

土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价

吴建国¹, 张小全², 徐德应²

(1. 国家环保总局气候变化影响研究中心, 北京 100012;
2. 中国林业科学研究院森林环境与保护研究所, 北京 100091)

[摘要] 在分析了六盘山林区典型生态系统碳循环规律的基础上, 结合碳汇/源的概念, 综合评价了土地利用变化对生态系统碳汇功能的影响。分析得出陆地生态系统碳汇/源功能体现在碳库的贮量、稳定性和碳库的输入与输出强度方面; 天然次生林和人工林生态系统的碳贮量汇功能较强, 农田和草地较弱; 土壤有机碳过程源/汇方面, 天然次生林生态系统是强汇, 人工林生态系统是弱汇, 草地和农田生态系统是源。提出增加生态系统碳汇功能的措施包括增加生态系统碳输入、减少输出和增强碳库的稳定性。

[关键词] 土地利用变化; 土壤有机碳; 碳循环; 生态系统的碳汇/源

[中图分类号] Q148 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)09-0065-07

全球气候变暖及其影响是当前人类所面临的最为严重的环境问题之一。准确确定陆地生态系统碳汇/源机制是其中一个关键^[1]。在陆地生态系统中, 碳汇功能体现在碳库的贮量和积累速率, 碳源体现在碳的排放强度; 基本碳库包括植被活体、残体和土壤部分, 基本积累过程包括光合作用和土壤碳的吸收 (sequestration), 基本排放过程包括植被和土壤的呼吸作用。据估计, 全球土壤按 1 m 土层计, 有机碳的贮量约 $1\ 550 \times 10^9$ t, 占陆地生态系统碳贮量 ($2\ 100 \times 10^9$ t 碳) 的 3/4, 是植被碳库的近 3 倍、大气碳库 (750×10^9 t 碳) 的 2 倍^[2]; 土壤有机碳库由不同周转率的组分组成, 其周转期从几周到近万年^[3]; 土壤平均每年排放到大气中的 CO_2 以碳计为 $(68 \sim 100) \times 10^9$ t^[4], 约为化石燃料碳排放量的 11 倍^[5], 大气 CO_2 贮量的 10%^[6]。全球植被碳贮量约为 550×10^9 t, 这些碳主要由热带森林、温带森林、北方森林、热带灌丛、温带草原、荒漠和半荒漠、湿地与农田生物区 (biome) 的植被碳组成; 植被碳库通过光合作用吸收积累, 通过呼吸作用排放到大气, 通过植物死亡

及分解作用变成土壤碳; 植被每年通过光合作用吸收的碳 (GPP) 约在 120×10^9 t, 每年呼吸作用排放出碳约在 60×10^9 t, 每年净光合作用吸收碳约为 60×10^9 t。另外, 一部分植被碳又通过植物体的死亡和残体的分解而变成土壤碳。陆地生态系统通过这些过程, 调节着大气中 CO_2 的浓度。在过去几十年里, 对陆地生态系统的碳循环已有大量的研究, 总体上掌握了其源/汇变化的一些规律。据估计, 在 20 世纪 80 年代, 陆地生态系统碳汇平均每年约 1.9×10^9 t 碳, 90 年代陆地生态系统和大气间碳交换通量每年约 $1.4 \pm 0.7 \times 10^9$ t 碳^[7]。到目前为止, 陆地生态系统碳汇方面还存在许多不确定性, 尤其对陆地生态系统碳汇时空分布和变化机制还很不清楚^[8]。究其原因, 主要是对人为和自然因素影响陆地生态系统碳汇/源的机制还很不清楚, 其中一个重要方面就是对土地利用变化影响陆地生态系统碳汇的机制十分不清楚^[7]。

陆地生态系统碳库与土地利用及土地利用变化的联系, 主要体现在植被和土壤碳在土地利用变化中, 既可能成为碳汇, 也可能成为碳源。在土地利用变化过程中, 使植被和土壤碳库贮量积累的过程

[收稿日期] 2002-12-04; **修回日期** 2003-05-19

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (40271109/D0124)

