

黄河流域森林植被碳储量分布特征及动态变化

贾松伟

(河南科技大学 经济学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:根据四次全国森林资源清查数据,结合生物量估算模型及植被含碳系数,研究了黄河流域森林植被碳储量、碳密度的分布特征及动态变化。结果表明:(1) 1989—2008年期间黄河流域森林植被总碳储量由131.15 Tg C增加到265.63 Tg C,且占全国森林植被碳储量的比例从2.83%增加到4.18%;期间森林植被的平均碳密度为34.47~39.00 Mg/hm²。(2) 从林龄来看,2004—2008年期间黄河流域森林植被碳储量在各林龄组的分布差异不大,介于46.64~68.31 Tg C之间;天然林碳储量主要分布在中龄林、过熟林、成熟林、近熟林;人工林碳储量主要集中在幼龄林和中龄林。流域内森林植被、天然林及人工林平均碳密度均随着林龄增加而表现出上升趋势。(3) 从森林起源来看,黄河流域天然林碳储量是人工林的3.5~4.5倍,且随着时间推移,天然林和人工林的碳储量均表现出增加趋势。(4) 从不同河段来看,黄河流域森林植被碳储量主要集中于黄河上中游地区,占全流域的97%以上;2004—2008年期间黄河流域上、中、下游的森林植被碳储量比1999—2003年期间分别增加了7.61%,13.13%和136.98%。研究表明黄河流域森林植被碳储量占同期全国碳储量的比例呈增加趋势,且未来固碳潜力巨大,将在全国森林碳汇中发挥重要作用。

关键词:森林植被;森林资源清查;碳储量;碳密度;黄河流域

中图分类号:S718.52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0078-05

Carbon Storage of Forest Vegetation and Its Dynamic Changes in Yellow River Basin Based on Continuous Forest Resources Inventory

JIA Songwei

(School of Economics, He'nan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Based on the forest inventory data of China, the carbon storage and carbon density of forest vegetation in Yellow River Basin were assessed by means of the regression equation between vegetation biomass and volume, and with the carbon fraction of dry matter. The results showed that during the period 1989—2008, total carbon storage of forest vegetation increased from 131.15 Tg C to 265.63 Tg C in the Yellow River, the percentage increased from 2.83% to 4.18% of carbon storage of the national forest vegetation; and the average carbon density of forest vegetation was 34.47~39.00 Mg/hm² during the period; the distribution of the carbon storage in the Yellow River Basin was not significantly different among all forest age groups from 2004 to 2008, ranging from 46.64 to 68.31 Tg C; the carbon storage of natural forests mainly distributed in middle-aged and over-mature forest, mature forest, near-mature forest; and carbon storage of planted forest mainly concentrated in young and middle-aged forests; the average carbon densities of forest vegetation, natural forest and planted forest in the basin all showed the increasing trend with the increase of forest ages. The carbon storage of natural forest in the Yellow River Basin was 3.5 to 4.5 times higher than that of planted forests; the carbon storages of both natural forests and planted forest showed an increasing trend over time; the carbon storage of forest vegetation in the Yellow River Basin mainly concentrated in the upper and middle reaches of the Yellow River, accounting for more than 97% of the whole basin; the carbon storage of forest vegetation in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin from 2004 to 2008

increased by 7.61%, 13.13% and 136.98%, respectively, compared to those in the period 1999—2003. Furthermore, the results also showed that the forest in the Yellow River Basin would play an important role in enhancing national forest carbon sequestration due to higher carbon sequestration in the forest in comparison with national level, and the huge potential for carbon sequestration in the future.

Keywords: forest vegetation; forest resources inventory; carbon storage; carbon density; Yellow River Basin

森林是陆地生态系统最重要、最活跃的碳库,在维护全球碳平衡和缓解气候变化等方面发挥着日益重要的作用^[1]。随着经济社会持续快速发展以及人类不合理的开发利用,全球CO₂浓度不断升高,中国面临着巨大的碳减排压力。增加森林碳储量是应对气候变化和减缓大气CO₂浓度升高的一个重要举措^[2]。森林碳储量作为研究森林与大气间碳交换的基本参数^[3],准确估算森林生态系统碳储量及其固碳潜力有利于理解陆地碳循环动态、过程和机制,也是加强森林生态系统科学管理和制定固碳减排具体措施的前提^[4-5]。因此,森林碳储量及其空间分布格局和时间动态变化一直是国内外研究的热点问题。

