

河南省土地利用碳源/汇及其变化分析

刘 英¹, 赵荣钦², 焦士兴³

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 郑州 450015; 2. 华北水利水电学院 资源与环境学院, 郑州 450011; 3. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455002)

摘 要: 土地利用变化及其碳源/汇状况是影响区域碳循环的重要因素。该文构建了土地利用碳源/汇研究的理论框架和计算模型; 采用 1999–2008 年河南省的能源消费、土地利用等数据, 对河南省不同土地利用方式的碳源/汇状况及其强度进行了分析。结果表明: (1) 河南省土地利用碳排放呈明显增加趋势, 其中建设用地和农用地是主要的碳排放源; 2003 年以来河南省城市建设用地加速扩张, 造成建设用地碳排放量的大幅增加; (2) 河南省土地利用碳吸收呈缓慢增长趋势, 其中农作物是最主要的碳汇; (3) 建设用地碳排放强度最大, 为 $56.46 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 而耕地的碳汇能力最强, 为 $9.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。(4) 1999 年以来, 地均碳排放强度呈加速增长趋势, 而同时期单位 GDP 碳排放强度则呈下降趋势。

关键词: 碳源; 碳汇; 土地利用; 河南省

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0154-04

Research on Carbon Sources/ Sinks of Land Use of He' nan Province

LIU Ying¹, ZHAO Rong-qin², JIAO Shi-xing³

(1. College of Civil Construction Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. College of Resources and Environment, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 3. Department of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, He' nan 455000, China)

Abstract: Land use change and its impact on carbon sources and sinks are important factors that affect the carbon cycle process. This paper firstly established the theoretical framework and estimation model of carbon sources and sinks of land use, then analyzed the carbon sources/sinks of different land use types of He' nan province by using energy consumption and land use data of He' nan province from 1999 to 2008. The conclusions are as following: (1) Carbon emission from land use of He' nan province increased rapidly since 1999, in which construction land and cropland were the main carbon sources. Because urban areas expanded rapidly, the carbon emission from construction land increased rapidly. (2) Carbon sink by land use of He' nan province slowly increased since 1999, in which, cropland was the main carbon sinks. (3) The carbon emission intensity of construction land was the highest [$56.46 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$], while the carbon sink intensity of cropland was the highest [$9.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$] among others. (4) Per unit area carbon emission intensity increased rapidly since 1999, meanwhile, per GDP carbon emission intensity declined.

Key words: carbon sources; carbon sinks; land use; He' nan province

定量分析和评价陆地生态系统的碳源/汇状况是碳循环研究的重要科学问题^[1], 也是进行区域碳循环机理研究的前提。土地利用变化是影响碳循环的重要因素, 也是仅次于化石燃料的人为碳排放源^[2]。土地利用变化直接影响陆地生态系统的分布和结构, 并改变其碳储量和碳通量过程^[3]。因此, 定量分析土地

利用变化的碳排放效应, 研究不同土地利用方式的碳源/汇强度对于深入研究人为活动对区域碳循环的影响至关重要。由于土地利用具有较大的复杂性及区域差异性, 其对碳循环的影响程度、区域差异、碳源/汇^[4]等问题仍存在较大的空间差异^[5]和不确定性。国内学者针对土地利用变化对碳循环的影响开展了

收稿日期: 2010-06-18

资助项目: 华北水利水电学院青年科研基金项目(HSQJ2009014); 河南省 2010 年社科联、经团联调研课题(SKL-2010-2590)

作者简介: 刘英(1977-), 女, 河南新野人, 硕士, 讲师, 研究方向为土地利用与低碳城市。E-mail: hzly@zzia.edu.cn

通信作者: 赵荣钦(1978-), 男, 河南孟津人, 讲师, 在读博士生, 主要从事土地利用和碳循环研究。E-mail: zhaorq234@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较为深入的研究,如葛全胜等^[6]研究发现,过去 300 a 间,中国陆地生态系统植被和土壤变化造成的碳排放达 4.50~9.54 Pg C;方精云等^[7]研究表明:中国土地利用活动(特别人工造林)引起陆地生态系统碳吸收大约为 0.45 Pg C。也有一些学者对土地利用的碳排放效应进行了研究,如李颖^[8]和张秀梅^[9]等对江苏省土地利用排放效应及其变化进行了分析,国土资源部公益性行业项目^[10]对我国土地利用的碳排放状况也进行了定量分析。本文尝试构建土地利用碳源/汇研究的理论框架和理论模式,从土地利用的角度分析碳源/汇的影响因素,并以河南省为例,初步研究了区域不同土地利用方式碳源/汇强度的差异。

