

# 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力

韩 冰, 王效科\*, 逯 非, 段晓男, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 研究在搜集和整理全国典型农业长期定位实验站数据的基础上, 通过自建经验公式估算了不同管理措施下我国农田土壤的固碳能力和潜力。通过施用化肥、秸秆还田、施用有机肥和免耕措施, 目前对我国农田土壤碳增加的贡献分别为 40.51、23.89、35.83  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  和 1.17  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 合计为 101.4  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 是我国目前能源活动碳总排放量的 13.3%。通过情景分析发现, 提高化肥施用量、秸秆还田量、有机肥施用量和推广免耕, 可以使我国农田土壤的固碳量分别提高到 94.91、42.23、41.38  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  和 3.58  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 合计为 182.1  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。农田土壤总的固碳潜力相当于目前我国能源活动碳排放量的 23.9%, 对于全球  $\text{CO}_2$  减排具有重要的作用。

**关键词:** 农田生态系统; 秸秆还田; 使用有机肥; 免耕; 固碳潜力

文章编号: 1000-0933(2008)02-0612-08 中图分类号: Q142, S154.1, X171.1 文献标识码: A

## Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China

HAN Bing, WANG Xiao-Ke\*, LU Fei, DUAN Xiao-Nan, OUYANG Zhi-Yun

State Lab of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 0612 ~ 0619.

**Abstract:** Rising atmospheric carbon dioxide concentration is a concern because of its potential for altering climate. Since the beginning of the Industrial Revolution in the 18th century, atmospheric  $\text{CO}_2$  has increased by more than 30%. The increase in fossil fuel burning and associated  $\text{CO}_2$  emissions is expected to continue for the foreseeable future, and a double or even tripling of the preindustrial concentration of atmospheric  $\text{CO}_2$  is possible by the end of the 21st century.

Some authors have thought agricultural soils could sequester a considerable carbon to slow the rise of the atmospheric  $\text{CO}_2$ . In fact, this sequestering potential depends on initial soil content, climate and cultivation. The long-term experiments in North America have proved that arable lands have been changing from a C source to sink by conservation management, such as reduced- and no-till practice, manure use, rotation, and introducing cover crops. From the point of view of agricultural management, to keep the sustainable development and realize the carbon sequestration potential is crucial to both crop production and carbon mitigation. The contribution of China's agricultural practice to atmospheric  $\text{CO}_2$  has been paid a great attention because China has a long history of agriculture to support one-fifth of global population.

In this study, based on domestic typical long-term field experiment data, experiential models were constructed to estimate the carbon sequestration status and potential of agricultural soil under different managements in China. In current

**基金项目:** 中国科学院创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-17); 国家重点基础研究发展规划“973”资助项目(2002CB412503)

**收稿日期:** 2006-12-04; **修订日期:** 2007-04-29

**作者简介:** 韩冰(1978~), 女, 黑龙江人, 博士, 主要从事陆地生态系统 C、N 循环研究. E-mail: hanb666@yahoo.com.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by the Project of Knowledge Innovation of CAS(No. KZCX 1-SW -01-17) and the National Key Basic Research Project(No. 2002CB412503)

**Received date:** 2006-12-04; **Accepted date:** 2007-04-29

**Biography:** HAN Bing, Ph D., mainly engaged in C and N cycling of terrestrial ecosystem. E-mail: hanb666@yahoo.com.cn

situation, the carbon sequestration in agricultural soil of N fertilizer use, residue return, manure use and zero-tillage, were 40.51, 23.89, 35.83  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  and 1.17  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. The total carbon sequestration capacity was 101.4  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , which was equal to 13.3% of the annual carbon emission from fossil fuel use in China. In the scenarios of increased N fertilizer use, popularization of residue return, manure use and zero-tillage, the carbon sequestration potential can reach 94.91, 42.23, 41.38  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  and 3.58  $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. These management measures are very important to  $\text{CO}_2$  mitigation since the total carbon sequestration potential accounts for 23.9% of the annual carbon emission from fossil fuel use in China.