[作者简介] 吴建国 (1971-), 男, 甘肃张掖市人, 生态学博士, 国家环保总局气候变化影响研究中心助理研究员

是碳汇,而使植被和土壤碳贮量减少的过程是碳源。在土地利用变化过程中,使植被和土壤碳库贮量增加或减少的过程较多,如土地上覆盖的植被本身生长特性等自然过程,人为收获生物量及对残体的遗留等。这些过程有些直接使植被和土壤碳贮量增加或减少,有些间接使植被和土壤碳贮量增加或减少。准确认识和评价陆地生态系统的碳源/汇功能,需要准确认识土地利用变化过程对植被和土壤碳贮量的影响是增加还是减少,是直接还是间接影响。

我国是土地利用变化巨大的国家,尤其是地处西北的陕、甘、宁暖温带林区,几千年的人类活动已经使土地利用方式发生了很大变化,近20年来在这些地区开展了大规模的退耕还林和还草工程,目前又是全国退耕还林和天然林保护的重点地区,这些活动无疑对这里的生态系统碳汇/源功能将产生很大的影响,但对这些影响还并不清楚。笔者在综合分析宁夏六盘山林区几类典型土地利用变化对植被和土壤碳库的输入、输出及贮量与组分影响的基础上^[9,10],结合碳“汇”、“源”的概念,对生态系统尺度土地利用变化影响碳汇/源方面进行综合评价,希望为深入研究土地利用变化影响陆地生态系统碳汇的机制能提供一些科学依据。

1 陆地生态系统碳源和汇的概念

在字面上,源(source)指来源,即事物间传递或接受物质或信息的属性及具有这种属性的事物或过程。源的概念至少在两个系统间应用才有意义。例如,大气是地球系统的外围部分,它接受从地球中其他系统流出的物质,则地球系统中向大气流动物质的过程及产生这些流动物质的系统均称为源。汇(sink)与源是相对的概念,它指接受物质或信息流动的系统或接受流动的过程。在源与汇的概念中,过程源/汇与事物源/汇的含义不同,事物源/汇概念指接受流动物质的系统和产生流动物质的系统,而过程源/汇指物质或信息流入与流出的过程。在一个系统中,物质或信息流动是动态过程,把这些产生流的系统称为源,接受流的系统称为汇。在土壤系统和大气系统之间,如果土壤中物质流入到大气中,则把土壤称为大气中这种物质的源,反之,则把土壤称为汇。土壤与大气间的物质流动又与一定的过程相对应,把这些过程称为过程汇或源。有许多过程同时产生过程汇或源,对一个

系统来说,总的源/汇功能强度又决定于不同过程源与汇功能强度的差异趋势。

对温室气体的源/汇功能,国际上有一些不同的定义。IPCC^[11]将温室气体的汇定义为任何能把温室气体、气溶胶、或温室气体前期物从大气中清除的过程、活动和机制等。也定义了与源/汇概念密切相关的一个概念——库(pool),库如果在一定时间段内流入碳的数量比流出的多,且相关系统是从大气中净吸收碳,则是汇。相对汇的概念,库如果流入量比流出量少,且相关系统为向大气中排放碳,则是源。在碳循环分析中,库指能积累或排放碳的所有系统,如森林生物量、木质产品、有机碳、化石燃料沉积或大气等。UNFCCC^[12]把温室气体源定义为向大气中排放温室气体的过程或活动;把汇定义为从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前期物的过程、活动和机制。各个国家对温室气体汇的认识也不一致。一些国家把汇与人为汇的概念等同而论。对人为汇概念的认识也不一致,一些国家认为人为汇的概念特指与熟练管理活动有关的所有活动,如造林、再造林和毁林,另外则指直接的活动,如造林、林地施肥和放牧。IPCC^[11]把与碳的汇/源密切相关的土地利用变化和森林分为:森林与其他木本生物量的变化、森林和草地的转化、经营土地的废弃、土壤有机碳贮量的变化。京都议定书中认为温室气体的源排放和汇清除主要指造林、再造林和森林管理,温室气体汇主要包括植被、海洋和大气中对温室气体起分解转化的机制。