1 土地利用碳源/汇计算方法

1.1 理论框架

不同土地利用方式的碳过程明显不同,有些土地利用方式主要表现为碳源,如建设用地,而其他一些土地利用方式则表现为碳汇,如林地、草地。结合全国土地利用类型分类系统,并借鉴已有相关研究^[8-9],本文将土地利用方式分为碳源和碳汇两种,前者包括建设用地(居民点及工矿用地、交通用地、水利设施用地)上能源消费造成的碳排放和农业耕作活动造成的碳排放两类;后者主要包括各类生产性土地上的植被生育期碳吸收,如林地、草地、耕地、园地。需要说明的是:(1)建设用地和农用地既是碳源又是碳汇,因为既有人类活动碳排放,也有植被的碳吸收,而其他用地类型只表现为碳汇;(2)考虑到城市绿化用地具有一定的碳吸收功能,因此本文也将其列入土地利用碳汇之列;(3)未利用地也具有一定的碳汇效果,但数量甚微,且难以估算,因此忽略不计。具体理论框架见图 1。

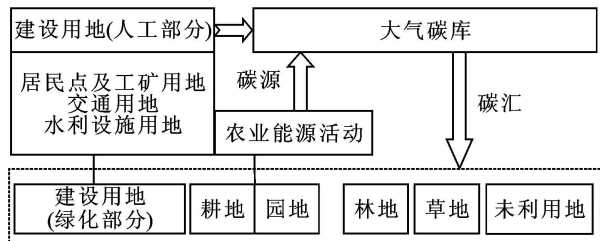


图 1 土地利用碳源/汇研究的理论框架

1.2 计算方法

结合土地利用碳源/汇分析的理论框架,参考已有研究成果、模型和参数,构建了土地利用碳源/汇计算模型,各项具体计算方法如下。

1.2.1 碳排放测算

(1) 建设用地碳排放。考虑到建设用地的碳排放主要来源于人为能源消费,因此这里以人为能源消费的碳排放作为建设用地的碳排放量,计算方法如下:

$$E_c = \sum E_i \times E_{ci} \quad (1)$$

式中: E_c ——建设用地碳排放; E_i ——第 i 种能源消费量(标准煤); E_{ci} ——第 i 种能源碳排放系数^[11]。

(2) 农用地碳排放。农用地碳排放主要来源于农业生产活动的投入,如农业化肥、农业机械使用和灌溉过程带来的碳排放,计算公式如下:

$$E_a = E_f + E_m + E_i \quad (2)$$

式中: E_a ——农用地碳排放; E_f, E_m, E_i ——农田化肥生产、农业机械使用和灌溉过程带来的碳排放。各项碳排放过程计算公式见赵荣钦等^[12],其中的碳排放转化系数来自于 West^[13]。

1.2.2 碳吸收测算

(1) 耕地碳吸收。耕地碳吸收主要是指农作物生育期光合作用过程中合成的碳,计算公式如下^[14]:

$$C_d = C_f D_w = C_f Y_w / H_i \quad (3)$$

式中: C_d ——耕地碳吸收; C_f ——作物合成有机质(干质量)所需要吸收的碳(即碳吸收率); Y_w ——经济产量; D_w ——生物产量; H_i ——第 i 种作物的经济系数^[12, 14]。

(2) 其他土地碳吸收。

$$C_i = S_i \times V_i \quad (4)$$

式中: C_i ——第 i 种土地类型碳吸收,其中, $i = 1, 2, 3$, 分别为建设用地绿化部分、林地和草地; S_i ——第 i 种土地类型面积; V_i ——第 i 种土地类型的碳吸收率,其中林地、草地碳吸收率借鉴谢鸿宇等^[15]的研究成果,考虑到建设用地绿化部分既有树木也有草地,因此其碳吸收率采用林草地的平均值。

