土地利用/覆被变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力的影响

黄 露[1], 周 伟[1], 李浩然[1], 周富春[2], 杨 晗[1]

(1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院 地理信息与国土资源系, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘 要: [目的] 探究土地利用/覆被变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力(NPP)的影响,为该区退牧还草措施的高效实施和草地资源的合理管理提供理论依据。[方法] 基于多源遥感影像数据、多期土地利用/覆被数据和气象数据等,运用光能利用率模型(CASA),模拟鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力(NPP),并进行分析和探讨。[结果] ①鄂尔多斯地区草地 NPP 总量在 2001 年(5 700.16 Tg)到 2015 年(7 634.61 Tg)间增加了 1 934.46 Tg;空间分布上存在明显的地域差异性。②该市 2001—2015 年耕地面积持续减少;15 a 间,林地面积增加了 4 593 km^2;草地净减少量为 786.38 km^2,其中草地与未利用地之间的相互转化最大,有大量耕地、林地转变为草地,面积达到 376.5 km^2。③该市 2001—2015 年草地类型未发生变化地区 NPP 增长量为 1 999.42 Tg;草地转为其他土地类型共引起草地 NPP 减少量为 303.98 Tg,其中转为耕地、林地和未利用地导致其 NPP 减少量分别为35.08,69.81 和 118.28 Tg;其他土地类型转化为草地导致 NPP 的总增加量达 128.96 Tg,其中由耕地、林地、水域、未利用地转化带来的草地 NPP 增量分别为 36.30,31.39,17.58,151.38 Tg。[结论] 土地利用/覆被对草地 NPP 影响较大,耕地和林地向草地的转化、未利用地的重新利用使得草地碳汇总量增加。草地向未利用地、水域、城乡工矿居民用地的转化使得草地生态系统碳汇能力减弱。

关键词: 草地净初级生产力; LUCC; CASA 模型; 鄂尔多斯市

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0046-07 **中图分类号**: X171.1

文献参数: 黄露, 周伟, 李浩然, 等. 土地利用/覆被变化对鄂尔多斯市草地生态系统净初级生产力的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 46-52. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.008. Hhuang Lu, Zhou Wei, Li Haoran, et al. Effect of land use/cover change on grassland NPP in grassland ecosystem of Ordos City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 46-52.

Effect of Land Use/Cover Change on Grassland NPP in Grassland Ecosystem of Ordos City

HUANG Lu[1], ZHOU Wei[1], LI Haoran[1], ZHOU Fuchun[2], YANG Han[1]

(1. *Department of Geographic Information and Land Resources, College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*)

Abstract: [Objective] To Explore the effect of land use/cover change on the net primary productivity(NPP) in grassland ecosystem of Ordos City in order to provide theoretical basis for the efficient implementation of grassland grazing mitigation measures and the reasonable management of grassland resources. [Methods] Based on multi-source remote sensing image data, multi-period land use/cover data and meteorological data, using Carnegie Ames Stanford Approach(CASA), the NPP of grassland ecosystem was simulated and the land use change was demonstrated. Upon which, the impact of land use/cover change(LUCC) on grassland NPP in Ordos City was analyzed. [Results] ① The grassland NPP in Ordos City increased gradually from 5 700.16 Tg in 2001 to 7 634.61 Tg in 2015. There existed significant regional difference in NPP spatial

收稿日期: 2017-12-30 **修回日期**: 2018-01-17

资助项目: 国家自然科学基金项目"退牧还草工程生态效益逆转监测评价及其驱动力机制研究"(41501575); 重庆市科委基础科学与前沿技术项目"退牧还草工程区退化草地生态效益逆转变化的遥感监测研究"(cstc2016jcyjA1540); 重庆交通大学 2017 年大学生创新创业训练计划项目(201710618084)

第一作者: 黄露(1994—),女(汉族),重庆市人,硕士研究生,研究方向为生态环境监测与生态恢复。E-mail: h_l9168@163.com。

通讯作者: 周伟(1984—),女(汉族),山东省泰安市人,博士,副教授,主要从事生态环境遥感监测和 3S 技术方面的研究。E-mail: zhouw866@163.com。

distribution. ② From 2001 to 2015, the area of arable land continued to decrease. While, the area of forest increased, with a total increase of 4 593 km^2. The net reduction of grassland area was 786.38 km^2. For the mutual land use conversion, the one between grassland and unutilized land was the largest. And also there were a large amount of arable land and the woodland, with total area of 376.5 km^2, were converted into grassland. In contrast, the largest decreasing in grassland that was converted to unutilized land was 1 211.50 km^2. ③ From 2001 to 2015, the NPP increased by 1 999.42 Tg in grassland covered area. The changes of grassland to other types of land led to a NPP reduction of 303.98 Tg. Among of them, the conversions to cultivated land, forest and unused land accounted for 35.08 Tg, 69.81 Tg and 118.28 Tg, respectively. Additionally, the conversion of other types of land to grassland resulted to an increase of NPP, totaled to 128.96 Tg. The increments of grassland NPP from farmland, forestland and water were 36.30, 31.39 and 17.58 Tg, respectively. [Conclusion] Land use/cover has a greater impact on grassland NPP. Conversions of cultivated land and forest to grassland and reuse of unused land all increased grassland carbon sink. The conversions of grassland to unutilized land, water areas, and urban-rural residents' land for industrial and mining uses could all weaken carbon sinks of grassland ecosystem.