**Key Words:** agri-ecosystem; residue return; manure use; zero-tillage; carbon sequestration potential

大气  $\text{CO}_2$  浓度升高可能引起的全球气候变化已经受到世界各国的普遍重视。人类正在努力寻找各种能够减缓大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的技术措施。除与能源有关的措施外,增加陆地生态系统中的碳库储量也被认为是一种非常有效的  $\text{CO}_2$  减排措施,并得到了《京都议定书》的承认。

土壤有机碳动态变化不但受自然因素,如温度、降水和植被类型的影响,而且很大程度上受施肥、秸秆还田、免耕和灌溉等农业耕作管理措施的影响。通过改进和优化耕作措施,如采用保护性耕作措施、扩大水田种植面积、增加秸秆还田、增加有机肥施用和采用轮作等,可以减少农田土壤的  $\text{CO}_2$  净排放,稳定甚至增加土壤有机碳贮量。近年来,农田土壤碳固定的研究已经成为国际全球变化研究的一个重要热点。已有较多资料表明,发达国家实行的保护性耕作、秸秆还田、施用有机肥和化肥等农业管理措施,使得农业土壤碳库在近期呈现出稳定和增长的趋势<sup>[1~3]</sup>。农田土壤碳库的稳定与增加,对于保证全球粮食安全与缓解气候变化趋势具有双重的积极意义。中国是世界上重要的农业大国,且历史悠久,中国农田管理措施对土壤固碳作用的影响已经受到了广泛的关注<sup>[4]</sup>。但在国内几乎没有该方面的全国尺度的研究。

本研究在搜集和整理全国典型的农业长期定位实验站的数据的基础上,分析了几种典型的耕作管理措施(施用化肥、施用有机肥、秸秆还田和免少耕)下中国农田土壤固碳速率的地区差异及其影响因素,并通过建立经验模型,分别估算与评价了在这些典型的栽培管理措施下中国农田土壤的固碳现状与潜力,这将为我国在参加“后京都议定书”全球  $\text{CO}_2$  减排谈判中如何利用陆地生态系统的固碳潜力提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究思路

本研究是基于现有的农田长期定位研究资料,根据我国气候、土壤性质、耕作措施和土壤有机碳特征及资料的可获得情况,将我国的农田进行分区,通过统计分析,得到各农业分区的农田土壤在 4 种不同耕作措施下(施用化肥、施用有机肥、秸秆还田和免少耕)的固碳速率,然后根据我国各地区的农业生产现状和发展趋势,确定 4 种耕作措施的现状和发展情景,最后估算我国 4 种耕作措施的固碳现状和潜力。

### 1.2 农业分区

农田土壤的固碳能力受到作物种类、气候、土壤性质和种植制度等多种因素的影响,并且有些影响因素还很难定量,如种植水稻有利于土壤有机碳的积累<sup>[5]</sup>,因此,采取农业分区的方法,以集中反映要考虑的管理措施对农田土壤固碳能力的贡献。由于考虑到长期定位实验数据数量的限制,将中国划分为 4 个农业区:东北旱作一熟区(I)、北方旱作两熟区(II)、东南部水田两熟三熟区(III)和西北旱作两熟区(IV)(表 1)。在实际估算农田土壤的固碳速率时,有些耕作措施(如施用化肥和免少耕)的资料较少并分布较集中,将分区 II 和 IV 进行了合并,两者都是旱作农业地区。因为港、澳、台地区无相关数据,因此研究结果没有将港、澳、台地区计算在内。

### 1.3 固碳速率的计算方法

为了排除实验地之间的气候条件、土壤性质及耕作栽培措施的区域差异的影响,在计算各耕作措施的土壤固碳速率时,将采用耕作措施的农田土壤碳变化量减去该试验站空白区的土壤碳变化量:

表 1 中国 4 个大区所包括的省市及主要作物类型

Table 1 Provinces included and main crop types in agriculture zones in China

| 分区 Zones                                                          | 包括的省市 Provinces included                                                                                                                                                                                                                | 主要作物类型 Main crops                       |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 东北旱作一熟区 (I) Northeast single-crop farming area                    | 黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古东北部 Heilongjiang, Jilin, Liaoning, Northeastern Inner Mongolia                                                                                                                                                          | 玉米、大豆、春小麦一熟<br>Corn, Bean, Spring wheat |
| 北方旱作两熟区 (II) Northern double-crop farming area                    | 北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区 (除 I 区外的地区)、河南省、山东省 Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia, Heinan, Shandong                                                                                                                            | 冬小麦与玉米等两熟<br>Winter wheat, Corn         |
| 东南部水田两熟三熟区 (III) Southeast double-or-triple-crop paddy field area | 上海市、福建省、江西省、浙江省、安徽省、江苏省、湖北省、湖南省、四川省、云南省、贵州省、重庆市、广东省、广西壮族自治区、海南省、香港、澳门、中国台湾 Shanghai, Fujian, Jiangxi, Zhejiang, Anhui, Jiangsu, Hubei, Hunan, Sichuan, Yunnan, Guizhou, Chongqing, Guangdong, Guangxi, Hainan, Hong Kong, Macao, Taiwan | 冬小麦与水稻两熟三熟<br>Winter wheat, Rice        |
| 西北旱作两熟区 (IV) Northwest double-crop farming area                   | 陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、西藏自治区 Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang, Tibet                                                                                                                                                    | 冬小麦与玉米等两熟 (或一熟)<br>Winter wheat, Corn   |