1.2.3 土地利用碳源/汇强度 本文所指的碳源/汇强度是指各土地利用类型年度碳吸收和碳排放量与该土地类型面积的比值。

1.3 数据来源

采用 1999–2008 年河南省能源消费、农业投入、土地利用等统计数据,数据来源于《中国统计年鉴》、《中国国土资源年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国房地产统计年鉴》、《河南省统计年鉴》、《河南省调查年鉴》。

2 河南省土地利用碳源/汇结果分析

结合以上计算方法,运用河南省相关数据,对土地利用碳源/汇进行了计算,主要结果分析如下。

2.1 土地利用碳源/汇构成分析

建设地上的能源消费和农业耕作活动所排放的碳是构成碳排放的主要来源,且其对总碳排放的贡献率超过了 90%(见图 2),农业碳排放的贡献率不足 10%。这主要是因为建设用地中的居民点和工矿用地、交通用地及水利设施用地上的能源消耗量很大,

因而带来了巨大的碳排放; 相对而言, 农业耕作活动中所用的机械、化肥、灌溉所排放的碳则相对较少(表 1)。耕地、林地、草地上的植被生长发育期进行的光合作用过程是碳吸收的主要原因。其中耕地是碳吸收的主要构成因素, 其贡献率为 83%~87%。此外, 林地也是重要的碳吸收因素, 贡献率达到了 12%~16%。比较而言, 草地和城市绿地由于所占面积比率较小, 固碳能力有限(表 1)。

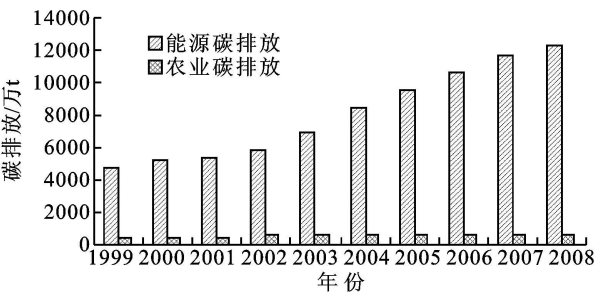


图 2 河南省 1999-2008 年土地利用碳排放构成

表 1 河南省 1999-2008 年土地利用碳源/汇状况 万 t

年份	碳源			碳汇				总碳吸收
	建设用地	农用地	总碳排放	耕地	林地	草地	城市绿地	
1999	4832.72	488.69	5321.42	5599.15	1077.74	1.39	2.26	6680.54
2000	5191.13	509.11	5700.24	5354.98	1078.68	1.39	2.41	6437.46
2001	5446.92	528.46	5975.38	5495.67	1079.32	1.39	2.55	6578.93
2002	5834.83	553.02	6387.85	5620.50	1104.75	1.38	2.71	6729.34
2003	6872.20	552.27	7424.48	4594.56	1145.42	1.37	2.88	5744.24
2004	8469.14	575.50	9044.64	5758.83	1150.29	1.37	3.07	6913.56
2005	9527.13	601.27	10128.40	5946.32	1029.73	1.33	3.28	6980.65
2006	10648.60	624.05	11272.65	6791.43	1029.73	1.33	3.49	7825.98
2007	11741.54	648.61	12390.15	7038.93	1029.73	1.33	3.71	8073.70
2008	12347.89	675.15	13023.03	7265.18	1029.73	1.33	3.72	8299.96

2.2 土地利用碳源/汇变化分析

1999 年河南省建设用地和农用地的碳排放总量为 5 321.42 万 t, 2008 年达到了 13 023.03 万 t, 10 a 间这两类用地的碳排放总量翻了一番还多。从变化趋势上来看, 1999-2008 年间的碳排放呈逐年增长并加速的趋势, 以 2003 年为界, 此前碳排放呈匀速缓慢增长, 此后则出现加速增长的趋势, 这主要是因为随着河南省城市化进程的加速, 城市建设用地面积加速扩张, 因此造成建设用地碳排放剧增(表 1)。

