

文章编号: 1008-2786-(2009)6-671-05

# 高寒草地沙漠化土地固碳潜力分析

## ——以黄河源区为例

曾永年<sup>1</sup>, 马正龙<sup>1</sup>, 冯兆东<sup>2</sup>

(1. 中南大学信息物理工程学院, 中南大学空间信息技术与可持续发展研究中心, 湖南长沙 410083

2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 沙漠化过程导致草地生态系统的退化和土壤有机碳的流失, 增加了陆地生态系统向大气 CO<sub>2</sub> 的排放, 使退化土地就成为陆地重要的碳源之一。然而, 通过有效的沙漠化防治, 沙漠化过程能够得到一定程度的控制, 退化土地也会得到恢复。沙漠化土地的恢复将是增加陆地碳汇, 减少大气 CO<sub>2</sub> 的有效途径之一。黄河源区沙漠化土地处于正在发展和强烈发展阶段, 沙漠化形势严峻。目前沙漠化土地面积达 3 519.97 km<sup>2</sup>, 其中轻度沙漠化土地面积占 45.82%、中度沙漠化占 26.20%、重度沙漠化土地与极重度沙漠化土地面积分别占 13.80% 和 14.18%。我们设想通过沙漠化治理, 使极重度、重度、中度沙漠化得到恢复并转变为轻度沙漠化土地, 这将使 1 907.27 km<sup>2</sup> 的沙漠化土地得到恢复。根据目前沙漠化土地土壤有机碳密度, 我们初步估计将会有 10.25 × 10<sup>6</sup> t 的土壤有机碳能够得到固定。在固定的土壤碳中, 极重度沙漠化土地、重度沙漠化土地和中度沙漠化土地贡献分别为 4%、30%、36%。因此, 目前黄河源区沙漠化土地具有较高的固碳潜力, 通过沙漠化的有效治理, 不仅能够改善区域生态环境, 促进区域社会经济的可持续发展, 而且将使黄河源区成为陆地碳汇的重要区域。

**关键词:** 高寒草地; 沙漠化治理; 土壤有机碳; 固碳潜力; 黄河源区

**中图分类号:** P931.4 X144 X21

**文献标识码:** A

沙漠化使区域生态环境恶化, 并使贮存在土壤中的有机碳释放到大气中, 增加温室气体, 从而对气候变化产生一定的影响<sup>[1-3]</sup>。然而通过有效的沙漠化防止措施, 不仅能减缓沙漠化土地扩展, 还可使沙漠化过程产生逆转, 使不同程度沙漠化土地得到恢复。从这个意义上讲, 现有沙漠化土地均具有潜在的固碳能力。Lal等(1998)估计<sup>[4]</sup>, 在理想状态下干旱土地通过恢复退化土壤和荒漠化的治理, 固碳存量潜力将为 0.9~1.9 Pg/a 平均为 1.48 Pg/a, 这相当于目前化石燃料燃烧排放量的 23%。Lal(2002)对荒漠化和土壤退化十分严重的西亚北非地区(WANA)的研究表明<sup>[5]</sup>, 这一地区土壤贫瘠,

但历史时期土壤碳库的排放量为 6~12 Pg 假设通过荒漠化治理、生态的恢复和重建使 60% 的碳排放量得到固存的话, 西亚北非地区未来土壤固碳潜力为 3~7 Pg。据 Duan等(2001)估算<sup>[6]</sup>, 我国荒漠化土地固碳潜力为 360.04 Mt。从全球到区域, 荒漠化土地固碳潜力的研究表明, 荒漠化土地碳截留的潜力巨大。荒漠化防治不仅能改善生态环境, 促进社会经济良性循环, 而且土壤碳的固定对减缓 CO<sub>2</sub> 排放和全球变化具有重要意义。为此精确估计沙漠化土地固碳潜力可为减排与增汇为目的陆地生态系统管理, 以及履行气候变化国际公约提供科学依据。

当前人类活动对陆地生态系统碳循环的影响,

收稿日期(Received date): 2008-06-30; 改回日期(Accepted): 2009-03-01。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(NO. 40071066, NO. 40771198); 教育部重大项目(NO. 10425); 教育部骨干教师资助项目。

[The item was supported by National Science Foundation of China No. 40071066, NO. 40771198 Key Project of Chinese Education Ministry NO. 10425; Key Teacher Program of Chinese Education Ministry.]