$$SCR_F = DSOC_F - DSOC_0 \quad (1)$$

式中,  $SCR_F$  为农田土壤固碳速率 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $DSOC_F$  为有措施农田土壤碳年变化量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $DSOC_0$  为无措施农田土壤碳年变化量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

$DSOC_F$  和  $DSOC_0$  可根据下式的  $DSOC$  计算:

$$DSOC = (SOC_2 - SOC_1) / n \quad (2)$$

式中,  $DSOC$  为土壤碳年变化量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $SOC_2$  为经过长期定位试验  $n$  年后土壤碳库的末值 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $SOC_1$  为同一试验小区长期定位试验布置前的土壤碳库的初值 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $n$  为长期定位试验的年数。

土壤的有机碳库 ( $SOC$ ) 可用下式估算:

$$SOC = SOC' \times BD \times H \times 10 \quad (3)$$

式中,  $SOC$  为土壤有机碳库 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $SOC'$  为土壤有机碳含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $BD$  为土壤容重 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $H$  为土层厚度 ( $\text{cm}$ )。

然后按照农业分区建立固碳速率与耕作措施的施用量 (如化肥、有机肥和秸秆) 之间的关系, 或得出各分区的土壤固碳速率平均值。由于免少耕措施的长期定位试验数据量少, 无法作上述的统计分析, 因此我们将各分区内的各试验点土壤固碳速率进行平均作为各分区的土壤固碳速率平均值 (表 2)。

#### 1.4 固碳量现状和潜力的估算

农田土壤固碳量现状和潜力分别根据耕作措施的现状和未来施用量 (如化肥、有机肥和秸秆) 或推广面积 (如免少耕) 与固碳速率 (表 2) 估算。

(1) 化肥施用量现状和潜力 化肥氮施用量现状来自中国农业科学院农业信息中心的 2003 年农业统计资料。施用量潜力是假设随着社会经济条件发展, 将会使各省化肥施用量较少的县的农田化肥施用量水平达到该省分县的化肥氮施用量的 90% 的值, 作为各省化肥氮施用的潜力。

(2) 有机肥施用量现状和潜力 首先根据中国农业科学院农业信息中心提供的 2003 年农业人口与猪和大牲畜的年末存栏数等数据和全国人、畜、禽粪尿的年排泄物<sup>[6]</sup>, 得出有机肥资源量, 并假设农区的有机肥施用量现状为有机肥资源量的 45%<sup>[7~17]</sup>, 牧区的有机肥施用量现状是人和猪的粪尿有机肥资源量的 45%<sup>[15]</sup>。有机肥施用量的潜力为农区不变, 牧区在原有现状的基础上加上大牲畜粪尿的 1/3。

(3) 秸秆还田量现状和潜力 秸秆还田量现状首先是根据中国农业科学院农业信息中心提供 2003 年各种作物的产量, 乘以相应作物的秸秆籽粒比<sup>[18]</sup>得到秸秆资源量, 然后乘以秸秆还田率。现状秸秆还田率是根

据包雪梅博士论文的调查数据<sup>①</sup>。秸秆还田量潜力是假设秸秆资源量不变,而秸秆还田率水稻田取 50%、玉米地取 95%,其余作物均可达 100%<sup>[6, 19, 20]</sup>,然后根据各省市各种作物的播种面积(统计数据)进行加权平均,得到各省市平均的最大秸秆还田率。