目前中国已经明确把增加森林碳汇作为一个重要的增汇措施。为了掌握森林碳汇情况,近些年诸多学者从不同尺度(全球、国家、区域和样地)对森林生态系统的碳通量、碳储量的时空变化和分布格局展开了大量研究^[3-11],但流域尺度范围下的研究较少。黄河是我国第二大河,由于历史等多方面原因导致流域内生态环境日趋恶化,为使流域内生态环境尽快得到恢复,国家先后启动了三北防护林工程、天保工程、退耕还林等一系列工程。自工程实施以来,流域区累计减少森林蓄积消耗量1亿m³,森林资源得到了有效保护,森林面积明显增加^[12]。目前关于黄河流域森林碳储量的研究大多着眼于局部地区^[10-11],缺乏对整个流域森林碳储量的研究。为此,本文根据历次全国森林资源清查数据,对整个黄河流域内的森林植被碳储量及其动态变化进行系统分析,以期为流域内森林资源的可持续发展和激发其增汇潜力提供研究基础和数据支撑。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

本研究中“黄河流域”是指黄河干流及支流流经的广大区域,地处东经95°58′—119°05′、北纬32°02′—41°50′,涉及青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东9个省(区),全长5464 km,流域面积7524.43万hm²,占国土面积的7.84%。流域地势自西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原等4种地貌单元。流域干流河道可分为上、中、下游,其中从河源至内蒙古自治区托克托县河口镇为

黄河上游,流域面积为3859.66万hm²,占全流域面积的51.30%;从河口镇至河南郑州市的桃花峪为中游,流域面积为3437.51万hm²,占全流域面积的45.68%;从桃花峪至黄河入海口为下游,流域面积为227.06万hm²,仅占全流域面积的3.02%。

1.2 数据来源

本研究所用数据来源于全国第四次(1989—1993年)、第五次(1994—1998年)、第六次(1999—2003年)和第七次(2004—2008年)森林资源清查资料,资料中包括黄河流域森林资源的面积、蓄积量和不同龄组等数据。本研究中的森林数据主要指乔木林,不包括经济林、竹林和疏林地。

1.3 研究方法

1.3.1 森林生物量的估算 由于历次森林资源清查中,黄河流域的森林清查资料只给出了不同龄组的总面积和总蓄积量数据,缺乏分树种的统计资料。故本文采用方精云等^[13]根据平均生物量(y)与平均蓄积量(x)建立的估算模型,虽然模型存在一定的误差,但对于大范围区域来说,误差较小。具体模型如下:

$$y = 0.5751x + 38.706 \quad (n = 120, R^2 = 0.83) \quad (1)$$

式中: y 为平均生物量(t/hm²); x 为平均蓄积量(m³/hm²)。

1.3.2 碳储量及碳密度的计算 森林碳储量由生物量乘以碳转换系数得到。由于植物既有低碳组织,又有高碳组织,国际上常用的转化系数为0.45~0.50^[14]。我国很多学者也对森林群落组成树种含碳系数进行了研究测度。如马钦彦等的研究表明,我国乔木树种平均含碳系数大于0.45,其中阔叶树种平均含碳系数大多不足0.5,而针叶树种的平均含碳系数大多高于0.5^[15]。李海奎等^[9]的研究结果,不同树种的碳转换系数0.45~0.53。本研究因缺乏各个树种的统计数据,故碳转换系数统一采用0.5。另文中计算的森林植被碳储量未包括林下草本层,凋落物层及林木根系等碳储量。碳密度是指单位面积碳储量。

2 结果与分析

2.1 黄河流域森林植被碳储量变化

表1显示,4个时期黄河流域的森林面积在不断增加,由1989—1993年期间的379.99万hm²增加

到2004—2008年期间的681.11万 hm^2 ,年均增加面积20.07万 hm^2 ;但森林面积的增加幅度在不断缩小,1994—1998年期间比1989—1993年期间森林面积增加了121.05万 hm^2 ,而到了2004—2008年期

间,仅比1999—2003年期间增加了74.04万 hm^2 。整个流域森林覆盖率(仅指乔木林)20 a期间由4.78%增加到8.57%,仅增加了3.79%,远低于同期全国乔木林覆盖率(由11.84%增加到16.40%)。