Keywords: grassland net primary productivity; LUCC; CASA model; Ordos City

陆地生态系统是重要的碳库之一[1],在全球碳循环中发挥碳源/汇作用[2],其碳汇功能主要表现为碳的积累速率,碳源则体现在碳的排放强度上[3]。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)作为研究生态系统物质和能量的基础,是植物生化特性与外界环境共同作用的结果[4],反映了植被固定光合产物并向生态系统,特别是土壤碳库输入碳素的能力[5],是调节生态过程的主要因子,能够直接表征生态系统碳源/汇状况。Lieth[6]等建立了第一个全球NPP回归模型(Miami模型),认为NPP是年平均气温和年降雨的函数。有研究[7]表明,中国陆地植被NPP由西北至东南依次递减,其变化主要受气候和人类活动等作用的影响。区域尺度上,学者分别对内蒙古草原[8],新疆地区[9],三江源区地区[10-12],青藏高原[13-14]和西南等地区的植被NPP时空格局、变化规律以及其与影响[15-16]因素的相关性进行了研究。土地利用/覆被变化(land use and cover change, LUCC)能够显著改变地球表面覆盖状况,也是全球碳排放的重要因素[17];LUCC同时影响着陆地生态系统对大气中CO_2以及其他温室气体的吸收和排放[18]。

最早关于LUCC的研究主要集中于土地利用/覆盖类型的人工调查、分类与制图等方面。20世纪上半叶,随着工业化和城镇化的发展,土地利用/覆被变化的研究逐渐趋于科学化和系统化,并应用于经济、社会和地理等学科之中[19]。张希彪[20]以20世纪最后15 a陇东地区土地利用/覆被为研究对象,认为该区域人类活动和自然环境的变化是土地利用变化的基本驱动力,且提出水文状况是该地区土地利用变化的主导自然驱动因素。邹亚荣[21]的研究认为,青藏高原海拔的上升通过引起晚新生代北半球气候变化,促使中国北方气候干旱化和农牧交错区形成,并对东部草地变化产生影响。Houghton等人[22]研究表明,1850—2000年全球土地利用变化导致碳排放量达156 Gt,约占人为碳排放的33%。有研究[23-26]表明,自然干扰、土地利用状况以及人类活动等引起的地表变化决定了生态系统碳储量的大小,同时LUCC会直接影响到植被和土壤的固碳能力,进而影响到整个生态系统的碳源/汇功能[27]。DeFries等[28-29]早在1999年运用CASA模型模拟植被NPP,并分析LUCC对生态系统NPP变化的影响。Dong[30]和Hackler[31]等利用FAO土地利用/覆盖数据,采用二氧化碳定量还原方法,并对不同类型植被设置不同的参数,研究了土地利用变化状况及其与影响因素之间的关系。另外,陈广生等[32]在关于LUCC对陆地生态系统碳循环的影响研究中,得出不同土地利用/覆被变化格局会造成大小各异的碳释放,且不同区域的土地利用/覆被变化对生态系统碳交换格局的影响也不一致。然而,草地生态系统占陆地总面积的25%,超过3.00×10^8 hm^2,是全球陆地生态系统的主要类型之一,在全球碳循环中起着重要作用,并且大陆中纬度地区的草地是重要的碳汇,全球草地生态系统碳储量约为266.3 Pg,约占陆地生态系统碳储量的12.7%[33-34]。

研究草地碳循环机制,同时估算其碳贮量状况也是目前国际地圈—生物圈研究计划(IGBP)中碳循环研究的重要组成部分[35]。因此,系统分析草地的生态价值、草地植被在全球气候变化中的贡献,对于全球碳循环和碳收支平衡研究具有重要意义。然而目前深入地揭示LUCC对草地NPP变化的精细化定量化方面的研究还显不足。

为此，本研究选取内蒙古自治区鄂尔多斯市作为研究区域，该地区属于北温带半干旱大陆性气候区，对气候变化响应敏感；同时又是全国退耕还林、退牧还草生态工程的重点实施区域[30,36]，因此，利用遥感和GIS技术，基于模型模拟，针对该区域草地NPP时空格局以及对土地利用/覆被变化的响应机制进行探讨，研究结果可为退牧还草措施的高效实施和草地资源的合理管理提供重要的理论依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部，黄河中上游(106°42′—111°27′E，37°35′—40°51′N)。地势由南北向中部隆起，海拔高度1 400～1 700 m，自南而北带状分布的地貌类型有毛乌素沙地、准格尔东胜高平原、库布齐沙漠和黄河沿岸冲积平原。东、南、西与晋、陕、宁接壤，北及东北与草原钢城包头以及自治区首府呼和浩特隔河相望[37]。鄂尔多斯地处温带季风区西缘[38]，年均温度为6～8 ℃，1月均温－14～－8 ℃，7月均温22～24 ℃；年均降水量为150～500 mm，主要集中于7—9月。植被类型主要以旱生、沙生的半灌木为主[39]，从东南到西北方向，其植被依次划分为典型草原亚带、荒漠草原亚带和草原化荒漠亚带。