表 2 农田土壤固碳速率的估算  
Table 2 Carbon sequestration rates of agricultural soils

| 措施<br>Measures         | 分区 *<br>Zones | 公式 **<br>Equation          | 样本数<br>Numbers | 相关系数<br>$R^2$ | 显著性水平<br>Significance |
|------------------------|---------------|----------------------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 施用化肥<br>Fertilizer use | I             | $SCR_F = -2.344N + 460.07$ | 27             | 0.4261        | Sig. <0.05            |
|                        | II + IV       | $SCR_F = 0.215N + 67.981$  | 13             | 0.5343        | Sig. <0.05            |
|                        | III           | $SCR_F = 6.423N - 1173.3$  | 15             | 0.5273        | Sig. <0.05            |
| 施用有机肥<br>Manure use    | I             | $SCR_F = 24.092M + 277.23$ | 50             | 0.4032        | Sig. <0.05            |
|                        | II            | $SCR_F = 49.795M - 275.28$ | 9              | 0.5518        | Sig. <0.05            |
|                        | III           | $SCR_F = 9.042M + 521.74$  | 11             | 0.4899        | Sig. <0.05            |
|                        | IV            | $SCR_F = 10.614M - 4.254$  | 3              | 0.8835        | Sig. <0.05            |
| 秸秆还田<br>Residue return | I             | $SCR_F = 170.32R + 803.46$ | 13             | 0.4797        | Sig. <0.05            |
|                        | II            | $SCR_F = 58.068R + 20.688$ | 10             | 0.6139        | Sig. <0.05            |
|                        | III           | $SCR_F = 16.796R - 15.917$ | 17             | 0.5179        | Sig. <0.05            |
|                        | IV            | $SCR_F = 0.505R + 231.73$  | 7              | 0.4114        | Sig. <0.05            |
| 免少耕<br>Zero-tillage    | I             | 255.2                      | 7              |               |                       |
|                        | II + IV       | 268.4                      | 7              |               |                       |
|                        | III           | 343.7                      | 9              |               |                       |

\* 分区 I:东北旱作一熟区, II:北方旱作两熟区, III:东南部水田两熟三熟区, IV:西北旱作两熟区; \* \*  $SCR_F$  为土壤固碳速率( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $N$  为氮肥施用量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $M$  为有机肥施用量( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),  $R$  为秸秆还田量( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

\* I:Northeast single-crop farming area, II:Northern double-crop farming area, III:Southeast double-or-triple-crop paddy field area, IV:Northwest double-crop farming area; \* \*  $SCR_F$ :Rate of soil carbon sequestration( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $N$ : Amount of fertilizer use( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $M$ : Amount of manure use( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $R$ : Amount of residue return( $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

免少耕面积现状和潜力:免耕措施的施行面积现状数据来自《中国农业机械年鉴》(2003 年)<sup>[21]</sup>。根据农业部编制的保护性耕作发展建设规划(2003 ~ 2012 年),我国北方 13 省市区-即北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆-有 20% 的耕地可以实现保护性耕作,因此免耕措施的施行面积潜力为北方 13 省市区的耕地面积的 20% 加上南方(其他的省市区)的施行面积现状。

## 2 结果和讨论

### 2.1 施用化肥的固碳现状和潜力

我国农田施用化肥土壤固碳现状为  $40.51 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3),其中山东省最高,达  $8.11 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,贵州省最低,为  $-5.44 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,仅有 4 个省市区为负值,可能是由于当地土壤有机碳含量比较高,并且施肥量较少。从单位面积的平均固碳速率上来看,全国平均可达  $380.78(95.20 \sim 666.37) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,地区间变化规律为我国北方普遍较低,东南部地区较高,与化肥施用量的分布规律比较相似。

我国农田通过提高施用化肥量土壤可达的固碳潜力为  $94.91 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中仍然是山东省最高,达  $18.35 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,吉林省最低,为  $-4.06 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。提高了化肥施用量后,全国仍然有 4 个省市区土壤固碳潜力为负值。从单位面积的平均固碳潜力上看,全国平均水平可提高到  $892.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,是现状的 2.3 倍。地区间变化规律与土壤固碳速率现状的相似。