10 a 间, 耕地、林地、草地和城市绿地的碳吸收总量呈稳中有升的缓慢增长趋势, 其中耕地碳吸收量呈显著增加的趋势, 而林地、草地碳吸收量变化不大, 城市绿地碳吸收量也呈逐年增长。这主要是因为 10 a 间林地、草地面积变化不大, 耕地面积虽稳中有减, 但随着农业的生产发展、技术进步和投入增加, 农作物单位面积产量显著提高, 因此农作物生育期的固碳能力也不断提升。而且随着城市化步伐加快, 近几年来更加注重营造良好的城市环境, 因此城市公共绿地建设力度逐年增大, 绿地面积显著增加, 碳汇能力进一步提高。

1999-2003 年间, 碳排放总量逐年增长并逐渐加速, 而碳吸收总量稳中有升, 增长缓慢, 因此净碳排放量出现了显著增长的趋势。2003 年以前, 碳吸收总量大于碳排放总量, 因而净碳排放量为负值, 说明河南省土地利用活动的碳排放都可以由本省的生产性

土地所吸收; 2003 年以后, 由于碳排放总量显著增长且大大超过碳吸收总量, 因而净碳排放量出现了加速增长的趋势, 说明河南省的碳汇不足以补偿碳排放, 并由此造成了碳赤字。这也应归因于城市化进程加速带来的建设用地面积剧增及其所带来的大量碳排放(图 3)。

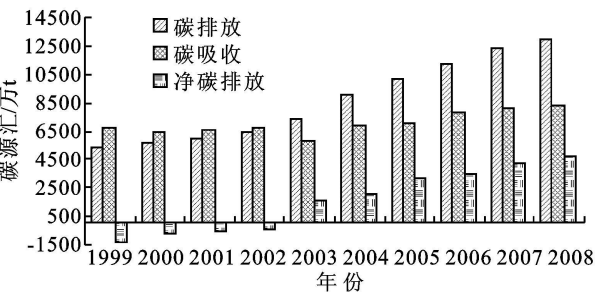


图 3 河南省历年土地利用源/汇变化趋势

2.3 土地利用碳源/汇强度分析

2008 年河南省碳排放总量为 13 023.03 万 t, 其中建设用地碳排放量多达 12 347.89 万 t, 对总碳排放的贡献率高达 95%, 其排放强度为 56.46 t/(hm²·a), 为耕地碳排放强度的 66 倍, 是碳排放的主要来源。而农业耕作活动产生的碳排放量仅占总碳排放量的 5%, 强度相对较低, 仅为 0.85 t/(hm²·a)。同年碳吸收总量为 8 299.96 万 t, 耕地、林地植被生长吸收碳是碳汇的主要原因, 其他如草地、建设用地中的城市公共绿地等也有明显的碳汇作用, 但受其面积所限, 固碳能力有限。在不同土地利用类型中, 建设用地碳排放强度最大, 而耕地的碳汇能力最强(表 2)。

表 2 2008 年河南省土地利用碳源/汇状况				
土地类型	碳源		碳汇	
	总量/	强度/	总量/	强度/
	万 t	(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	万 t	(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
耕地	675.15	0.85	7265.18	9.17
林地	—	—	1029.73	3.81
草地	—	—	1.33	0.95
建设用地	12347.89	56.46	3.72	2.38
合计	13023.03	12.88	8299.96	6.47

地均碳排放强度和地均建设用地碳排放强度 10 a 间均呈增长趋势,不同的是地均碳排放强度增长率低而缓,而地均建设用地碳排放自 2001 年之后呈加速增长的趋势,增长率高而增幅大。这主要是随着工业化、城市化的快速发展,建设用地面积扩大的速度远远低于碳排放的增加速度,因而地均建设用地碳排放强度呈逐年加速趋势(图 4)。

1999 年以来,地均碳排放强度呈加速增长趋势,2002 年之前增速较缓,2002—2007 年呈加速增长趋势,2007 年之后增速又趋缓。而同时期单位 GDP 碳排放强度缓慢下降,2004 年以后有加速下降趋势。这说明随着经济的发展和城市化进程加速,虽然碳排放总量和碳排放强度增长加速,但随着产业结构调整和国家对落后产能淘汰力度加大,人均 GDP 碳排放强度呈下降趋势(图 5)。