作者简介(Biography): 曾永年(1959-), 男(汉), 青海省西宁市人, 博士, 教授, 主要从事遥感与地理信息系统的应用研究, 环境变化研究。

[Zeng Yongnian was born in 1959 and came from Xining Qinghai Province. Now he is a professor. His research interests center around the application of remote sensing and GIS in environment and environmental changes.] E-mail: ynzeng@mail.csu.edu.cn

一方面通过化石燃料的燃烧增加碳排放,另一方面土地利用的变化使陆地生态系统类型发生大规模的转型和退化,引起陆地生态系统碳库的剧烈变化,使大量的有机碳以  $\text{CO}_2$  的形式排放到大气中,加剧全球气候的变化,进而威胁人类的生存。因此“京都协议”将一个国家或地区的  $\text{CO}_2$  的排放与其经济发展联系起来,强调准确评估温室气体的排放和寻找减少  $\text{CO}_2$  排放或增汇的陆地生态系统管理对策的重要性及必要性。据统计<sup>[18]</sup>,我国草地退化面积已达到  $1.35 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,约占草地面积的  $1/3$ ,并以每年  $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的速度增加,荒漠化面积已达  $2.62 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,每年以  $24.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$  速度扩展;原始森林则以每年  $50 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的速度减少。同时,我国目前又处于经济高速增长期,大规模的土地开发,高速的城市化进程导致土地利用的变化以及大规模的产业转型。这一切将对陆地生态系统碳循环产生重大的影响,进而影响全球气候的变化。目前我国的温室气体排放已占全球的  $14\%$ ,成为全球第三排放大国<sup>[18]</sup>。因此,如何加强以  $\text{CO}_2$  减排增汇为目的陆地生态系统管理,以保证我国社会经济高速发展,同时又促进我国生存环境的改善及履行气候变化公约是我国政府当前迫切需要解决的问题。

黄河源区以草地退化为主的一系列生态环境问题已严重影响到本区经济持续发展和社会稳定,并对区域气候产生一定的影响<sup>[7,8]</sup>。最新的研究表明,青藏高原三江源区域土地退化比较严重,带来明显的资源衰减和环境恶化的负效应,未来  $10 \sim 30 \text{ a}$  的变化趋势分析得出,三江源地区环境将继续恶化<sup>[9]</sup>。因此,深入全面地研究黄河源区陆地生态系统的碳循环就显得十分必要,而土壤碳库高寒草地生态系统碳库的主体,研究该区域土地沙漠化及其碳效应具有重要的意义。

## 1 研究区概况

黄河源区位于青藏高原东南部,介于  $95^\circ 52' \sim 99^\circ 29' \text{ E}$ ,  $33^\circ 42' \sim 35^\circ 20' \text{ N}$ ,流域面积约  $3.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。属高寒半干旱气候区,受地形地势的影响,气候呈自西北向东南的变化趋势。年平均气温  $-4^\circ \text{C}$  以下,年平均降水量  $235 \text{ mm}$ 。受水热条件的控制,植被分布也呈明显的水平分异,从西北到东南,依次分布有高山干草原、高寒草甸等草地类型。全区域的经济活动以草地畜牧业为主。黄河源区是青藏高

原的主要草原区,也是气候变化的敏感区。由于区域自身生态环境的深远影响和作用,该区具有“生态源”的重要地位。受高寒气候的影响,该区域自然条件恶劣,生态环境极其脆弱,在各种自然扰动和人为活动的影响下,区域范围内出现了包括草地退化、草地生态系统功能减弱、湖泊湿地严重萎缩、水源涵养能力下降、土地沙漠化的不断加剧等一系列生态环境问题。区域整体生态环境呈现退化趋势,生态环境正经历着有史以来最巨大的变化。

## 2 黄河源区沙漠化土地现状

在参考已有的划分标准与方法的基础上<sup>[10-14]</sup>,结合野外调查和室内分析,以地理景观特征为主,结合植被、土壤等环境要素的变化,将研究区沙漠化土地划分为:轻度沙漠化土地、中度沙漠化土地、重度沙漠化土地和极重度沙漠化土地四类。各类沙漠化土地主要以土地退化程度相区别。在此基础上,利用 2000 年夏季获取的 TM 遥感数据,采用沙漠化遥感监测指数方法<sup>[15]</sup>,监测获得的 2000 年黄河源区沙漠化土地分布及面积数据。