① 包雪梅. 中国有机肥资源与养分再循环研究. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2002

表 3 中国农田土壤的固碳现状和潜力

Fig. 3 Status and potential of carbon sequestration of agricultural soil

| 省市<br>Site            | 固碳现状 ( $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ) |                     |                        |                     | 固碳潜力 ( $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ) |                     |                        |                     |
|-----------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
|                       | Carbon sequestration status              |                     |                        |                     | Carbon sequestration potential           |                     |                        |                     |
|                       | 施用化肥<br>Fertilizer use                   | 施用有机肥<br>Manure use | 秸秆还田<br>Residue return | 免少耕<br>Zero-tillage | 施用化肥<br>Fertilizer use                   | 施用有机肥<br>Manure use | 秸秆还田<br>Residue return | 免少耕<br>Zero-tillage |
| 北京 Beijing            | 0.04                                     | —                   | 0.03                   | 0.01                | 0.04                                     | —                   | 0.05                   | 0.02                |
| 天津 Tianjin            | 0.03                                     | 0.04                | 0.08                   | 0.01                | 0.05                                     | 0.14                | 0.14                   | 0.03                |
| 河北 Hebei              | 0.77                                     | 0.31                | 1.42                   | 0.40                | 1.01                                     | 1.24                | 2.59                   | 0.40                |
| 山西 Shanxi             | 0.38                                     | —                   | 0.51                   | 0.02                | 0.42                                     | —                   | 0.78                   | 0.25                |
| 内蒙古<br>Inner Mongolia | 0.57                                     | —                   | 0.33                   | 0.04                | 0.76                                     | —                   | 1.32                   | 0.44                |
| 辽宁 Liaoning           | -0.50                                    | 1.38                | 4.06                   | —                   | -1.88                                    | 1.58                | 6.34                   | 0.21                |
| 吉林 Jilin              | -1.59                                    | 1.82                | 4.45                   | 0.02                | -4.06                                    | 2.04                | 9.66                   | 0.28                |
| 黑龙江 Heilongjiang      | 2.03                                     | 2.52                | 8.00                   | 0.11                | 1.02                                     | 2.67                | 10.81                  | 0.60                |
| 上海 Shanghai           | 0.39                                     | 0.13                | —                      | 0.01                | 1.18                                     | 0.15                | 0.01                   | 0.01                |
| 江苏 Jiangsu            | 7.37                                     | 2.73                | 0.06                   | 0.26                | 11.76                                    | 2.89                | 0.22                   | 0.26                |
| 浙江 Zhejiang           | 2.36                                     | 1.18                | —                      | —                   | 4.62                                     | 1.32                | 0.06                   | —                   |
| 安徽 Anhui              | 2.54                                     | 3.14                | 0.03                   | 0.06                | 9.82                                     | 3.25                | 0.19                   | 0.06                |
| 福建 Fujian             | 2.39                                     | 0.70                | 0.01                   | —                   | 5.49                                     | 0.78                | 0.03                   | —                   |
| 江西 Jiangxi            | 0.90                                     | 1.23                | 0.08                   | —                   | 3.42                                     | 1.32                | 0.09                   | —                   |
| 山东 Shandong           | 8.11                                     | 0.35                | 0.88                   | 0.02                | 18.35                                    | 1.20                | 2.99                   | 0.02                |
| 河南 Henan              | 1.01                                     | 1.04                | 1.27                   | 0.13                | 1.43                                     | 2.26                | 3.07                   | 0.13                |
| 湖北 Hubei              | 5.75                                     | 1.77                | 0.09                   | —                   | 10.70                                    | 1.90                | 0.20                   | —                   |
| 湖南 Hunan              | 3.20                                     | 1.93                | 0.02                   | —                   | 6.05                                     | 2.16                | 0.19                   | —                   |
| 广东 Guangdong          | 1.40                                     | 3.46                | —                      | —                   | 4.71                                     | 3.62                | 0.01                   | —                   |
| 广西 Guangxi            | 1.26                                     | 1.79                | —                      | —                   | 2.56                                     | 1.90                | 0.08                   | —                   |
| 海南 Hainan             | 0.16                                     | 0.31                | —                      | —                   | 0.39                                     | 0.32                | —                      | —                   |
| 重庆 Chongqing          | 0.87                                     | 1.10                | —                      | —                   | 4.08                                     | 1.19                | 0.10                   | —                   |
| 四川 Sichuan            | 3.71                                     | 2.61                | 0.02                   | 0.01                | 8.49                                     | 2.87                | 0.38                   | 0.01                |
| 贵州 Guizhou            | -5.44                                    | 4.33                | —                      | —                   | -3.10                                    | 4.38                | 0.07                   | —                   |
| 云南 Yunnan             | 1.87                                     | 1.78                | —                      | —                   | 6.14                                     | 1.88                | 0.15                   | —                   |
| 西藏 Tibet              | -0.20                                    | —                   | 0.05                   | —                   | -0.08                                    | —                   | 0.05                   | —                   |
| 陕西 Shaanxi            | 0.49                                     | 0.13                | 1.04                   | 0.07                | 0.59                                     | 0.19                | 1.05                   | 0.28                |
| 甘肃 Gansu              | 0.31                                     | 0.02                | 0.77                   | —                   | 0.46                                     | 0.06                | 0.77                   | 0.27                |
| 青海 Qinghai            | 0.04                                     | 0.00                | 0.12                   | —                   | 0.05                                     | 0.01                | 0.12                   | 0.04                |
| 宁夏 Ningxia            | 0.09                                     | 0.03                | 0.19                   | —                   | 0.15                                     | 0.04                | 0.19                   | 0.07                |
| 新疆 Xinjiang           | 0.22                                     | —                   | 0.52                   | 0.01                | 0.27                                     | 0.01                | 0.52                   | 0.21                |
| 全国 total              | 40.51                                    | 35.83               | 23.89                  | 1.17                | 94.91                                    | 41.38               | 42.23                  | 3.58                |