在全球碳平衡中,碳的基本源过程包括化石燃料燃烧、毁林和土地利用变化。化石燃料燃烧平均每年排放 5.4×10^9 t碳,热带雨林破坏和其他土地利用方式平均每年排放出约 1.6×10^9 t碳,两个已知碳汇包括大气每年以0.5%速率吸收的 3.2×10^9 t碳和海洋每年吸收的 2.0×10^9 t碳,余下 1.8×10^9 t碳估计被陆地生态系统吸收,但在陆地生态系统中被吸收的机制和空间位置不确定^[2]。

2 不同土地利用方式的碳源/汇

在土地利用过程中,如果把土壤视为大气碳的汇/源,则使土壤碳的贮量增加的过程、活动和因素等都是汇,反之则是源。土地利用及土地利用变化过程包括自然和人为过程,自然过程包括植被活体和残体碳库的形成与输入过程;人为过程包括土

地经营的一切活动。在土地利用过程中，人为活动通过改变自然过程而影响生态系统碳库的贮量。在不同土地利用方式下，碳汇/源功能体现在生态系统碳的输入、输出和贮量的变化方面。

2.1 土地利用与生态系统碳的贮量汇

2.1.1 在陆地生态系统中基本碳库是植被活体、残体和土壤 植被碳库汇功能体现在碳贮量和生产力碳积累方面。植被碳贮量由植物活体和残体碳贮量构成，生产力碳积累由植物活体和残体的碳年产量构成，土壤碳积累由植被活体和残体碳库积累量构成。土地利用变化引起植被组成的改变，进而引起生态系统碳贮量及各个部分分配的改变，使碳汇强度发生不同程度的变化。表1显示：

1) 农田和草地生态系统碳积蓄量低于天然次生林和人工林生态系统，表明天然次生林生态系统通过土地利用变化变成农田或草地生态系统后，生态系统的碳贮量汇功能下降。反之，草地或农田生

态系统通过造林变成人工林生态系统后，生态系统碳贮量汇功能增加。

2) 不同土地利用方式下，植被碳贮量汇强度不同。天然次生林生态系统通过土地利用变化变成农田或草地生态系统后，植被碳贮量汇功能下降。草地或农田生态系统通过造林变成人工林生态系统后，生态系统植被碳贮量的汇功能增加。

3) 不同土地利用方式中，生态系统植物残体碳库贮量不同。天然次生林生态系统通过土地利用变化变成农田或草地生态系统后，植被残体碳贮量汇功能下降，而草地或农田生态系统通过造林变成人工林生态系统后，生态系统中植被残体碳贮量汇功能增加。总之，天然次生林生态系统变成农田或草地生态系统后，生态系统碳贮量、植被活体和残体碳贮量汇功能都将下降，而农田或草地生态系统通过造林变成人工林生态系统后，生态系统的这些汇功能又将增加。

表 1 不同土地利用方式植被活体、残体、土壤有机碳及其组分与碳库的贮量

Table 1 The storage of biomass and debris carbon, SOC and its fraction and pool under different land use t/hm²

土地利用方式	天然次生林			农田	草地	人工林		
	灌木林	山杨林	辽东栎林			13 年落叶松林	18 年落叶松林	25 年落叶松林
活体碳贮量	21.44	33.02	28.95	1.32	2.71	18.45	42.81	53.03
细残体碳贮量	7.89	7.41	8.79	0.73	1.99	5.54	6.70	7.71
粗残体碳贮量	1.03	1.09	2.24	0.10	0.41	0.92	0.14	0.30
残体碳合计	8.92	8.51	11.03	0.83	2.40	6.46	6.84	8.01
土壤有机碳贮量	156.68	158.50	199.91	96.75	134.99	106.62	179.69	143.93
活性有机碳组分	15.39	16.13	21.08	8.44	12.87	10.97	17.13	14.82
轻组有机碳组分	39.08	46.90	75.74	30.58	46.82	44.04	60.98	50.69
颗粒有机碳组分	28.88	32.04	48.29	25.78	29.84	32.30	62.18	44.55
非保护性有机碳组分	35.56	35.43	57.43	28.42	37.68	33.76	57.06	43.94
保护性有机碳组分	107.31	110.33	183.09	60.12	83.79	57.48	100.98	81.49
非稳定性有机碳库	99.10	83.87	130.07	60.67	67.12	60.08	84.68	86.10
稳定性有机碳库	55.35	70.72	64.96	35.86	65.60	45.34	70.03	59.13
系统碳库贮量总计	187.03	200.02	239.89	98.89	140.10	131.53	229.34	204.97