黄河源区沙漠化土地面积为  $3519.97 \text{ km}^2$ ,但沙漠化土地分布比较集中,沙漠化土地集中分布在黄河源区的玛多县境内(图 1),玛多县沙漠化土地占土地总面积的  $14.3\%$ ,这一比例略高于整个青藏高原沙漠化土地的比例<sup>[13]</sup>。因此,从整体上来讲,黄河源区沙漠化土地分布集中,在局部区域沙漠化土地面积比例、沙漠化程度都较高(表 1)。黄河源区沙漠化过程呈现为正在发展——强烈发展的态势,是黄河上游除共和盆地之外的又一个沙漠化重灾区<sup>[14,17]</sup>。

土地沙漠化已成为影响黄河源区生态平衡和区域社会经济持续发展的巨大环境压力与障碍因素,而且黄河源区的沙漠化也通过影响地气系统物质循环、能量交换,对区域气候产生重要而深远的负面影响,甚至会对整个青藏高原生态环境及气候变化产生一定程度的影响。

## 3 沙漠化土地固碳潜力估算

### 3.1 估算方法

以 2001 年和 2002 年两次野外考察实测的土壤剖面数据及室内土壤理化分析数据,并参考青海土

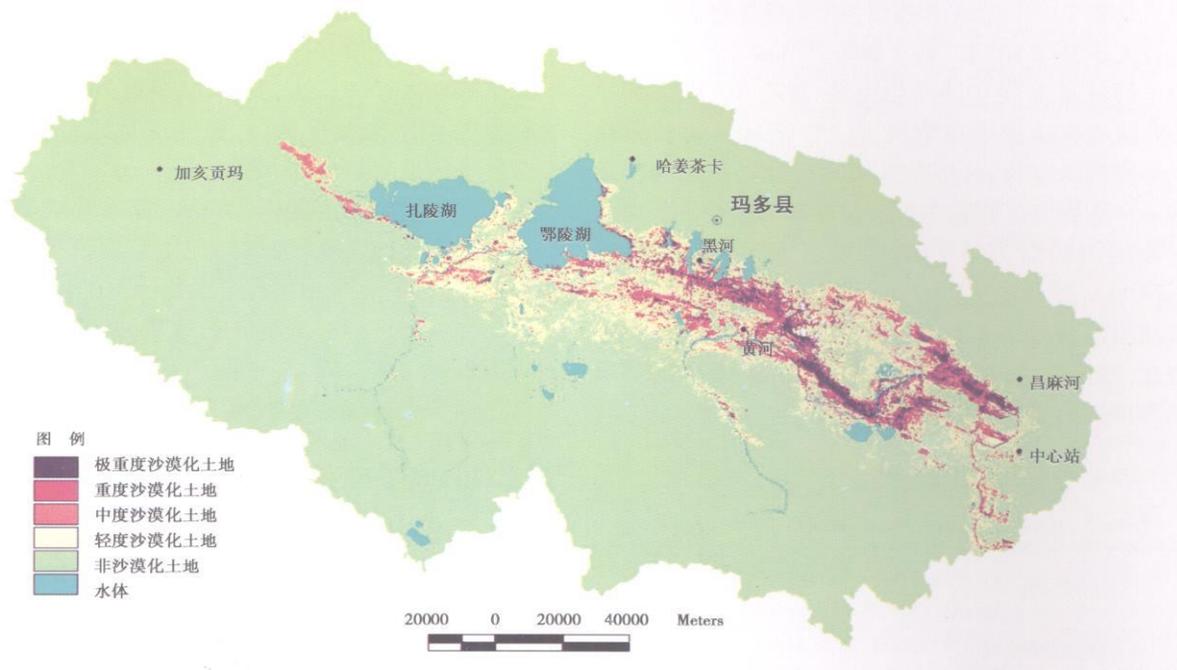


图 1 黄河源区沙漠化土地分布图 (2000 年)

Fig. 1 The extent and severity of desertification in the headwater area of the Yellow River in 2000

