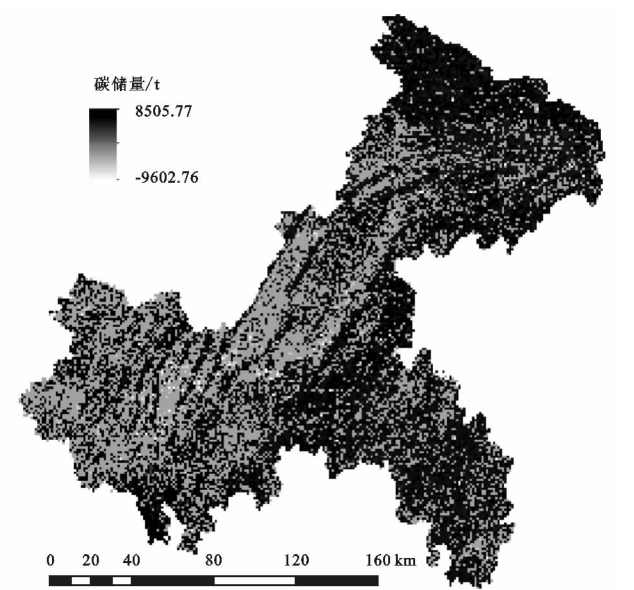


图 8 2005—2010 年碳储量变化

把碳储量数据与土地利用类型图结合,可算出不同土地利用类型单位面积碳储量。根据建设用地的面积变化,计算出因建设用地扩张影响的碳储量变化,见表 8。

2000—2005 年建设用地因转化为其他用地类型而增加的碳储量为 14 207.47 t,因扩张占用其他用地类型而减少的碳储量为 564 098.35 t,净损失碳储量 549 890.88 t。在建设用地转化为其他用地类型的过程中,水体是主要的碳储量贡献者,提供了 10 581.52 t 碳储量,其次是园地 2 622.71 t;在建设用地扩张过程中,

占用阔叶林导致碳储量减少 404 931.15 t 碳储量,占总损失的 72%,其次是耕地 128 691.17 t。2005—2010 年建设用地在转化为其他用地增加的碳储量依次为园地 2 223.28 t、水体 1 883.62 t、耕地 1 537.11 t、阔叶林 1 437.54 t,共增长了 7 081.55 t 碳储量。而扩张造成的碳储量损失最多的为阔叶林 580 475.70 t,其次是耕地 341 934.89 t、针叶林 107 698.76 t,共造成 1 177 063.73 t 碳储量减少,碳储量净损失达到 1 169 982.18 t。可见,建设用地扩张过程中,碳损失的主要来源为耕地及阔叶林,其次是针叶林、草原、草地等。

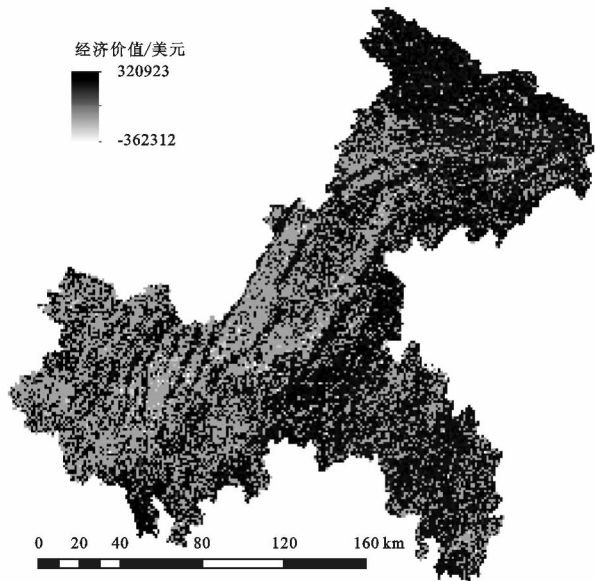


图 9 2010 年碳经济价值分布

表 7 不同土地利用类型碳储量变化

类型	2000—2005 年		2005—2010 年	
	面积/km ²	碳储量/Mt	面积/km ²	碳储量/Mt
草甸	0	0.07	0	0.26
草原、草地	78.69	5.21	−16.70	9.12
耕地	−1331.49	15.17	−2029.63	−4.02
建设用地	507.39	1.12	998.19	1.64
阔叶林	−2.64	13.15	387.08	44.90
裸地	−9.78	−0.02	−6.52	−0.02
其他林地	−11.86	1.85	0.75	1.05
水体	410.37	1.45	248.93	0.53
园地	221.02	1.33	384.04	1.32
针阔混交林	3.52	0.61	3.10	3.08
针叶林	134.80	−9.15	26.37	31.24
总计	0	30.80	0	89.10

表 8 建设用地变化对碳储量的影响

类型	2000—2005			2005—2010		
	转出	转入	合计	转出	转入	合计
草甸	0	0	0	0	0	0
草原、草地	100.23	−1271.42	−1171.18	0	−80863.77	−80863.77
耕地	714.68	−128691.17	−127976.49	1537.11	−341934.89	−340397.78
阔叶林	188.33	−404931.15	−404742.81	1437.54	−580475.70	−579038.16
裸地	0	0	0	0	0	0
其他林地	0	0	0	0	−2951.84	−2951.84
水体	10581.52	−57.29	10524.23	1883.62	−2052.34	−168.72
园地	2622.71	−8670.27	−6047.56	2223.28	−30079.00	−27855.72
针阔混交林	0	−309.63	−309.63	0	−31007.43	−31007.43
针叶林	0	−20167.43	−20167.43	0	−107698.76	−107698.76
总计	14207.47	−564098.35	−549890.88	7081.55	−1177063.73	−1169982.18