1.2 数据来源与处理

光能利用率(carnegie ames stanford approach，CASA)模型被广泛地应用于区域净初级生产力和土地利用变化对碳源/汇影响的估算之中，该模型是从植被机理出发建立的遥感参数模型，基本参数包含植被指数、土地覆被类型、土壤水分、地表温度和太阳辐射等[40-41]。数据来源及处理方法为：归一化植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)采用MODIS的MOD13 Q1数据，包括2001，2007，2015年这3个年份其空间分辨率为250 m×250 m，时间分辨率为16 d。利用最大值合成法，经过投影转换和裁剪等处理后得到3个年份植被NDVI数据[42]。2001，2007，2015年各月气象数据源于国家气象科学数据共享服务平台(http：//data.cma.cn/)，月均气温和月总降水量选取内蒙古70个站点数据，月总太阳辐射数据来源于18个辐射站点，经过数据格式转换、空间插值、裁剪等操作后得到各月份气象数据。LUCC数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(http：//www.resdc.cn/)，分别采用2000，2005，2015年(分别对应2001，2007，2015年NDVI数据)全国土地利用/覆被数据分辨率为1 km，并对其进行投影转换、裁剪等处理得到研究区3个年份的LUCC数据。该数据包括6个Ⅰ级分类：耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用地。为了数据的精确性和研究结果的科学性，需对所有数据统一分辨率，由于NDVI是CASA模型中的重要参数，对NPP模拟结果影响较大，且其分辨率为250 m×250 m，故以上NDVI数据、气象数据和LUCC数据均统一转换为250 m×250 m空间分辨率，投影坐标为WGS84_Albers。

1.3 研究方法

1.3.1 *模型及原理* 估算陆地生态系统NPP的模型有3种，即参数模型、统计模型和过程模型。本文基于已有的CASA模型[43]，结合中国科学院土地利用/土地覆被分类标准，对研究区域耕地、林地、草地等NPP进行核算。该模型主要由气象数据和植被NDVI数据等作为基本参数，结合植被吸收光合作用的有效辐射、温度胁迫系数、水分胁迫系数和最大光能利用率等参数对植被NPP进行核算[33,44-46]。其中植被NPP主要由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(E)决定。

$$NPP(x,t)=APAR(x,t)-E(x,t)$$

式中：$APAR(x,t)$——像元x在t月份吸收的光合有效辐射(MJ/m^2/月)；$E(x,t)$——像元x在t月份的实际光能利用率(g/MJ)。

$$APAR(x,t)=SOL(x,t)\cdot FPAR(x,t)\times 0.5$$

式中：$SOL(x,t)$——像元x在t月份吸收的太阳总辐射量(MJ/m^2/月)；$FPAR(x,t)$——植被层对入射光合有效辐射的吸收比例；0.5——植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

光能利用率是指植被把所吸收的光合有效辐射(PAR)转化为有机碳的效率。在理想条件下，通常认为植被具有最大光能利用率，但是在实际情况中，真实最大光能利用率$E(x,t)$还受气温和降水的影响，具体计算公式为：

$$E(x,t)=T_{E1}(x,t)\cdot T_{E2}(x,t)\cdot W_E(x,t)\cdot E_{max}$$

式中：$T_{E1}(x,t)$——指高温对光能利用率的胁迫作用；$T_{E2}(x,t)$——低温对光能利用率的胁迫作用；$W_E(x,t)$——水分胁迫系数，它主要表示核算的NPP受水分状况的影响程度；E_{max}——理想条件下的最大光能利用率(g/MJ)。

温度、水分等胁迫因子计算过程参照前人[47]的研究结果。最大光能利用率的取值随着植被类型的不同而有差异，本文参考朱文泉等[43,47]模拟出的中国典型植被最大光能利用率取值，其中耕地、草地、水

域和城乡工矿居民用地以及未利用土地,光能利用率的取值为 0.542 g/MJ;并选取全球公认值 0.389 g/MJ 作为林地的最大光能利用率。

1.3.2　精度验证　利用 2008 年 7—8 月在鄂尔多斯地区实测得到的 11 个草地样方生物量数据,根据马文红等[48]对内蒙古草地地上和地下生物量分配比例的研究,将其换算成草地植被地上、地下植被生产力,得到草地实测 NPP 数据,并进行模型精度验证。图 1 为草地 NPP 模型模拟值和样本实测值的相关性分析结果,$R^2=0.9168$($p<0.001$),结果表明,模型模拟精度高,该模型可以应用在鄂尔多斯草地 NPP 的模拟中。