壤的有关数据资料<sup>[16], 1), 2)</sup>, 估算了不同沙漠化程度土地类型的平均碳密度 (表 1)。根据以上数据, 在假设通过沙漠化的治理与生态重建使现有的各类沙漠化土地都恢复为轻度沙漠化土地为条件, 估算极重度, 重度, 中度沙漠化土地得到恢复后的土壤固存潜力, 计算公式为

$$C_i = S_i \cdot \Delta C_i \quad (1)$$

式中  $i$  为第  $i$  类沙漠化土地类型,  $C$  为潜在固碳量,  $S_i$  沙漠化土地面积,  $\Delta C_i$  第  $i$  类沙漠化土地与轻度沙漠化土地的碳密度差值。

### 3.2 黄河源区沙漠化土地碳储量

利用遥感监测的黄河源区沙漠化土地分布面

表 1 沙漠化土地平均有机质含量、土壤容重和碳密度

Table 1 Soil carbon content of desertified lands

沙漠化土地	$Q_i$ (%)	$W_i$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_i$ (kg/m <sup>2</sup> )
极重度沙漠化土地	0.23	1.485	0.396
重度沙漠化土地	0.65	1.497	1.129
中度沙漠化土地	1.97	1.447	3.307
轻度沙漠化土地	4.98	1.275	7.365

积, 根据各类沙漠化土地土壤剖面采样与理化分析测试获得的土壤有机碳密度, 估算出黄河源区沙漠化土地表层土壤有机碳储量。估算结果表明, 沙漠化土地表层土壤有机碳储量达  $15.68 \times 10^6$  t 其中, 极重度沙漠化土地土壤有机碳储量  $0.2 \times 10^6$  t 重度沙漠化土地土壤有机碳储量  $0.55 \times 10^6$  t 中度沙漠化土地土壤有机碳储量  $3.05 \times 10^6$  t 轻度沙漠化土地土壤有机碳储量  $11.88 \times 10^6$  t 分别占沙漠化土地表层土壤有机碳总储量的 1.28%、3.51%、19.45% 和 75.76%。轻度沙漠化土地的土壤有机碳储量最高, 这一方面说明, 如果黄河源区的沙漠化不能得到有效的治理, 随着沙漠化程度的逐渐加重, 将会有大量的土壤有机碳流失的危险存在; 另一方面, 通过沙漠化的有效治理、沙漠化的控制, 沙漠化过程将发生逆转, 通过植被、土壤的逐步恢复, 土壤固碳能力逐步增强, 逆转恢复的沙漠化土地将成为碳汇。

### 3.3 黄河源区沙漠化土地固碳潜力

在假设通过沙漠化的治理与生态重建使现有的各类沙漠化土地都恢复为轻度沙漠化土地的条件, 对黄河源区沙漠化土地固存潜力, 并只对土壤表层 20 cm 的土壤层有机碳储量进行了估算, 估算

1) 果洛藏族自治州农牧业综合区划报告·果洛藏族自治州农牧业区划办公室, 1994。

2) 玛多县畜牧业区划报告·果洛藏族自治州农牧业区划办公室, 1987。

结果见表 2。计算结果表明,不同沙漠化土地固碳潜力大小基本相同。若 1 907.27 km<sup>2</sup> 的沙漠化土地全部恢复为轻度沙漠化土地,将有 10.25 × 10<sup>6</sup> t 的有机碳在土壤中得到固定。若有 50% 的沙漠化土地得到恢复的话,将有 5.12 × 10<sup>6</sup> t 的有机碳在土壤中得到固定。按这个数字整个黄河源地区沙漠化土地的固碳潜力是 1990 年以来土壤碳排放量的 1.24 倍。随着沙漠化治理和生态环境建设的开展,黄河源区沙漠化土地将会从现在的碳源变为碳汇。因此,沙漠化治理与生态环境建设是恢复生态,实现减排增汇的双赢策略。

表 2 黄河源区土地沙漠化固碳能力

Table 2 Potential to sequestering carbon from desertified land

沙漠化程度	面积 (km <sup>2</sup> )	单位面积固碳量 (kg/m <sup>2</sup> )	固碳量 (10 <sup>6</sup> t)
极重度沙漠化土地	499.10	6.969	3.48
重度沙漠化土地	486.10	6.236	3.03
中度沙漠化土地	922.07	4.056	3.74
轻度沙漠化土地	1 612.7		
合计	1 907.27		10.25