2.1.2 土壤有机碳贮量是生态系统碳汇功能的重要组成部分 表1显示：

1) 农田和草地生态系统土壤有机碳贮量比天然次生林和人工林生态系统低，表明农田和草地生态系统土壤有机碳贮量汇功能比天然林和人工林生态系统弱。

2) 在生态系统中，土壤有机碳库稳定性也是土壤碳贮量源/汇功能的体现。土壤有机碳稳定性

增强是土壤碳贮量汇功能增加的过程，而稳定性减弱是土壤碳贮量汇功能减弱的过程。农田和草地生态系统土壤非稳定性碳库贮量汇比天然次生林生态系统弱，与人工林的差异不大。农田生态系统稳定性碳库汇比天然次生林和人工林生态系统低，草地生态系统土壤稳定性碳贮量汇与天然次生林和人工林生态系统碳贮量汇功能接近。

3) 在生态系统中，土壤有机碳库组分也与土

壤碳贮量汇功能相关。土壤保护性组分是土壤碳贮量汇功能增加的体现,非保护性组分是汇减弱的体现。天然次生林土壤保护性碳汇功能比农田、草地和人工林生态系统都强。在土壤非保护性碳库方面,同样天然次生林生态系统土壤非保护性碳贮量的汇功能较强,表明天然次生林中存在大量的弱性碳汇。

4) 在土壤活性碳库的贮量方面,天然次生林生态系统活性碳库的贮量汇较强。

以上结果表明,天然次生林生态系统通过土地利用变化变成农田或草地生态系统后,土壤碳贮量汇功能强度降低,稳定性和非稳定性汇减弱,保护和非保护性、活性碳汇的强度也都将减弱。而农田或草地生态系统通过造林变成人工林生态系统后,土壤碳贮量这些汇功能强度都将增加。

2.2 土地利用变化与生态系统过程碳汇

在陆地生态系统中,土壤和植被碳库的贮量在不断发生变化,所以生态系统碳汇功能也体现在生态系统不同碳库的变化方面。在生态系统中,土壤有机碳库输入输出过程是土壤有机碳库过程汇/源功能的体现,与土壤有机碳库过程源/汇联系的过程是植被年积累碳和形成残体碳的过程,这些过程表现为植被和土壤碳库的净变化。植物残体碳库的贮量净变化由残体形成量和分解量决定,土壤有机碳库积累量又由残体分解量决定,减少过程由土壤呼吸量决定,净变化由残体输入和呼吸排放量决定。另外,土壤有机碳贮量的年际变化还决定于土

壤侵蚀及淋溶导致的土壤有机碳的迁移。不同土地利用方式下,这些过程源/汇功能强度不同。表2显示,天然次生林、农田和草地和人工林生态系统的活体年碳贮量与残体碳年产量均有所增加;天然次生林生态系统活体碳贮量的净增量方面,灌木林、辽东栎林与草地生态系统均为负值,表明这种土地利用方式植被碳库的增加已经趋于平衡或死亡量比生产量高;植物残体碳库贮量的年形成量方面,天然次生林生态系统植物残体碳库的年形成量大,汇功能较强。

在土壤碳库贮量变化中,土壤呼吸是最大的源,而土壤侵蚀是碳的迁移过程,为非源非汇过程,而其他过程都是汇的过程。在这些过程汇中,关键环节是植被活体碳的年产量和土壤碳贮量的净变化。因为,植被活体生产过程直接把大气中的CO₂吸收,土壤有机碳库贮量的净变化反映土壤中碳增加和排放的强弱。其他过程是中间环节,只是改变了土壤有机碳库的贮量,并没有直接和大气碳联系。表2显示,土壤有机碳库的年净变化方面,天然次生林生态系统为0.12~0.35 t/hm²·a,农田和草地分别为-0.44和-0.69 t/hm²·a,人工林在0.02~0.11 t/hm²·a,表明天然次生林生态系统是强汇,人工林生态系统为弱汇,而农田和草地生态系统表现为源。考虑土壤侵蚀对碳贮量的迁移方面,农田和草地生态系统土壤有机碳的贮量的减少量更大。表2也显示,不同生态系统土壤碳汇功能强度都因土壤侵蚀碳的迁移而减弱。