表1 黄河流域森林植被碳储量及碳密度

时间段	森林面积/ 万 hm^2	森林 覆盖率/%	森林植被碳储量			平均碳密度/ ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	碳累积率/ ($\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$)
			黄河流域/ Tg	全国/ Tg	占比/%		
1989—1993	379.99	4.78	131.15	4630 ^[16]	2.83	34.51	—
1994—1998	501.04	6.30	172.72	4750 ^[16]	3.64	34.47	8.31
1999—2003	607.07	7.64	235.37	5740 ^[17]	4.10	38.77	12.53
2004—2008	681.11	8.57	265.63	6350 ^[17]	4.18	39.00	6.05

由表1可以看出,4个时期黄河流域森林植被碳储量由131.15 Tg增加到265.63 Tg,平均每年增加8.96 Tg,且增加幅度在不断缩小;整个流域森林植被碳储量占全国的比重不断增大,由2.83%增加到4.18%,这也得益于长期以来流域内一系列森林保护工程的实施。从平均碳密度来看,随着时间变化,黄河流域的森林植被碳密度有所增加,但增加幅度不大;4个时期的平均碳密度为34.47~39.00 Mg/hm^2 ,略高于全国森林植被的平均碳密度33.63 Mg/hm^2 ^[18]。从碳累积率来看,1994—1998年、1999—2003年、2004—2008年3个时期的森林植被碳累积率差别较大,1999—2003年期间的碳累积率最高,为12.53 $\text{Tg C}/\text{a}$;其次为1994—1998年期间,为8.31 $\text{Tg C}/\text{a}$;最小的为2004—2008年期间,为6.05 $\text{Tg C}/\text{a}$ 。

2.2 黄河流域不同龄组森林植被碳储量及碳密度

森林碳储量与森林年龄组成密切相关。以2004—2008年为例,本文分析了黄河流域不同龄组森林植被的碳储量及碳密度(图1)。从图1中可以看出,2004—2008年期间黄河流域森林主要集中在幼龄林和中龄林两个组别,占总面积的55.09%。流域内森林总面积、天然林面积以及人工林面积都随着林龄的增加而表现出下降趋势;其中人工林面积下降的趋势比较明显,由85.23万 hm^2 (幼龄林)减少到14.29万 hm^2 (过熟林)。

图1显示,森林植被碳储量除在中龄林组分布有些大外,在其他龄组的分布差异不大,介于46.64~51.71 Tg之间。天然林碳储量在各龄组的分布为:中龄林>过熟林>成熟林>近熟林>幼龄林,与天然林面积在各龄组的分布有些不同。人工林碳储量主要集中在幼龄林和中龄林两个组别,占全部人工林碳储量的67.04%。从平均碳密度来看,天然林各龄组的碳密度均高于人工林,整个森林的碳密度介于天然林和人工林之间;流域内森林植被、天然林及人工林的平均碳密度均随着林龄增加而表现出上升趋势,这