## 4 结论与讨论

黄河源区沙漠化土地处于正在发展和强烈发展阶段,沙漠化形势严峻。目前沙漠化土地面积达 3 519.97 km<sup>2</sup>,其中轻度沙漠化土地面积占 45.82%、中度沙漠化占 26.20%、重度沙漠化土地与极重度沙漠化土地面积分别占 13.80% 和 14.18%。我们设想通过沙漠化治理,使极重度、重度、中度沙漠化得到恢复并转变为轻度沙漠化土地,这将使 1 907.27 km<sup>2</sup> 的沙漠化土地得到恢复。根据目前沙漠化土地土壤有机碳密度,我们初步估计将会有 10.25 × 10<sup>6</sup> t 的土壤有机碳能够得到固定。在固定的土壤碳中,极重度沙漠化土地、重度沙漠化土地和中度沙漠化土地贡献分别为 4%、30%、36%。因此,目前黄河源区沙漠化土地具有较高的固碳潜力,通过沙漠化的有效治理,不仅能够改善区域生态环境,促进区域社会经济的可持续发展,而且将使黄河源区成为陆地碳汇的重要区域。

为了改善中国西部的生态环境和摆脱中国西部的贫穷落后面貌,中国政府制定了西部开发战略,生态环境建设是西部开发的主要内容,退耕还林还草、荒漠化土地治理是西部生态恢复与重建的主要途

径。目前退耕还林还草、荒漠化治理工程已得以实施,而且这些工程的实施主要以政府投资为主。中国东部地区经济发达,城市化进程迅速,这一地区也是我国 CO<sub>2</sub> 主要排放区,而西部地区经济落后,生态环境的退化也相当严重。但从另一角度看,中国西部地区潜在的固碳能力巨大,随着生态环境治理与恢复工程的实施,通过陆地生态系统类型合理转型,荒漠化的有效控制和荒漠化土地的恢复,不仅能使西部生态环境得到有效的改善,还能使这一地区碳汇得到增加。因此,中国东部地区经济的高速增长与西部生态环境建设,从陆地生态系统碳循环的角度来讲,是一种互补的关系。是我国实现 CO<sub>2</sub> 减排与增汇的有效陆地生态系统管理策略。为此,中国西部生态环境建设可通过与东部地区的碳贸易来实现,这不仅能促进我国生存环境的改善,还能保证我国社会经济的高速发展,也能应对我国履行气候变化公约所应承担的责任,同时还可减少国家财政的负担。因此,以“退耕还林还草”“荒漠化防治”为手段的西部生态环境建设,是实现我国生态恢复与社会经济持续稳定增长的双赢策略。但也应从碳贸易的角度从新审视这一问题,中国西部地区生态环境建设不仅要依靠国家及当地政府的投资,而且还要通过对东部发达地区的 CO<sub>2</sub> 减排补偿来保证这一工程顺利实施。

## 参考文献 (References)

- [1] UNEP. World Atlas of Desertification (2<sup>nd</sup> edition) [M]. London: Edward Arnold, 1998: 182
- [2] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect [J]. *Progress in Environmental Science* 1999, 1: 307~326
- [3] Zeng Yongnian, Feng Zhaodong. Advances in sandy desertification detecting and its environmental impacts [J]. *Journal of Mountain Science* 2005, 23(2): 218~227 [曾永年, 冯兆东. 沙质荒漠化遥感监测与环境影响研究进展 [J]. *山地学报*, 2005, 23(2): 218~227]
- [4] Lal R. The Potential of US Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect [M]. Chelsea: Ann Arbor Press, MI, 1998: 128
- [5] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems of west Asia and North Africa [J]. *Land Degradation & Development* 2002, 13: 45~59
- [6] Duan Zhenghu. Estimate of total CO<sub>2</sub> output from desertified sandy land in China [J]. *Atmospheric Environment* 2001, 35: 5915~5921
- [7] Chen G. Some understandings about the eco-environmental protection and buildings in the source region of Yangtze and Yellow Rivers