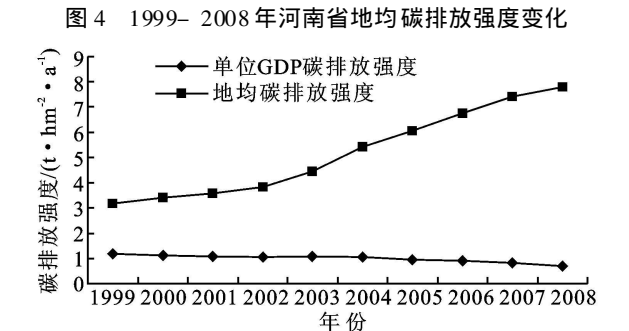
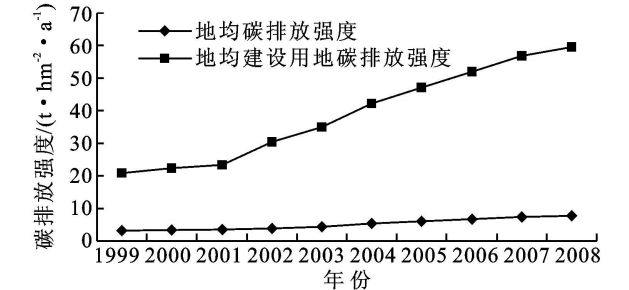


图 4 1999—2008 年河南省地均碳排放强度变化

3 结论和建议

3.1 结论

构建了土地利用碳源/汇研究的理论框架和计算模型;并对河南省不同土地利用方式的碳源/汇状况及其强度进行了分析。结果发现,2008 年河南省土

地利用碳排放和碳吸收总量分别为 13 023.03 万 t 和 8 299.96 万 t,碳排放明显大于碳吸收;建设用地碳排放和农用地碳吸收分别是主要的碳源和碳汇途径,其中建设用地碳排放强度最大,为 56.46 t/(hm²·a),而耕地的碳汇能力最强,为 9.17 t/(hm²·a)。

3.2 建议

结合以上结论,提出以下政策建议:(1) 河南省土地利用碳排放明显大于碳吸收,说明河南省的碳汇不足以补偿碳排放,并由此造成了碳赤字。因此,一方面应努力提高工业能源消费和农业耕作活动的效率,降低单位面积碳排放;另一方面要加强植树造林,提高区域碳汇水平、固碳效率和碳补偿率。(2) 建设用地是主要的碳排放源,主要归因于近年来城市化过程造成城市建设用地的加速扩展,因此,适当控制建设用地、提高能源使用效率、提高清洁能源比重是降低建设用地碳排放的关键。(3) 根据各种土地利用方式的碳源/汇强度,通过规划引导,采取合理的土地利用规模、方式和布局来对碳排放进行调节,在区域层面上探索低碳土地利用方式是发展低碳经济、降低碳排放的重要措施。

参考文献:

[1] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.

[2] Quay P D, Tilbrook B, Wong C S. Oceanic uptake of fossil fuel CO₂: carbon-13 evidence [J]. Science, 1992, 256: 74-79.

[3] 高志强,刘纪远,曹明奎,等. 土地利用和气候变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(10): 946-957.

[4] Schindler D W. The mysterious missing sink [J]. Nature, 1999, 398: 105-106.

[5] 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.

[6] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(2): 197-210.

[7] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292: 2320-2322.

[8] 李颖,黄贤金,甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 102-107.

[9] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J]. 资源科学, 2010, 32(4): 768-775.