与国外研究结果比较。Schlesinger 研究的结果表明,美国农田在施用化肥氮  $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的情况下,土壤平均固碳速率为  $380 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  [22]。Lal 和 Bruce 估计施用化肥全球农田土壤平均固碳速率为  $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,总固碳能力可达  $100 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$  [23]。

## 2.2 施用有机肥的固碳现状和潜力

我国施用有机肥农田土壤固碳能力的现状为  $35.83 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中贵州省最高,达  $4.33 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,内蒙古自治区、山西省、北京市、西藏自治区、新疆维吾尔自治区和青海省都非常低,小于  $0.01 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从单位面积的平均固碳速率上来看,全国平均可达  $316.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,四川省的平均固碳速率最高,达  $651.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,内蒙古自治区、山西省、北京市和西藏自治区都非常低,小于  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,地区间变化规律为我国北方普遍较低,其中尤以我国西北地区和内蒙古自治区更低,东南部地区较高,与有机肥施用量的分布规律比较

相似。

我国施用有机肥农田土壤的总固碳潜力为  $41.38 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中贵州省最高, 达  $4.38 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 内蒙古自治区、山西省、北京市和西藏自治区都较低, 小于  $0.01 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从单位面积的平均固碳潜力上来看, 全国平均可达  $371.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 四川省的平均固碳潜力最高, 达  $718.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 内蒙古自治区、山西省和北京市都较低, 小于  $0.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 地区间变化规律为我国北方普遍较低, 其中尤以我国西北地区和内蒙古自治区更低, 东南部地区较高, 与有机肥施用潜力的分布规律比较相似。

我国的有机肥施用固碳速率与国外研究结果比较接近, 如 Jarecki 等研究结果表明, 美国农田在施用  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  有机肥的情况下, 土壤平均固碳速率为  $390 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[24]</sup>。Dendoncker 等的研究结果, 在施用  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  有机肥的情况下, 比利时农田土壤平均固碳速率为  $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Vleeshouwers 的研究结果认为, 在施用  $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  有机肥的情况下, 欧盟农田土壤平均固碳速率为  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[26]</sup>。

### 2.3 秸秆还田的固碳现状和潜力

我国采用秸秆还田农田土壤固碳的现状为  $23.89 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中黑龙江省最高, 达  $8.0 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从单位面积的平均固碳速率上来看, 全国平均可达  $224.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 辽宁省的平均固碳速率最高, 达  $1142.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 地区间变化规律为我国东北地区的平均固碳速率最高, 从北向南有逐渐递减的趋势。另外, 可能是因为我国东北地区年均气温较低, 有机物质分解较慢, 因此, 我国东北地区的农田土壤平均固碳速率会较高。

我国农田通过提高秸秆还田量土壤可达的固碳潜力为  $42.23 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中仍然是黑龙江省最高, 达  $10.81 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 海南省最低, 为  $0.002 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从单位面积的平均固碳潜力上看, 全国平均水平可提高到  $397.07 (99.27 \sim 694.87) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 是现状的 1.8 倍。吉林省的平均固碳潜力最高, 达  $2273.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 广东省最低, 为  $1.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 地区间变化规律与土壤固碳速率现状相似。