- [J]. *Advance in Earth Sciences* 1998, 13 (suppl) 1: 1~5 [程国栋. 关于江河源区生态环境保护与建设研究的几点认识 [J]. 地球科学进展, 1998, 13 (增刊): 1~5]
- [8] Dong G, Yan P, Su Z. The urgency of research and control of land desertification in the source area of Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Advance in Earth Sciences* 1998, 13 (Suppl): 32~36 [董光荣, 严平, 苏志珠. 江河源区土地荒漠化亟待研究和治理 [J]. 地球科学进展, 1998, 13 (增刊): 32~36]
- [9] Zheng D, Yao T. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2006, 21 (5): 451~458 [郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (5): 451~458]
- [10] Zhu Z. Concept, cause and control of desertification in China [J]. *Quaternary Sciences* 1998, 2: 145~155 [朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治 [J]. 第四纪研究, 1998, 2: 145~155]
- [11] Wang T, Wu W, Wang X. Remote sensing monitoring and assessing sandy desertification: an example from the sandy desertification region of northern China [J]. *Quaternary Sciences* 1998, 2: 110~130 [王涛, 吴薇, 王熙章. 沙质荒漠化的遥感监测与评价 [J]. 第四纪研究, 1998, 2: 108~118]
- [12] Gao S, Wang B, Zhu L, et al. Monitoring and evaluation indicator system on sandy desertification of China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(2): 1~10. [高尚武, 王葆芳, 朱灵益, 等. 中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系 [J]. 林业科学, 1998, 34 (2): 1~10]
- [13] Li S, Dong Y, Dong G. Sandy Desertification Problem and Sustainable Development in Qinghai-Xizang Plateau [M]. Beijing: China Tibetan Research Press, 2001 [李森, 董玉祥, 董光荣. 青藏高原沙漠化问题与可持续发展 [M]. 北京: 中国藏学出版社, 2001]
- [14] Dong G, Gao S, Jin J, et al. The Study on the Desertification and Ways to Combat It in Gonghe Basin, Qinghai [M]. Beijing: Science Press, 1993. [董光荣, 高尚武, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径 [M]. 北京: 科学出版社, 1993]
- [15] Zeng Y, Feng Z. The spatial and temporal changes of desertification in the headwater area of the Yellow River using remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62 (5): 529~536 [曾永年, 冯兆东. 黄河源区土地沙漠化时空变化遥感分析 [J]. 地理学报, 2007, 62 (5): 529~536]
- [16] The Agriculture Planning Office of Qinghai Province. Soil in Qinghai Province [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997 [青海省农业资源区划办公室. 青海土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997]
- [17] Zeng Y, Feng Z, Cao G. Detection of ecological environment around Longyongxia reservoir: the upper reach of the Yellow River by remote sensing and GIS [J]. *Journal of Mountain Science* 2003, 21(2): 140~148 [曾永年, 冯兆东, 曹广超. 基于 GIS 的黄河上游龙羊峡库区生态环境遥感监测研究 [J]. 山地学报, 2003, 21(2): 140~148]
- [18] Zhou G, Wang Y, Jiang Y, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling [J]. *Acta Phytocologia Sinica*, 2002, 25 (2): 250~254 [周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250~254]

## Potential to Sequestering Carbon from Atmosphere through Rehabilitating Desertified Land in the Head Water of the Yellow River

ZENG Yongnian<sup>1</sup>, MA Zhenglong<sup>1</sup>, FENG Zhaodong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Surveying Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

<sup>2</sup> National Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Desertification resulted grassland ecosystem deterioration and soil organic matter lost, leading to terrestrial carbon being released to the atmosphere. Therefore, degraded land would become a major carbon source. However, through effective measures for combating desertification, desertification process could be controlled to some extent and the degraded lands could be restored. Restoring desertified lands would be an alternative approach to sequester the carbon from atmosphere. If we assume that most severe, severe, moderate desertified lands can be rehabilitated and converted to mild desertified land through combating desertification using rational land use, the total 1 907.27 km<sup>2</sup> of various types of desertified lands could be rehabilitated in the headwater area of the Yellow River. Based on the present organic carbon content in desertified land, we could make some preliminary estimates of total 10.25 × 10<sup>6</sup> t organic carbon can be fixed in the soil. Of these fixations most severe, severe, moderate desertified lands would contribute, respectively, 34%, 30%, 36%. Therefore, present desertified lands have potential to sequestering carbon from atmosphere through rehabilitating desertified land.

**Key words** high and cold grassland, rehabilitating desertified land, organic carbon content, potential to sequestering carbon from atmosphere, head water of the Yellow River