与其他学者研究结果保持一致^[19]。

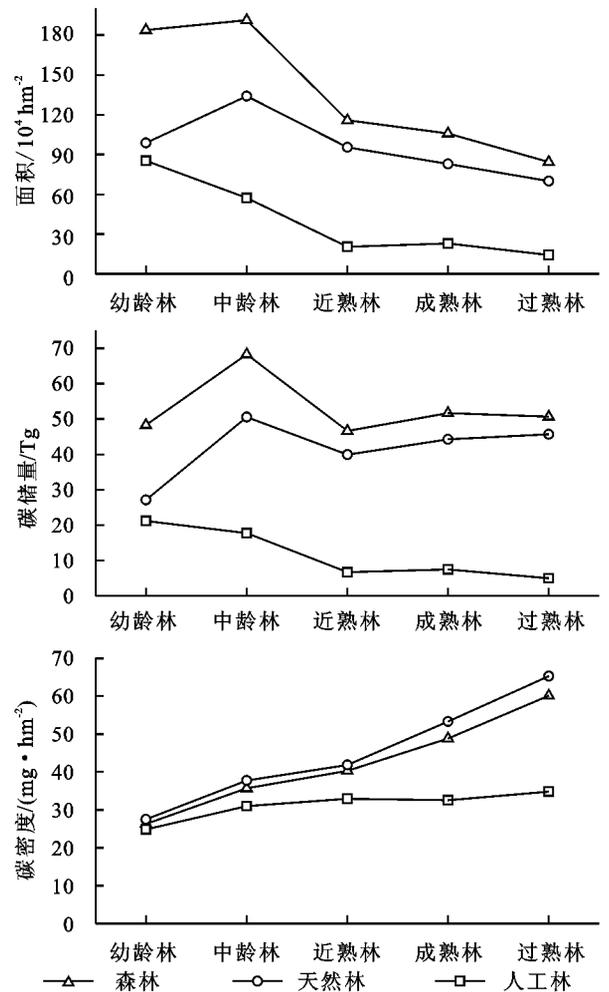


图1 2004—2008年黄河流域不同龄组森林植被碳储量及碳密度

2.3 黄河流域不同起源森林植被碳储量及动态变化

起源不同,林分碳储量也不同。表2列出了黄河流域4个时期天然林和人工林的碳储量及碳密度。从表中可以看出,4个时期黄河流域天然林的面积为人工林的2.4~2.9倍,而天然林碳储量却是人工林的3.5~4.5倍,这表明黄河流域天然林拥有巨大碳汇能力,这也得益于天然林保护工程的持续实施。随

着时间推移,整个流域天然林和人工林的碳储量均表现出增加趋势,2004—2008 年期间比 1989—1993 年

期间分别增加了 98.56%和 118.20%,人工林的增加幅度相对较大。

表 2 黄河流域不同起源森林植被碳储量及碳密度

时间段	天然林				人工林			
	面积/ 万 hm ²	碳储量/ Tg	碳密度/ (Mg · hm ⁻²)	碳累积率/ (Tg · a ⁻¹)	面积/ 万 hm ²	碳储量/ Tg	碳密度/ (Mg · hm ⁻²)	碳累积率/ (Tg · a ⁻¹)
1989—1993	279.24	104.55	37.44	—	100.75	26.60	26.41	—
1994—1998	364.94	136.34	37.36	6.36	136.10	36.38	26.73	1.95
1999—2003	452.04	192.13	42.50	11.16	155.03	43.24	27.89	1.37
2004—2008	481.11	207.59	43.15	3.09	200.0	58.04	29.02	2.96

从碳密度来看,4 个时期天然林的碳密度远高于人工林,且超过人工林碳密度的 40%~52%。从碳累积率来看,天然林的碳累积率均比人工林的高,且天然林的碳累积率呈现出先增高再降低的趋势,而人工林则表现出先降低后增高的趋势;天然林的碳累积率在 1999—2003 年期间达到最大,为 11.16 Tg/a,表明 1999—2003 年期间比 1994—1998 年期间天然林碳储量增加的最多;人工林的碳累积率在 2004—2008 年期间达到最大,为 2.96 Tg/a,表明人工林碳储量在 2004—2008 年期间比 1999—2003 年期间增加的最多。

2.4 黄河流域不同河段内森林植被碳储量变化

因统计资料缺乏,本文仅列出了 1999—2003 年、2004—2008 年两个时期黄河流域不同河段森林植被碳储量及碳密度(表 3)。从表 3 中得出,黄河流域森林资源主要分布于中上游地区,森林面积占全流域森林面积的比例超过 95%,这也与流域面积主要集中在中上游河段有关。从各个河段森林覆盖率来看,两个时期黄河中游森林覆盖率最高,下游次之,最小的为上游河段,仅为 3.75%和 4.05%;各个河段 2004—2008 年期间的森林覆盖率均比 1999—2003 年期间的高,但下游的森林覆盖率增长速度远超过中上游河段。

表 3 黄河流域不同河段森林植被碳储量及碳密度

河段	1999—2003 年				2004—2008 年				碳累积率/ (Tg · a ⁻¹)
	面积/ 万 hm ²	碳储量/ Tg	森林 覆盖率/%	碳密度/ (Mg · hm ⁻²)	面积/ 万 hm ²	碳储量/ Tg	森林 覆盖率/%	碳密度/ (Mg · hm ⁻²)	
上游	144.57	81.34	3.75	56.26	156.40	87.53	4.05	55.97	1.24
中游	452.37	150.92	13.16	33.36	502.52	170.73	14.62	33.97	3.96
下游	10.13	3.11	4.46	30.75	22.19	7.37	9.77	33.18	0.85
合计	607.07	235.37	—	—	681.11	265.63	—	—	6.05