表2 不同土地利用方式下植被活体、残体碳库及土壤有机碳库年变化

Table 2 Annual change of storage of biomass and debris carbon, SOC under different land use

土地利用方式	t/hm ² ·a							
	杂灌林	山杨林	辽东栎林	农田	草地	13年落叶松林	18年落叶松林	25年落叶松林
①活体碳库年生产量	7.54	8.27	4.64	2.21	2.12	7.07	7.88	8.39
②残体碳库年生产量	7.64	.54	5.98	1.63	2.40	3.95	4.73	5.35
活体碳库净变化=①-②	-0.10	0.73	-1.34	0.58	-0.28	3.12	3.15	3.04
③残体碳库年分解量	1.60	1.77	1.70	0.71	0.84	1.38	1.35	1.68
残体碳库净变化=②-③	6.05	5.77	4.28	0.92	1.56	2.57	3.38	3.66
④残体碳库年分解	1.60	1.77	1.70	0.71	0.84	1.38	1.35	1.68
⑤土壤有机碳年输入	1.32	1.28	1.40	0.50	0.55	1.09	1.02	1.29
⑥残体年释放CO ₂	0.28	0.49	0.30	0.21	0.29	0.29	0.33	0.39
⑦呼吸(活根、残体、土壤)	3.96	4.06	4.51	1.91	5.08	4.31	4.11	5.55
⑧矿质和残体土壤呼吸	1.39	1.42	1.58	1.15	1.52	1.29	1.23	1.67
⑨土壤碳库净变化=④-⑧	0.21	0.35	0.12	-0.44	-0.69	0.09	0.11	0.02
⑩土壤侵蚀碳流失	0.16~0.33	0.15~0.30	0.17~0.33	>0.18	0.16~0.49	0.11~0.40	0.12~0.51	0.15~0.51
土壤碳库净变化=⑨-⑩	-0.12~0.05	0.05~0.20	-0.11~-0.05	>-0.62	-1.18~-0.75	-0.31~-0.02	-0.40~-0.01	-0.49~-0.13

以上结果表明，在植被生产力碳积累方面，天然次生林和人工林生态系统都具有较强的汇，而农田和草地生态系统则相对较少。在土壤有机碳贮量变化方面，天然次生林生态系统是强汇，而农田和草地生态系统为源，人工林生态系统为弱汇。

3 土地利用变化的生态系统碳源/汇

土地利用变化过程 and 变化后对生态系统碳汇的影响是不同的过程。土地利用变化过程中，生态系统的碳汇受土地利用变化的影响是短期过程，主要汇过程是人为活动。土地利用变化后对陆地生态系统碳汇的影响是长期过程，主要汇过程是生态系统自然的过程和人为经营的活动过程。土地利用变化过程主要是土地利用变化活动对植被和土壤部分的影响。图 1 显示，天然次生林生态系统变成农田或草地生态系统的过程主要是砍伐、收获与燃烧等人为活动，都是短期活动，主要结果是改变了生态系统中植被、遗留部分残体和原有土壤有机碳部分。

这个过程使生态系统中植被生物量和残体碳库的贮量减少，是生态系统碳汇功能减弱过程，也使生态系统碳释放强度增加，所以又是源过程。农田或草地生态系统造林变化主要是通过造林活动使农田或草地生态系统变成人工林生态系统，主要结果也是植被活体和残体碳贮量改变及土壤有机碳遗留。这个过程中植被生物量和残体碳增加，是汇过程。土地利用变化后，土壤有机碳贮量的变化受新土地利用方式的影响。在新土地利用下，一方面是植被本身的天然生长特性及土壤有机碳的自然循环过程，另一方面是不同土地利用方式的经营管理活动（见表 3），这些活动使生态系统碳的贮量和过程碳的汇功能强度发生改变。在这些自然和人为过程的长期作用下，生态系统的碳库贮量将达到稳定状态，碳汇/源的功能强度也将达到稳定状态。但是，这些稳定是相对的，在受到如火灾、病虫害或其他自然灾害影响后又将被改变，碳汇功能也将被改变。