与国外研究结果相比较, Vleeshouwers 等<sup>[26]</sup>研究认为, 如果欧洲所有农田均应用秸秆还田措施, 欧洲农田土壤的总固碳能力可达  $34 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 单位面积的平均固碳速率为  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。但 Smith 等<sup>[1]</sup>认为欧洲应用秸秆还田措施的适宜面积为  $66.21 \text{ Mhm}^2$ , 由此估算出欧洲应用秸秆还田措施农田土壤的总固碳能力为  $1.09 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 单位面积的平均固碳速率为  $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Lal 预测采用秸秆还田措施全球农田土壤的总固碳能力可达  $200 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。

### 2.4 免耕固碳现状和潜力

采用免耕我国农田土壤固碳能力的现状为  $1.17 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中河北省最高, 达  $0.40 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 采用免耕各省市市区农田土壤固碳能力的高低目前取决于免耕措施施行面积的大小。由于免耕能够减少风蚀作用, 减少对土壤的扰动, 有利于土壤保水, 最后起到减缓土壤有机质分解的作用, 因此相比较而言, 免耕措施更适用于旱田, 所以我国北方地区的免耕施行面积较大。采用免耕措施全国平均的农田土壤固碳速率为  $284.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

采用免耕我国农田土壤固碳潜力为  $3.58 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 是固碳能力现状的 3 倍, 其中黑龙江省最高, 达  $0.60 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

与国外的研究结果比较, 单位面积的平均固碳速率各国家和地区之间相差很大, 在  $0.08 \sim 0.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  之间。Vleeshouwers 等<sup>[26]</sup>在假设欧洲所有农田都采用保护性耕作措施的情况下, 估算出欧洲农田土壤的总固碳能力为  $58 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而 Smith 等<sup>[1]</sup>认为欧洲应用保护性耕作措施的适宜面积为  $117.26 \text{ Mha}$ , 由此估算出欧洲应用保护性耕作措施的农田土壤固碳能力为  $40.4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Lal 和 Bruce<sup>[23]</sup>估算出全球应用保护性耕作措施的适宜面积大约为  $400 \text{ Mha}$ , 农田土壤总固碳能力为  $80 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

## 3 结论

在分析我国农业耕作现状和发展前景的基础上, 根据我国现有的农业长期实验资料, 得出我国主要农业措施的固碳现状和潜力分别为  $101.4$  和  $182.1 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 分别是我国 1994 年能源消耗排放  $\text{CO}_2$  总量 ( $762.4$

$\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ ) 的 13.3% 和 23.9%。其中施用化肥、施用有机肥、秸秆还田和免少耕的固碳现状及潜力分别是 40.51、35.83、23.89  $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$  和 1.17  $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$  及 94.91、41.38、42.23  $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$  和 3.58  $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由此可见,中国农田土壤可以作为一种非常重要的固碳措施,纳入全球  $\text{CO}_2$  减排措施中去。

需要说明的是,以上对中国主要农业耕作措施的固碳现状和潜力的估算只是初步的,还有许多不确定性存在,例如:(1)4 种措施的固碳现状和潜力简单直接叠加,(2)全国分成 3~4 个区域不够精细,(3)长期定位实验资料还比较缺乏等。这些问题只有随着实验资料的积累和人们对土壤有机碳形成和分解规律的深入认识,逐步减少估算的不确定性。