将两个时期森林植被碳储量进行比较后发现,2004—2008 年期间黄河流域无论上游、中游,还是下游的森林植被碳储量都比 1999—2003 年期间的高,分别增加了 7.61%,13.13%和 136.98%。从平均碳密度来看,两个时期上游的平均碳密度最大,中游次

之,下游最小,这也与上游森林主要为成熟林和过熟林,中游河段各个林龄分布相对均匀,而下游森林主要为幼龄林和中龄林有关(图 2)。从森林植被碳累积率来看,中游最高,达到了 3.96 Tg/a,上游次之,为 1.24 Tg/a,下游最低,为 0.85 Tg/a。

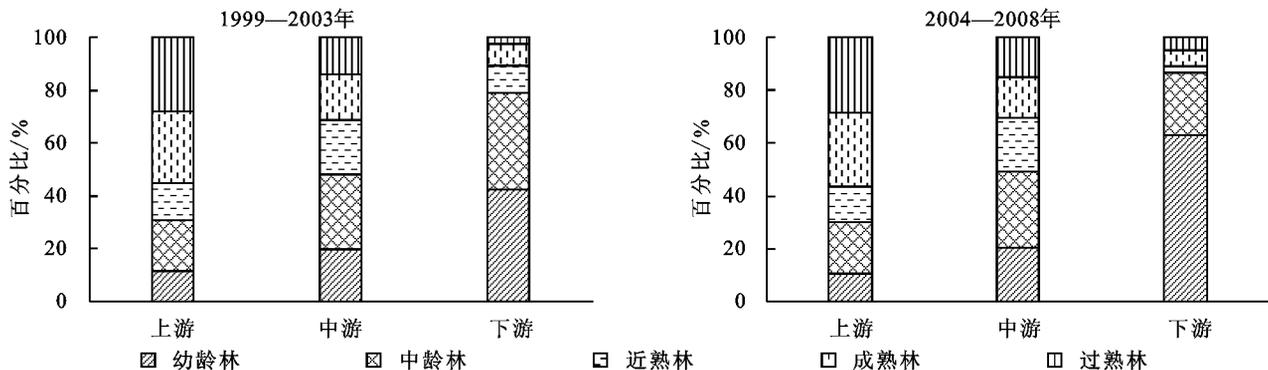


图 2 黄河流域各河段不同林龄植被碳储量百分比

3 讨论与结论

作为陆地生态系统中最大的碳库,森林在抑制全

球温室气体浓度上升中发挥着重要作用,林业碳汇也成为《京都议定书》、“巴厘岛路线图”及“哥本哈根世界气候大会”等历次国际气候谈判的重要内容。

为了有效指导森林植被固碳增汇的经营管理,我国历来重视不同尺度下林业碳汇的估算研究。黄河流域面积 7 524.43 万 hm^2 , 占国土面积的 7.84%, 由于长期受自然、社会、历史因素制约, 流域内植被破坏严重, 生态环境脆弱。自 20 世纪 80 年代以来, 为改善流域内生态环境, 国家实施了诸多森林保护工程, 黄河流域森林面积得以不断增加, 根据历次森林资源清查结果, 1989—2008 年期间黄河流域森林面积年均增加 20.07 万 hm^2 , 整个流域乔木林覆盖率 20 a 间由 4.78% 增加到 8.57%; 同期黄河流域森林植被碳储量也由 131.15 Tg 增加到 265.63 Tg。且本文仅估算了黄河流域森林植被碳储量, 未考虑森林土壤碳储量, 根据周玉荣^[20]、崔高阳^[21]等研究结果, 森林土壤碳储量大约为森林植被碳储量的 3 倍; 根据这一比例, 黄河流域森林生态系统的碳储量将会达到 1 062.52 Tg。黄河流域森林植被平均碳密度介于 34.47~39.00 Mg/hm^2 , 高于流经省份森林植被的平均碳密度, 如陕西省为 31.20 Mg/hm^2 ^[22], 宁夏地区为 27.24 Mg/hm^2 ^[23], 山东省为 21.09 Mg/hm^2 ^[24]。这同样也表明了黄河流域实施诸多森林保护工程的效果比较明显。