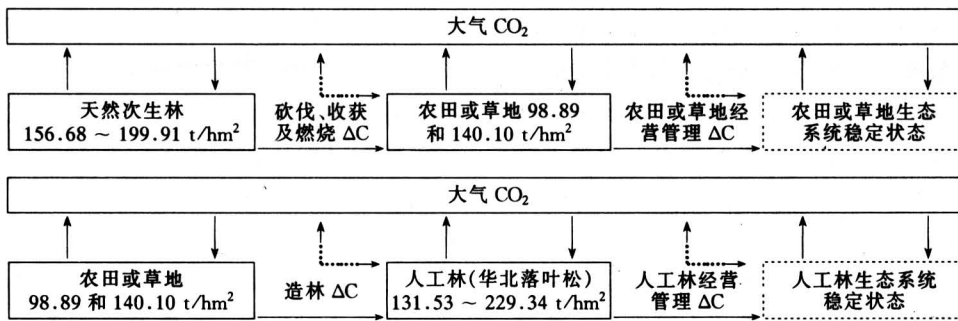


图 1 土地利用变化过程对生态系统碳汇/源功能影响

Fig. 1 The impact of change in land use on the ecosystem carbon sink/source

表 3 不同土地利用方式下人为活动

Table 3 The management of different land uses

土地利用方式	不同土地利用方式下人为活动					
杂灌林	采伐	放牧	砍柴	盗伐	火、病虫害防治	保护
山杨林	采伐	放牧	砍柴	盗伐	病虫害防治	保护
辽东栎	采伐	放牧	砍柴	盗伐	病虫害防治	保护
农田	种植	收获	耕作	施肥	灌溉	病虫害防治
草地	放牧	割草	耕作			病虫害防治 保护
13 年落叶松林	采伐	放牧	砍柴	盗伐	病虫害防治	抚育间伐 保护
18 年落叶松林	采伐	放牧	砍柴	盗伐	病虫害防治	抚育间伐 保护
25 年落叶松林	采伐	放牧	砍柴	盗伐	病虫害防治	抚育间伐 保护

4 增加生态系统碳汇的措施

综上所述,土地利用变化过程对生态系统碳汇/源的影响包括自然过程和人为过程两个方面。自然过程受制于自然植被本身光合作用和呼吸作用等增加生物量与生产力的生理过程及环境条件,这些过程是由植被本身的自然过程决定的。人为过程通过改变植被碳和土壤有机碳动态过程而实现,包括生物量收获、残体的处理和土壤扰动及植被组成改变或改变环境条件等方面。增加生态系统的碳汇功能主要应从增加输入量、减少输出量和增加稳定性去实现。在一定区域尺度,还应该合理选择土地利用方式。Kern 和 Johnson 提出三种增加生态系统土壤碳汇的管理原则^[13],即维持现有土壤有机质的水平、恢复退化土壤中有机质、扩大土壤有机质库的承载力。增加生态系统碳汇的输入量可以通过提高植被生产力和减少收获部分去实现。通过提高生物量碳和减少收获部分可以增加土壤有机碳输入部分,提高植被碳库,这些过程将进一步增加土壤有机碳和生态系统的碳贮量。减少生态系统碳的输出包括减少土壤呼吸、控制水土流失和减少碳的淋溶流失。土壤呼吸受土壤温度影响较大,增加土壤的植被覆盖度能减弱温度的影响。增加土壤有机碳稳定性包括增加土壤有机碳的腐殖质化、土壤稳定性碳及保护性组分碳贮量。土壤有机碳稳定性与土壤团聚体密切相关,农田耕作破坏土壤结构,使有机碳稳定性降低,所以通过减少耕作可以增加有机碳稳定性。在人类土地利用的实际过程中,往往是多种土地利用方式并存,且土地利用过程担负着满足人类多种需要的功能。单纯为增加生态系统的碳贮量来选择土地利用方式或制定措施显然是不现实的。事实上,增加生态系统的贮量要求又往往与增加土壤肥力、提高土地生产能力和土壤的环境调节能力的要求相一致。因此,在制定增强生态系统碳的汇功能措施也与实现提高土壤其他功能的措施基本上一致。增加生态系统碳库贮量的具体措施包括4个方面。