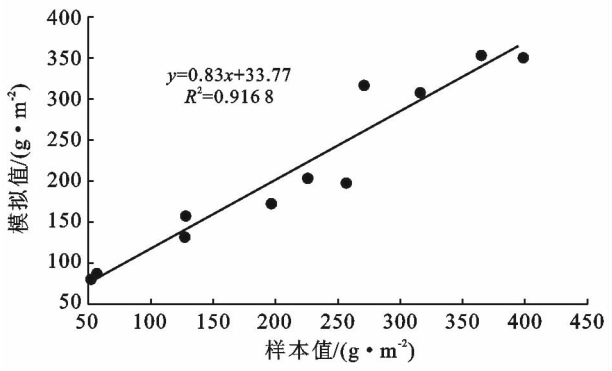


图 1　NPP 模拟值与实测值检验散点分布

2　结果分析

2.1　NPP 时空格局分析

2.1.1　草地 NPP 空间分布特征分析　鄂尔多斯市草地 NPP 在空间上呈现明显的地域差异性(附图 1),NPP 值自东南向西北递减,分析原因主要是植被生长水分条件的影响,由于降水和蒸散发的综合作用使得水分状况出现自东南向西北递减的规律[8]。同时 NPP 的空间分布上表现出明显的经度地带性,以 2015 年最为显著:107°E 附近,NPP 介于 1～50 g/m^2 之间,109°E 附近 NPP 在 100～150 g/m^2,110°E 附近数值最大,NPP 介于 200～500 g/m^2。

2.1.2　草地 NPP 时间变化特征分析　由附图 2 可以看出,研究区草地 NPP 总量逐年上升,2001 年为 5 700.16 Tg,2007 年为 6 528.71 Tg,2015 年为 7 634.61 Tg,15 a 间草地 NPP 总增加量为 1 934.46 Tg。草地 NPP 年平均值在 2001 年〔107.49 g/(m^2 · a)〕,2007 年〔125.86 g/(m^2 · a)〕,2015 年〔146.14 g/(m^2 · a)〕也逐年增加。这可能是由于:一方面,退牧还草工程等促进草地面积增加,最终带来草地 NPP 的增加[49];另一方面,气候的暖湿化使得草地固碳能力增强[50],统计表明,在这 15 a 间,鄂尔多斯大部分地区的草地 NPP呈现增长趋势,年增长率为 3 g/(m^2 · a)。草地在全球碳循环中占有重要的作用,在鄂尔多斯地区,草地分布最广。若只考虑土地利用变化,2001—2007 年草地生态系统 NPP 减少的总量为 112.16 Tg;2007—2015 年总增加量为 47.20 Tg。2001—2007 年,鄂尔多斯西部地区草地 NPP 普遍增加;但在东南部大部分地区草地 NPP 减少;东北部地区变化情况不稳定,有增有减。原因可能是西部及北部地区分布着大量的油蒿、禾草和冷蒿等植被[51],这类植被生长较为旺盛,同时对碳的固定能力较强。2007—2015 年草地 NPP 的空间变化特征与 2001—2007 年相反,东部地区草地 NPP 普遍增加,变化范围在 123～365 g/m^2 之间,其原因可能是气候的大规模不规则变化[50]和生态恢复工程的政策影响等。

2.2　LUCC 状况分析

将 3 个代表年份的土地利用类型面积进行统计分析,得到土地利用/覆被面积变化的转移矩阵(表 1—2)。由表 1 可知,2001—2007 年,草地类型保持不变的面积为 51 264.81 km^2,占比 96.67%;耕地和林地转为草地的面积分别为 119.06,92.50 km^2;未利用地恢复为草地的面积为 338.81 km^2。但与此同时,也有大量草地退化为未利用地,面积达 1 135.50 km^2,转化率为 2.14%;草地转化为耕地和林地的面积为 214.19,302.25 km^2;草地转化为水域和城乡工矿居民用地的面积分别为 34.56 和 76.88 km^2,草地与其他土地类型相互转移共导致草地净减少1 154.51 km^2。由表 2 可知,2007—2015 年,没有发生类型变化的草地面积为 51 167.50 km^2,占草地总面积的 98.65%。耕地、林地、未利用地转化为草地的面积分别为 73.94,91.00,851.56 km^2。草地向林地和城乡工矿居民用地转化的面积分别为 151.06 和 434.88 km^2,转为水域和未利用地的面积仅为 40.75和76.00 km^2。15 a 间,草地未发生变化的面积为51 167.50 km^2,但其他类型转化为草地的总面积为1 683.18 km^2,相反,草地转为其他土地类型面积为2 466.07 km^2。

2.3　LUCC 对草地 NPP 影响分析

2.3.1　未发生土地利用类型变化区域的 NPP 分析　在两个研究时段内,在土地利用类型未发生变化的地区,草地的 NPP 数值均有所增加,2001—2007 年总增加量为 940.73 Tg,2007—2015 年草地 NPP 总量增加了 1 058.70 Tg。在草地未发生类型变化的地区,土地利用方式的改善和气候条件的变化都会成为该区域碳储量增加的重要原因。