目前, 黄河流域森林植被碳储量主要集中在天然林, 天然林碳储量是人工林的 3.5~4.5 倍, 这得益于天然林保护工程的持续实施; 但人工林碳储量增加幅度大于天然林, 2004—2008 年期间人工林、天然林碳储量比 1989—1993 年期间分别增加了 118.20% 和 98.56%。整个流域天然林碳密度远高于人工林, 且超过人工林碳密度的 40%~52%。流域内 2004—2008 年期间人工林面积 200 万 hm^2 , 且中、幼龄林比重较大, 随着时间推移, 其人工林的固碳潜力将会相当可观。因此, 在森林培育与经营管理过程中, 科学、合理、有序地开展森林经营活动, 改善森林质量, 能进一步增加区域碳储量和提升森林生态系统功能。

从不同河段来看, 黄河上游地区森林覆盖率最低, 仅为 3.75% 和 4.05%, 但森林植被平均碳密度最高, 达到了 55.97~56.26 Mg/hm^2 , 这主要是由于黄河上游气候高寒干旱、自然条件差、适生植物少, 目前存在的林地主要为天然林的成熟林和过熟林。黄河中游地区的森林覆盖率最高, 且森林植被平均碳密度达到了 33.36~33.97 Mg/hm^2 , 这与黄河流域天然林主要集中在黄河中游(占全流域天然林的 76%)有关。黄河下游地区主要为人工林, 森林覆盖率从 1999—2003 年期间的 4.4% 增加到 2004—2008 年期间的 9.65%, 表明在这期间, 黄河下游地区进行了大范围的植树造林, 目前黄河下游的林地主要为幼龄林

和中龄林, 进而导致该地区的森林植被平均碳密度最小, 但未来该地区森林固碳潜力较大。

参考文献:

- [1] Ciaia P, Tans P P, Trolier M, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO_2 sink indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 [J]. *Science*, 1995, 269(5227):1098-1102.
- [2] Xu Z L, Zhao C Y, Feng Z D, et al. Estimating realized and potential carbon storage benefits from reforestation and afforestation under climate change: A case study of the Qinghai spruce forests in the Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, 18(8):1257-1268.
- [3] 李鑫, 欧阳勋志, 刘琪璟. 江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征 [J]. *自然资源学报*, 2011, 6(4):655-665.
- [4] McKinley D C, Ryan M G, Birdsey R A, et al. A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(6):1902-1924.
- [5] Fang J Y, Guo Z D, Hu H F, et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20:2019-2030.
- [6] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *Forest Ecology & Management*, 2005, 220(3):242-258.
- [7] 贾松伟. 河南省乔木林碳储量动态变化及其碳汇经济价值估算 [J]. *河南农业科学*, 2014, 43(5):149-153.
- [8] 李伟, 张翠萍, 李士美. 基于第 8 次森林资源清查数据的广西森林碳储量特征研究 [J]. *西南林业大学学报*, 2017, 37(3):127-133.
- [9] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [10] 董斌, 钱国英, 李旭东, 等. 基于 RS 和 GIS 的山东黄河流域森林资源动态分析 [J]. *东北林业大学学报*, 2011, 9(1):62-64, 71.
- [11] 胡建忠. 黄河上游退耕地人工林的碳储量研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(6):1-8.
- [12] 国家林业局. 森林资源专项分析: 第七次全国森林资源清查 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [13] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, 291:2320-2322) 的若干说明 [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2):243-249.
- [14] Lamblom S H, Savidge R A. A reassessment of carbon content in wood variation within and between 41 North American species [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4):381-388.
- [15] 马钦彦, 谢征鸣. 中国油松林碳储量基本估计 [J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(3):31-34.