4.1 合理区划和选择土地利用方式

扩大森林面积,尤其是天然林面积,控制水土流失,恢复退化土地,扩大造林或种植长久作物,保护低承载力草地,实行轮作种植,把低产农田变成草地或森林,集约管理农田,实行农林复合、林草复合经营方式。

在区域或地区尺度,不可能采取单一土地利用方式,而是多种土地利用方式并存,并且不同土地利用方式承担不同的人类需要。为了协调好增加生态系统碳汇功能和满足其他方面需要之间的关系,需要合理区划和规划不同土地利用方式的分布。在农田、草地与森林几种土地利用方式中,森林生态系统碳汇功能最强,尤其是天然林生态系统具有较强的保护性组分碳,碳汇稳定性强,所以扩大森林生态系统面积、尤其是天然林面积是区划中首先应当考虑的方面。而水土流失是导致土壤有机碳迁移的主要过程,退化土地土壤有机碳贮量较低,通过造林或种植多年生植物可以控制水土流失,恢复退化的土地,提高土壤有机碳贮量。草地的人为活动影响主要是放牧或割草,使草地生态系统碳贮量的输入减少而使生态系统碳贮量降低。而在单一种植农田土地利用方式下,减少生态系统的碳输入、破坏了土壤有机碳的稳定性、增加水土流失,导致生态系统碳汇功能降低。因此,保护低承载力的草地,实行轮作种植,把低产农田变成草地或森林,集约管理农田,实行农林复合、林草复合经营方式,能够提高草地有机碳输入、增加土壤有机碳的贮量,提高农田有机碳稳定性,通过土地利用方式的变化提高土壤有机碳贮量和稳定性都能够实现增加土壤有机碳和生态系统碳汇功能的目标。

4.2 合理管理森林生态系统

停止毁林,保护天然林生态系统,提高现存森林生态系统生产力,进行人工林的合理经营采伐,造林或采伐活动中归还所有残体,减少对土壤扰动,造林选择固氮树种,增施肥料,营造混交林,控制火灾。

人类在森林生态系统的利用过程中,毁林和严重破坏天然次生林生态系统是历史上导致生态系统碳成为大气中CO₂源的主要原因。在增加森林土地利用的碳汇措施选择中,保护森林生态系统是首要的选择。森林生态系统生产力直接影响土壤有机碳输入,也反映植被碳贮量的高低,提高森林生态系统生产力,可以增加土壤有机碳输入和生态系统的碳贮量。在森林生态系统的管理中,不合理的土地利用过程往往可能增加碳源而弱化汇功能,尤其是过分扰动土壤及收获生物量,因此减少对土壤扰动、增加对残体的遗留是减少生态系统碳的源而增加碳输入的重要措施。树种、肥料对土壤有机碳增加都有影响,固氮树种及增加肥料能够增加土壤有

机碳的贮量。而单一树种对增加土壤有机碳稳定性不利, 火灾将导致碳大量释放, 所以营造混交林、防止火灾发生是提高生态系统碳汇的必要举措。

4.3 合理管理草地生态系统

保护草地, 减少放牧和割草, 进行合理施肥、灌溉, 选择高产草种, 防治病虫害和火灾, 对退化草地禁牧, 促进其自然演替, 控制水土流失。

草地生态系统过度放牧或割草是导致生态系统生产力下降的主要原因, 通过实施保护措施, 减少放牧或割草, 能提高生产力、增加生态系统的碳贮量。另外, 通过合理的灌溉、施肥、防治病虫害和火灾, 也能提高草地生态系统的碳贮量。对退化草地进行禁牧而促进其自然进展演替和控制水土流失也是增加草地生态系统碳贮量的重要举措。

4.4 合理管理农田生态系统

合理耕作, 部分实行减耕或免耕的耕作方式, 尽可能减少收获量, 实行粮草农作, 秸秆还田, 种植绿肥, 提高地力, 增施有机肥, 提高肥料效率, 调整作物布局, 选择高产植物, 种植越冬作物, 提高作物养分利用和产量, 管理水分能够, 控制水土流失。