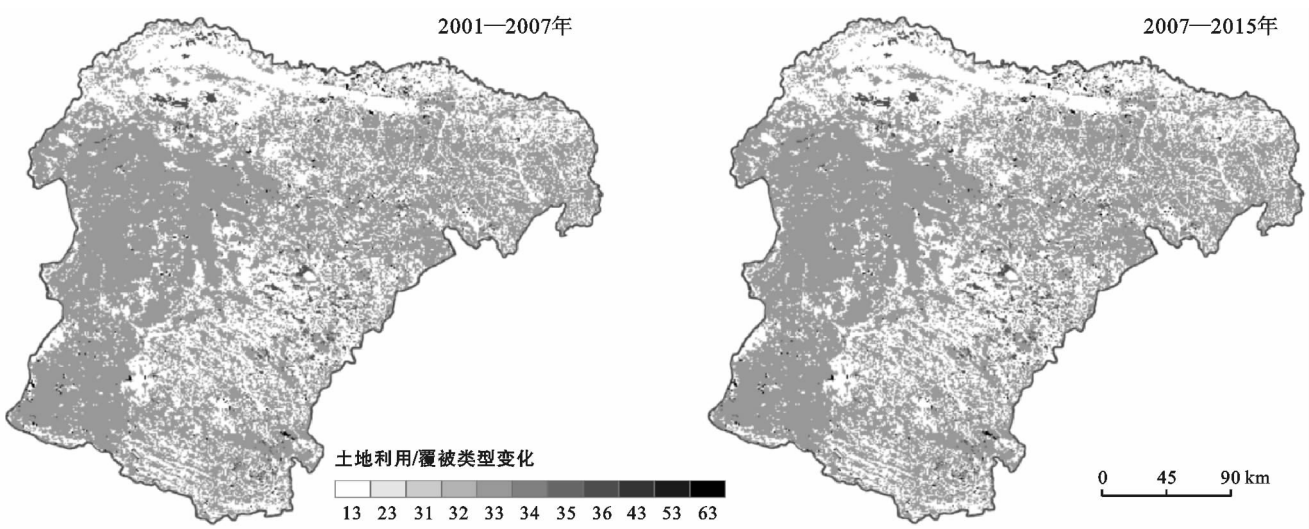
表 1 鄂尔多斯市 2001—2007 年土地利用类型面积转移矩阵 km²

项 目		2007 年面积					
		耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用土地
2001 年面积	耕地	4228.44	107.00	119.06	16.88	14.00	16.00
	林地	16.00	1526.81	92.50	2.50	13.00	28.00
	草地	214.19	302.25	51264.81	34.56	76.88	1135.50
	水域	16.75	11.00	56.50	1809.88	1.00	83.13
	城乡、工矿、居民用地	1.00	1.00	2.00	0.00	813.44	1.00
	未利用土地	12.00	42.69	338.81	27.50	10.00	24115.19

表 2 鄂尔多斯市 2007—2015 年土地利用类型面积转移矩阵 km²

项 目		2015 年面积					
		耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用土地
2007 年面积	耕地	0	4 319.06	73.94	29.81	63.69	7.00
	林地	0	1 843.75	91.00	9.19	37.94	9.50
	草地	0	151.06	51 167.50	40.75	434.88	76.00
	水域	0	18.19	46.81	1 806.00	21.00	19.13
	城乡、工矿、居民用地	0	4.00	11.00	3.94	906.88	3.00
	未利用土地	0	248.63	851.56	52.38	114.06	24 112.19

2.3.2 土地利用类型变化对草地 NPP 影响分析 研究区域 LUCC 变化及其带来的草地 NPP 变化情况空间分布如图 2—3 所示。土地利用/覆被变化对草地 NPP 的影响主要表现在草地转为其他用地类型的减少和其他类型土地转为草地的增加上。2001—2007 年,由于草地转为其他土地类型共导致 NPP 总量减少 205.53 Tg,其中转化为耕地、林地减少量分别为 35.08 和 46.79 Tg,转化为水域和城乡工矿居民用地时草地 NPP 的减少量分别为 5.46 和 9.31 Tg,转化为未利用地时的减少量为 108.88 Tg,占总减少量的 52.98%。2007—2015 年,草地转化为其他类型土地所引起的 NPP 总减少量为 98.45 Tg,其中转化为林地和水域时的减少量为 23.03 和 5.21 Tg,转化为城乡工矿居民用地的减少量为 60.82 Tg,占减少量的 62%;转化为未利用地时草地 NPP 减少量为 9.40 Tg。草地转化为水域、城乡工矿居民用地时,大量植被被毁,土壤碳储量降低,草地 NPP 减小。草地转化为耕地、林地时,虽然其转化之后该地区仍然有植被存在,但不同植被类型其生产力不同,并对生态系统结构和功能的影响也不同。