试验监测期间处于小流域雨季,雨热同期,且土壤侵蚀和氮磷流失都与降雨量显著正相关。因此可以通过调整施肥时间和施肥方式、改变施肥种类和施肥量的方式,来达到在保证土壤内有效氮磷含量的同时减少氮磷流失量的目的。

4 结论

(1) 在退耕还林工程实施后,通过改变土地利用/覆被植物类型的方式,使得地表径流流失和土壤侵蚀都受到了一定的控制。各退耕还林模式的地表径流量和土壤侵蚀模数相对于农耕地的减少幅度顺序皆为板栗林>柑橘园>茶园。

(2) 各退耕还林模式总氮、总磷养分流失量(地表径流和侵蚀泥沙)顺序为耕地>茶园>柑橘园>板栗林。退耕后单次土壤养分总氮流失量在 194.85~350.11 g/hm²,较耕地减小的范围在 20.41%~71.63%;总磷流失量在 4.55~19.58 g/hm²,减少的范围在 21.11%~83.28%。可见小流域内水体主要面源污染物为氮素。

(3) 各退耕还林模式速效氮中,硝态氮流失顺序为耕地>茶园>板栗林>柑橘园,铵态氮流失顺序为耕地>茶园>柑橘园>板栗林,通过硝态氮、铵态氮和总氮的流失量比率可知,硝态氮是速效性氮素流失的主要类型。

(4) 流失养分中,总氮和总磷以土壤侵蚀泥沙携带为主要途径。随侵蚀泥沙流失的氮磷量是随地表径流流失的 1.00~3.59 倍;速效氮中硝态氮和铵态氮的主要流失途径为地表径流携带,由径流输出的硝态氮和氨态氮占总流失量的比率为 91.03%~99.24%。

参考文献:

- [1] 水利部长江水利委员会. 长江流域水土保持公报[N]. 中国水利报,2007-11-16(4).
- [2] 王珠娜. 三峡库区秭归县退耕还林工程生态效益计量评价研究[D]. 海口:华南热带农业大学,2007.
- [3] 王晓荣,万伏红,崔鸿侠,等. 三峡库区不同退耕还林模式水土保持效益定位监测[J]. 湖北林业科技,2014,43(4):1-4.
- [4] 霍洪江,汪涛,魏世强,等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版,2013,35(11):112-117.
- [5] 潘磊,唐万鹏,肖文发,等. 三峡库区不同退耕还林模式林地水文效应[J]. 水土保持通报,2012,32(5):103-106.
- [6] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学,2012,33(10):3390-3396.
- [7] 马东,杜志勇,吴娟,等. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征[J]. 水土保持学报,2011,25(6):31-33.
- [8] 姜焱,周祖钦,梅大英. 秭归县林业志:1949—2004[M]. 秭归县林业志编纂委员会,2007.
- [9] 黄志霖,田耀武,肖文发,等. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应[J]. 生态学报,2009,29(12):6681-6690.
- [10] 郭效丁,刘晓君,黄萍萍,等. 不同土地利用方式水土及养分流失响应机制研究:以鸚鵡沟小流域为例[J]. 水土保持研究,2014,21(5):18-23.
- [11] 魏兴萍,谢世友,张志伟,等. 重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失[J]. 农业工程学报,2011,27(6):42-46.
- [12] 兰木羚,高瑗,高明,等. 三峡库区王家沟小流域不同坡度土壤氮素流失特征研究[J]. 中国水土保持,2014(3):39-42.
- [13] 刘俏,张丽萍,聂国辉,等. 浙江红壤区经济林地氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(7):1388-1393.
- [14] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报,2001,15(3):123-128.
- [15] 高超,朱继业,朱建国,等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
- [16] 肖文发. 长江三峡库区退耕还林工程生态效益监测与评价[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [16] Fang J Y, Chen A P, Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001,292(5525):2320-2323.
- [17] 张颖,周雪,覃庆锋,等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):124-131.
- [18] 李海奎,雷渊才,曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学,2011,47(7):7-12.
- [19] 马琪,刘康,张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J]. 资源科学,2012,34(9):1781-1789.
- [20] 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.
- [21] 崔高阳,陈云明,曹扬,等. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析[J]. 植物生态学报,2015,39(4):333-342.
- [22] 曹扬,陈云明,晋蓓,等. 陕西省森林植被碳储量、碳密度及其空间分布格局[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(9):69-73.
- [23] 高阳,金晶炜,程积民,等. 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状[J]. 应用生态学报,2014,25(3):639-646.
- [24] 杨传强,李士美. 2012 年山东省乔木林碳储量研究[J]. 资源科学,2015,37(8):1661-1667.

(上接第 82 页)