(下转第 162 页)

萎缩; 20 世纪 50 年代以后干旱气候有所缓解, 湖泊水位出现一些波动, 但总体暖干的气候仍然造成湖泊萎缩干涸。气候和水系的这种变化趋势, 使得大尺度干旱与沙漠化发展相吻合^[15], 将加剧流域中下游地区沙漠化发展。因此干旱导致黑河及其支流断流而引起嘎顺诺尔、天鹅湖、索果诺尔等众多尾间湖泊相继干涸或大幅度萎缩, 是造成额济纳旗境内绿洲退化, 土地沙漠化的重要原因之一。

4.2 人类活动影响的湖泊水系变迁

天鹅湖-2 孔的湖泊沉积记录还打下了人类活动的烙印, 首先是人类对水资源的利用。进入 20 世纪特别是 20 世纪中期以来, 额济纳地区得到了大规模的开发, 对水资源的利用也发生了翻天覆地的变化。河流湖泊水系逐渐从自然水系、半自然水系演化为人工水系, 地表径流基本上为人类所控制, 天然河道水网已被纵横交错的人工渠系所取代。在人类活动的影响下, 水资源在空间上发生极大的位移, 持续从下游尾间湖向中游和下游上段迁移, 从天然水体向人工水体转化, 由于下游地表径流减少, 导致尾间湖泊萎缩和干涸^[11]。这也是 20 世纪 50 年代期间, 气候虽然由暖干向暖湿转化, 降水有所增多, 天鹅湖仍然处于充水-干涸交替状态的原因。除此以外黑河的终端湖西居延海在 1961 年干涸, 东居延海从 70 年代开始一直处于充水-干涸交替状态^[2]。

人类活动的影响另一方面还表现在历史时期的人类活动, 特别是土地利用方式和强度的变化对环境演变产生重要影响, 并直接被湖泊沉积所记录。在 1850-1860AD, 湖泊沉积物磁化率及频率磁化率急剧上升, 出现了一个极其显著的峰值, 这与当时气候回暖之后, 大规模地进行屯垦和畜牧业开发有关, 农业生产活动引起土地利用方式的改变, 加速了土壤侵蚀, 加之风力搬运, 进入湖泊沉积的细颗粒物在大规模屯垦阶段迅速增加, 引起磁化率和频率磁化率的急剧上升^[8]。进入 20 世纪以来, 连年战乱, 使得额济纳地区人口下降, 农业生产特别是以土地开垦为标志

的耕作业逐渐荒废, 地表细颗粒土壤被风蚀殆尽, 入湖细颗粒物减少, 磁化率与频率磁化率都比较低。同时受到人类活动的影响, 额济纳地区的环境也发生了很大的变化, 具体表现为绿洲范围缩小, 植被退化, 沙堆及灌丛沙堆出现, 土地沙漠化日趋严重^[15]。

参考文献:

- [1] 内蒙古额济纳旗志编委会. 额济纳旗志[M]. 北京: 方志出版社, 1998: 115-565.
- [2] 肖生春, 肖洪浪. 近百年来人类活动对黑河流域水环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 57-62.
- [3] 肖生春, 肖洪浪. 额济纳地区历史时期的农牧业变迁与人地关系演进[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 448-450.
- [4] 龚家栋, 程国栋, 张小由, 等. 黑河下游额济纳地区的环境演变[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 491-496.
- [5] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2ka 来温度和降水变化: 古里雅冰芯记录[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 348-353.
- [6] 靳鹤龄, 肖洪浪, 孙良英, 等. 最近 1500 年黑河下游东居延海变迁与环境气候变化[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(增刊): 58-65.
- [7] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 45-51.
- [8] 刑野. 内蒙古自然灾害通志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2001: 1-103.
- [9] 王文辉. 内蒙古气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 253-269.
- [10] 王根绪, 程国栋. 近 50 a 来黑河流域水文及生态环境变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 234-238.
- [11] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 126-136.
- [12] 王根绪, 程国栋. 黑河流域土地荒漠化及其变化趋势[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 369-374.
- [13] 党瑜. 历史上西北农业开发及对生态环境的影响[J]. 西北大学学报, 2001, 31(3): 271-276.
- [14] 肖生春, 肖洪浪. 黑河流域环境演变因素研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 1-6.
- [15] 李并成. 河西走廊汉唐沙漠化的调查研究[J]. 地理学报, 1998, 53(2): 106-115.

(上接第 157 页)

- [10] 国土资源部. 低碳排放: 土地利用调控新课题[EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/tdsc/lltt/200912/t20091228_131048.htm
- [11] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2009 中国可持续发展战略研究报告: 探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 1-6, 11.
- [13] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 91: 217-232.
- [14] 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[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [15] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.