注:图中数字表示土地利用/覆被类型变化,两位序号代表前者转为后者,如 13 代表耕地转为草地。

图 2 研究区 2001—2007 年和 2007—2015 年 LUCC 空间分布

2001—2007 年,由于其他土地类型转化为草地导致草地 NPP 的增量为93.37 Tg C,其中由耕地、林地、水域、未利用地转化为草地使草地 NPP 增加量分别增量分别为 21.56,14.89,9.53,47.10 Tg。2007—2015 年,其他类型土地转化为草地所带来的草地 NPP 总增加量为 145.65 Tg,其中耕地、林地向草地的转化共带来草地 NPP 增加量为 14.74,16.50 Tg。由未利用地恢复为草地共导致草地 NPP 增加 104.28 Tg,占总增加量的72.60%,未利用地转化为草地,提高了草地生态系统的碳物质储量,这一土地利用类型的转化成为草地 NPP 增加的重要原因[52-53]。然而草地、耕地、林地都覆盖有较高的绿色植被,都具有较强的固碳能力[54],因此它们之间的相互转化时仅伴随有较少的碳交换。

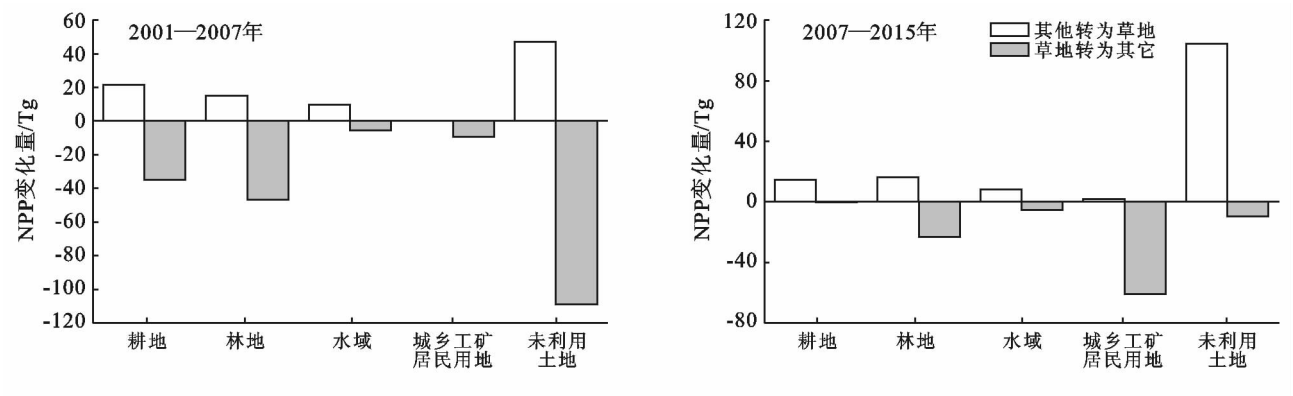


图 3　研究区 2001－2007 年和 2007－2015 年 LUCC 对应草地 NPP 变化

3　结 论

(1) 2001—2015 年草地 NPP 时空差异较大,空间分布上草地 NPP 呈现出自西向东逐渐增大的趋势,数值波动在 1.63～495.32 g/(m^2 · a)之间;草地 NPP 平均值逐年增加,增加量达到 38.65 g/m^2;总量年增长为 128.96 Tg/a。

(2) 2001—2015 年土地利用/覆被变化明显。未发生变化草地面积为 51 167.50 km^2;耕地持续减少,其中转为草地的面积为 193 km^2;1 190.37 km^2 的未利用地转为草地;草地转出为未利用地面积最多,为 1 211.50 km^2,占原有草地总面积的 2.29%。

(3) LUCC 对草地 NPP 影响较大,未利用地的重新利用以及耕地和林地向草地的转化使草地 NPP 增加,草地碳汇总量增加。草地向未利用地的转化是草地碳损失最大的方式,总量为 118.28 Tg,占总损失量的 38.91%。草地向水域和城乡工矿居民用地的转化,导致大量的碳损失,总损失量达到 139.94 Tg,这使得草地生态系统碳汇能力减弱。

[参 考 文 献]

[1] 费罗成.林地开发耕地过程中碳损失、碳减缓及碳补偿研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2013.

[2] 张林海.闽江河口湿地优势植物净初级生产力及 N,P 养分动态[D].福建 福州:福建师范大学,2008.

[3] 何亚龙,李刚,李红,等.退耕生态系统碳储量时空动态变化的研究进展[J].土壤通报,2011,42(5):1268-1275.

[4] 王琪.黑龙江省植被净第一性生产力的估算及空间特征分析[D].吉林 长春:东北林业大学,2009.

[5] 刚成诚,王钊齐,杨悦,等.近百年全球草地生态系统净初级生产力时空动态对气候变化的响应[J].草业学报,2016,25(11):1-14.

[6] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world [J]. Indian Forest, 1975,14(1):237-263.

[7] 周伟,牟凤云,刚成诚,等.1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J].生态学报,2017,37(13):4335-4345.

[8] 穆少杰,李建龙,周伟,等.2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J].生态学报,2013,33(12):3752-3764.