对于农田生态系统, 耕作是破坏土壤有机碳稳定性而加速土壤有机碳分解的重要原因, 因此合理耕作、部分实行减耕或免耕能增加土壤有机碳的稳定性而提高生态系统的碳贮量。农田收获而减少有机碳输入是导致农田生态系统碳贮量下降的一个重要原因, 通过实行粮草农作、秸秆还田、种植绿肥和提高地力等措施可以增加有机碳输入, 增加生态系统的碳贮量。另外, 增施有机肥, 提高肥料效率, 调整作物布局, 选择高产植物, 种植越冬作物, 提高作物养分和产量, 管理水分, 能够控制水土流失也能提高作物产量、增加有机碳输入量和生态系统的碳贮量。

参考文献

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B. IPCC. Land Use, Land Use Change, and Forestry: a special report of the IPCC [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 189~217
- [2] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effects [J]. Progress in Environmental Science, 1999, 1(4): 307~326
- [3] Perruchoud D, Joos F, Fischlin A, et al. Evaluating timescales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(2): 555~573
- [4] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycle, 1995, 9: 23~36
- [5] Marland G, Boden T A, Andres R J, et al. Global, regional and national CO₂ emissions [A]. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy. Trends: a Compendium of Data on Global Change [C]. Oak Ridge, Tennessee, 2000
- [6] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration [J]. Global Change Biology, 2002, 8: 800~812
- [7] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J. Climate change 2001: the scientific basis. intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 185~242
- [8] Canadell J G, Pataki D. New advance in carbon cycle research [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4): 156~158
- [9] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 19~29
- [10] 吴建国. 土地利用变化对土壤有机碳的影响 [D]. 博士论文, 北京: 中国林业科学研究院, 2002
- [11] Houghton J T, Meira L G, Filho, Callander B A, et al. IPCC 1996. Climate change. The science of climate change. Contribution of working group I to the secondary assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- [12] UNFCCC (United Nations framework convention on climate change). Methodological issue land use, land use change and forestry. Synthesis report on national greenhouse gas information reported by annex I parties for the land use change and forestry sector and agricultural soils category [R]. Note by the secretariat. Subsidiary body for scientific and technological advice. Fccc/Sbsta/2000/3 Bonn, Germany. 48
- [13] Kern J S, Johnson M G. Consequences of tillage impacts on national soil and atmospheric C levels [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 200~210

practical value for researching on multi-agent systems.

[Key words] multi-agent system; ambiguity; processing method; Kripke structure

(cont. from p.71)

The Assessment of the Impacts of Land Use Change on the Ecosystem Carbon Sink

Wu Jianguo¹, Zhang Xiaoquan², Xu Deying²

(1. *Research Center of Impact of Climate Change of Chinese State Environmental Protection Administration, Beijing 100012, China*; 2. *Research Institute of Forest Environment and Ecology of Chinese Academy of Forestry Science, Beijing 100091, China*)

[Abstract]

Based on the analyzing of the carbon cycle under different ecosystem in Liupan mountain forest zone and the conception of carbon sink and source, the impacts of land use change on the carbon sink of ecosystem were assessed. It is found that the function of ecosystem carbon source or sink under different land uses includes carbon storage, input and output of ecosystem carbon pool, net change of carbon storage and stabilization of soil organic carbon (SOC). The ecosystem carbon storage under natural secondary forest or plantation ecosystem is higher than that under cropland or rangeland ecosystem. The storage of ecosystem carbon, SOC, active SOC pool, slow SOC, protected and unprotected fraction of SOC and labile fraction of SOC under secondary forest or plantation ecosystem are higher than those under cropland and rangeland ecosystem. Natural secondary forest ecosystem is strong carbon sink, while plantation ecosystem is weak carbon sink, and cropland or rangeland ecosystem is source. The measures of increasing ecosystem sink include increasing input of ecosystem carbon pool, decreasing output of ecosystem carbon pool and increasing stabilization of SOC in ecosystem.

[Key words] land use change; soil organic carbon; carbon cycle; ecosystem carbon sink/source