3 结论与讨论

重庆市建设用地扩张进程加快,共增长 1 505.58 km²,建设用地主要是由西部中心,逐渐向四周扩张,且增长速率加快。2000—2005 年建设用地面积增长最多为 507.39 km²,其碳储量增加 1.12 Mt;但由于占用其他用地类型使得总碳储量减少了 549 890.88 t;2005—2010 年,碳储量增长 89.10 Mt,建设用地由 1 097.27 km²,增长了 998.19 km²,造成碳净损失 1.19 Mt;其中,两段时期耕地以及阔叶林被占用面积分别达到建设用地增长面积的 96.6%和 90.9%。因此建设用地占用耕地以及阔叶林是主要的扩张形式。

总体来看,重庆市从 2000—2010 年碳储量呈现增长的趋势,耕地与阔叶林固碳能力最强,累计贡献占 50%以上。只有裸地的碳储量持续减少,固碳能

力最弱。建设用地固碳能力一般,由西部中心向四周加速扩张,侵占大量的耕地与阔叶林,对重庆市固碳水平具有抑制作用。选择固碳能力较弱的草甸及裸地,作为建设用地扩张的主要目标,即稳固了固碳能力或减少碳储量的损失,又不影响城市化的推进。

参考文献:

[1] Yu G, Li X, Wang Q, et al. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010,1(2):97-109.

[2] 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 (IPCC) [M]. Cambridge: Cambridge University, 2000.

[3] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014,65(1):2-3.

- [4] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展,2007,26(6):1-10.
- [5] 张文华,贾志斌,卓义,等. InVEST 模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析[J]. 地球环境学报,2016,7(1):87-96.
- [6] 修珍珍,王斌,杨校生,等. 基于 InVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量[J]. 广西植物,2016,36(7):868-874.
- [7] 荣月静,张慧,赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):447-451.
- [8] 吴佩君,刘小平,黎夏,等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
- [9] 汪小平,周宝同,王小玉,等. 重庆市土地利用变化及其生态系统服务价值响应[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2009,34(5):225-229.
- [10] 张云倩,张晓祥,陈振杰,等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究,2016,23(3):100-105.
- [11] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学,2011,33(10):1932-1939.
- [12] 王绍强,罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(3):238-244.
- [13] 田多松,傅碧天,吕永鹏,等. 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[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(4):613-620.
- [14] 奚小环,张建新,廖启林,等. 多目标区域地球化学调查与土壤碳储量问题:以江苏、湖南、四川、吉林、内蒙古为例[J]. 第四纪研究,2008,28(1):58-67.
- [15] 解宪丽. 基于 GIS 的国家尺度和区域尺度土壤有机碳库研究[D]. 南京:南京师范大学,2004.
- [16] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [17] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究,1999,18(4):349-356.
- [18] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544.
- [19] 李克让,王绍强,曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学,2003,33(1):72-80.
- [20] 遇蕾,任国玉. 全新世中国陆地生态系统碳储量变化的估算[J]. 气候变化研究进展,2008,4(1):12-16.
- [21] 黄小辉,唐小荃,邵呈龙,等. 重庆市森林植被碳储量及其地理分布格局[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2012,37(1):82-87.
- [22] 孟祥江,周恺. 基于森林资源 2 类调查数据的重庆市森林碳储量估算研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(27):11038-11040.
- [23] 王鹏程,邢乐杰,肖文发,等. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量[J]. 生态学报,2009,29(1):97-107.
- [24] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学,2013,33(4):58-62.
- [25] 韩晋榕. 基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析[D]. 长春:东北师范大学,2013.

~~~~~

(上接第 322 页)

- [16] Santhi C, Allen P M, Muttiah R S, et al. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions[J]. Journal of Hydrology, 2008,351(1/2):139-153.
- [17] 周飞. 固原市原州区清水河流域水资源综合评价[J]. 安徽农业科学,2011,39(35):21950-21951.
- [18] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 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[J]. 地理学报,2014,69(1):3-14.
- [19] 梁四海,万力,张建锋,等. 黄河源区枯季基流的周期变化规律与成因[J]. 自然科学进展,2007,17(9):1222-1228.
- [20] 邬建国. 生态学一格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2000:100-108.
- [21] 刘宇,吴炳方,曾源,等. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2581-2589.
- [22] 党素珍,王中根,刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. 资源科学,2011,33(12):2232-2237.
- [23] 高春河. 固原市原州区水土保持生态环境建设现状及治理方向[J]. 科技资讯,2009(16):139-139.
- [24] 张清云,王宁庚,杨朝霞,等. 宁夏中部干旱带沙地人工甘草不同种植密度土壤水分时空变化及产量性状分析[J]. 水土保持研究,2017,24(1):32-35.
- [25] 黄硕,郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述[J]. 生态学报,2014,34(12):3142-3150.
- [26] 李承桢,信桂新,杨朝现,等. 传统农区土地利用与覆被变化(LUCC)及其生态环境效应[J]. 西南大学学报:自然科学版,2016,38(5):139-145.
- [27] 赵成,顾小华,姜宏雷,等. “三江”流域(云南部分)土地利用变化的生态环境效应研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):240-243.