[9] 杨红飞,刚成诚,穆少杰,等.近 10 年新疆草地生态系统净初级生产力及其时空格局变化研究[J].草业学报,2014,23(3):39-50.

[10] 王军邦,刘纪远,邵全琴,等.基于遥感—过程耦合模型的 1988—2004 年青海三江源区净初级生产力模拟[J].植物生态学报,2009,33(2):254-269.

[11] 徐浩杰,杨太保.黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应[J].资源科学,2013,35(10):2024-2031.

[12] 郭晓寅,何勇,沈永平,等.基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J].冰川冻土,2006,28(4):512-518.

[13] 周才平,欧阳华,王勤学,等.青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J].地理学报,2004,59(1):74-79.

[14] 张镱锂,祁威,周才平,等.青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J].地理学报,2013,24(9):1197-1211.

[15] 卢玲,李新,Veroustraete F.中国西部地区植被净初级生产力的时空格局[J].生态学报,2005,25(5):1026-1032.

[16] 谷晓平,黄玫,季劲钧,等.近20年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响[J].自然资源学报,2007,22(2):251-259.

[17] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,35(17):5898-5907.

[18] 常顺利,杨洪晓,葛剑平.净生态系统生产力研究进展与问题[J].北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):517-521.

[19] 黄敬峰,蒋亨显,王人潮.干旱区土地利用遥感监测研究[J].干旱区研究,1999(2):54-60.

[20] 张希彪.陇东黄土高原土地利用、覆盖变化及驱动力分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):143-147.

[21] 邹亚荣,张增祥,周全斌,等.中国农牧交错区土地利用变化空间格局与驱动力分析[J].自然资源学报,2003,18(2):222-227.

[22] 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 [J]. Tellus, 2010,55(2):378-390.

[23] Andriamananjara A, Hewson J, Razakamanarivo H, et al. Land cover impacts on aboveground and soil carbon stocks in Malagasy rainforest [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016,233:1-15.

[24] Yang Yusheng, Sheng Jinsheng, Chen Guangshui, et al. The impact of land use/cover change on storage and quality of soil organic carbon in midsubtropical mountainous area of southern China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009,19(1):49-57.

[25] 郭灵辉,郝成元,吴绍洪,等.内蒙古草地NPP变化特征及其对气候变化敏感性的CENTURY模拟研究[J].地理研究,2016,35(2):271-284.

[26] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].生态学报,2015,15(17):5898-5907.

[27] 张兴榆,黄贤金,赵小风,等.环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响[J].自然资源学报,2009,24(8):1343-1353.

[28] Yu Tao, Feng Li, Rusong Wang, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: A study from Changzhou, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,103:651-657.

[29] Defries R, Hansen M, Townshend J. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data [J]. Remote Sens Environ, 1995,54(3):209-222.

[30] Lee D K, Park C, Tomlin D. Effects of land-use-change scenarios on terrestrial carbon stocks in South Korea [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2015,11(1):47-59.

[31] Baccini A, Goetz S J, Walker W S, et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps [J]. Nat Clim Change, 2012,2(3):182-185.

[32] 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[J].植物生态学报,2007,31(2):189-204.

[33] 朴世龙,方精云,郭庆华.利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力[J].植物生态学报,2001,25(5):603-608.

[34] 戴民汉,翟惟东,鲁中明,等.中国区域碳循环研究进展与展望[J].地球科学进展,2004,19(1):120-130.

[35] 钟华平,樊江文,于贵瑞,等.草地生态系统碳循环研究进展[J].草地学报,2005,13(S1):67-73.

[36] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Footprint of temperature changes in the temperate and boreal forest carbon balance [J]. Geophysical Research Letters, 2009,36(7):251-254.

[37] 江勇,付梅臣,王增,等.土地利用变化对生态系统碳汇—碳源的影响研究:以河北武安市为例[J].安徽农业科学,2010,38(24):13067-13069.

[38] 冯异星.遥感与GIS支持下的土地利用动态变化研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古师范大学,2008.

[39] 郑亦伶,苑韶峰.基于土地利用的碳排放时空分析:以浙江省为例[J].上海国土资源,2013,34(2):33-36.

[40] Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000 [J]. Science China Earth Sciences, 2007,50(9):1341-1350.

[41] 赵有益,龙瑞军,林慧龙,等.草地生态系统安全及其评价研究[J].草业学报,2008,17(2):143-150.

[42] 王娟,何慧娟,卓静,等.基于MODIS数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析[J].水土保持通报,2017,37(3):264-269.

[43] 朱文泉,潘耀忠,阳小琼,等.气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J].科学通报,2007,52(21):2535-2541.

[44] 夏明鹏,董杰,官凤英,等.基于CASA模型的福建省毛竹林NPP估算[J].西部林业科学,2016(5):113-118.

[45] 李天宏,王祉宁.基于GIS,RS和CASA模型的深圳市逐月NPP估算及其变化特征研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(S1):126-135.

[46] 王军邦.中国陆地净生态系统生产力遥感模型研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2004.

[47] 朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D].北京:北京师范大学,2005.

(下转第59页)

水量,与对照组相比,L_{20},L_{40},L_{60},L_{80}处理组的土壤棵间蒸发量分别降低了 13.09%,39.04%,44.57%和 50.60%;当遮光度为 20%时,在产量不变情况下水分利用效率却提高了 10.11%,说明适宜的遮光可提高水分利用效率。

[参 考 文 献]

[1] 康东辉.水肥温度诸因子对塔额盆地冬小麦生长发育的影响[J].现代农村科技,2016(6):11-11.

[2] 陈传永,王荣焕,赵久然,等.不同生育时期遮光对玉米籽粒灌浆特性及产量的影响[J].作物学报,2014(9):1650-1657.

[3] 刘希伟,张敏,姚凤娟,等.花后不同强度遮光对糯小麦和非糯小麦干物质积累和产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(4):521-527.

[4] 汪丽娜,杨志玲,杨旭,等.不同遮光处理对平茬后厚朴萌蘖株部分形态及生理指标的影响[J].植物资源与环境学报,2017,26(2):22-30.

[5] 陈传永,王荣焕,赵久然,等.不同生育时期遮光对玉米籽粒灌浆特性及产量的影响[J].作物学报,2014,12(9):1650-1657.

[6] 朱肖锋,周守标,郑和权,等.遮光对马蹄金生物量分配和形态特征的影响[J].生态学杂志,2009,28(7):1419-1422.

[7] 刘希伟,张敏,姚凤娟,等.花后不同强度遮光对糯小麦和非糯小麦干物质积累和产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(4):521-527.

[8] 张元燕,季永华,贾恒,等.遮光处理对不同生育期小麦生物量分配和叶片叶绿素含量的影响[J].植物资源与环境学报,2009,18(4):39-45.

[9] Li He, Dong Jin, Bernd W, et al. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2010,33(4):267-275.

[10] 张玉春,张敏,刘希伟,等.花后持续弱光对冬小麦光合特性及产量的影响[J].麦类作物学报,2017,37(8):1038-1046.

[11] Mitchell R A C, Gibbard C L, Mitchell V J, et al. Effects of shading in different developmental phases on biomass and grain yield of winter wheat at ambient and elevated CO_2[J]. Plant Cell & Environment, 1996,19(5):615-621.

[12] 牟会荣,姜东,戴廷波,等.遮光对小麦籽粒淀粉品质和花前贮存非结构碳水化合物转运的影响[J].应用生态学报,2009,20(4):805-810.

[13] 杨林林,高阳,韩敏琦,等.基于 SIMDual_Kc 模型的豫北地区麦田土壤水分动态和棵间蒸发模拟[J].水土保持学报,2016,30(4):147-153.

[14] 苗晋.全国《灌溉试验规范》在积极编制中[J].中国农村水利水电,1987,10(6):8-23.

[15] 周泽民.对《农业气象观测规范(上卷)》中若干技术问题的商榷[J].暴雨灾害,1998,17(2):37-39.

[16] Bell G E, Danneberger T K. Temporal shade on creepingbentgrass turf[J]. Crop Science, 1999,39(4):1142-1146.

[17] 于强,王天铎,刘建栋,等.玉米株型与冠层光合作用的数学模拟研究[J].作物学报,1998,24(1):7-15.

[18] 王家保,王令霞,陈业渊,等.不同光照度对番荔枝幼苗叶片生长发育和光合性能的影响[J].热带作物学报,2003,24(1):48-51.

[19] 房稳静,张雪芬,郑有飞.冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响[J].中国农业气象,2006,27(2):98-101.

[20] Mcmaster G S, Morgan J A, Willis W O. Effects of shading on winter wheat yield, spike characteristics, and carbohydrate allocation[J]. Crop Science(United States), 1987,27(5):967-973.

[21] Yang Wei Peng, Guo Tao Chen, et al. Light intensity on flag leaf photosynthetic characteristics and water use of two spike-type cultivars of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008,23(2):9-11.

(上接第 52 页)

[48] 马文红,杨元合,贺金生,等.内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J].中国科学:生命科学,2008,38(1):84-92.

[49] 张颖,章超斌,王钊齐,等.气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究[J].草业学报,2017,26(5):1-14.

[50] 郭灵辉,郝成元,吴绍洪,等.内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究[J].地理研究,2016,35(2):271-284.

[51] 李青丰,李福生,乌兰.气候变化与内蒙古草地退化初探[J].干旱地区农业研究,2002,20(4):98-102.

[52] Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of alpine grassland on the Tibetan Plateau since 1982 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):269-287.

[53] 张颖,章超斌,王钊齐,等,气候变化与人为活动对三江源草地生产力影响的定量研究[J].草业学报,2017,26(5):1-14.

[54] 江勇,付梅臣,王增,等.土地利用变化对生态系统碳汇—碳源的影响研究:以河北武安市为例[J].安徽农业科学,2010,38(24):13067-13069.