## References:

- [1] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *Europ. J. Agronomy*, 2004, 20: 229—236.
- [2] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, *et al.* Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, 2004, 122: 1—23.
- [3] Lai R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123: 1—22.
- [4] Li C S, Xiao X M, Frolking S, *et al.* Greenhouse gas emissions from croplands of China. *Quaternary Scineces*, 2003, 23(5): 493—503.
- [5] Han B, Wang X K, Ouyang Z Y. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 6—11.
- [6] Chinese agricultural technology promotion center. *The organic manure in China*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1999.
- [7] Tan T F. Utilization of Organic Fertilizer Resources and its Countermeasure in Bijie Prefecture. *Guizhou Agricultural Science*, 2004, 32(3): 95—96.
- [8] Zhang S Q. Distribution and Utilization of Organic Manure Resources in Gansu. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2004, 13(3): 126—130.
- [9] Ye X C, Li J M, Zhang G L. Status, problems and policy of manure resources in Henan Province. *He Nan Agriculture*, 2004, (8): 27—29.
- [10] Zhao M X, Mu C G, M L, *et al.* Development policy of manure resources in Henan Province. *Soils and Fertilizers*, 1998(4): 3—6.
- [11] Luo Y, Zhang D C, Lu M X, *et al.* Use, problem and policy of the organic manure resources in Hubei Province. *Hubei Agricultural Sciences*, 2002, (6): 67—69.
- [12] Zhou S W, Sun J Q, Wang Q S. Utilizing Saturation and Developing Countermeasure of Organic Manures Resources in Jiangxi Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(5): 170—173.
- [13] Long R G, He W X, Jiang P. Use and policy of the organic manure resources in Shadong Courty. *Crop Research*, 2005, 19(1): 43—46.
- [14] Guo Y F, Li Y F, Chen Z X, *et al.* Use and policy of the organic manure resources in Tianjin. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 2001, 161(3): 34—36.
- [15] Zheng D M, Lou Y J, Zhu C Y. Studies on the Organic Fertilizer Resources in Xingjiang. *Journal of Tarim University of Agricultural Reclamation*, 2003, 15(4): 7—11.
- [16] Zhu H L. The Original Situation of the Organic Fertilizer Resources in Guilin Region and the Corresponding Exploitation and Application. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2003, (4): 55—58.
- [17] Song J B. Investigation of the organic manure resources in Zhejiang Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(7): 61—63.
- [18] China Ministry of Agriculture /U. S. Department of Energy Project Panel. *Assessment of China Biomass Resource Availability*. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1998.
- [19] Technology communication center of Chinese society for agriculture machinery-agriculture mechanization. *Technique and equipments of fertilizing the stems of farm products*. Chinese Agricultural Press. Beijing, 1996.
- [20] Liu X H, Gao W S, Zhu W S. *Mechanism and Techniques in Straw Application*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [21] Gao Y E. *Yearbook of Chinese agricultural mechanism*. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [22] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture, Ecosystem and Environment*. 2000, 82: 121—127
- [23] Lal R, Bruce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Enviornmental Science & Policy*, 1999, 2: 177—185.
- [24] Jarecki M K, Lai R, James R. 2004 Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmers' fields in northeastern Ohio. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81(2): 265—276.
- [25] Dendoncker N, Wesemael B V, Rounsevell M D A, *et al.* Belgium's  $\text{CO}_2$  mitigation potential under improved cropland management. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2004, 103: 101—116.

- [26] Vleeshouwers L M, Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology*, 2002, 8: 519—530.

#### 参考文献:

- [4] 李长生,肖向明,S. Frolking,等. 中国农田的温室气体排放. 第四纪研究. 2003, 23(5):493~503.
- [5] 韩冰,王效科,欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力. 农村生态环境,2005,21(4):6~11.
- [6] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志. 北京:中国农业出版社,1999.
- [7] 谭廷甫. 毕节地区有机肥资源利用及对策. 贵州农业科学,2004,32(3):95~96.
- [8] 张树清. 甘肃有机肥料资源分布与利用潜力. 西北农业学报,2004,13(3):126~130
- [9] 叶学春,李继明,张桂兰. 河南省有机肥料资源发展现状、问题与对策. 河南农业,2004,(8):27~29
- [10] 赵梦霞,慕成功,慕兰,谢宝恩. 河南省有机肥料资源及开发利用对策. 土壤肥料,1998(4):3~6
- [11] 罗颖,张德才,鲁明星,等. 湖北省有机肥料资源与利用问题及对策. 湖北农业科学,2002,(6):67~69
- [12] 邹绍文,孙建奇,王秋生. 江西省有机肥料资源利用现状及发展对策. 中国农学通报,2004,20(5):170~173
- [13] 龙如高,何文选,蒋平. 邵东县有机肥料资源利用现状及对策. 作物研究,2005,19(1):43~46.
- [14] 郭云峰,李又富,陈子学,等. 天津市有机肥料资源利用现状及对策. 天津农林科技,2001,(3):34~36
- [15] 郑德明,姜益娟,朱朝阳,等. 新疆主要有机肥料资源及其利用. 塔里木农垦大学学报,2003,15(4):7~11.
- [16] 朱华龙. 原桂林地区有机肥料资源状况及开发利用. 广西农学报,2003,(4):55~58.
- [17] 宋莪苞. 浙江省主要有机肥料资源及其品质的调查研究. 土壤通报,1995,26(7):61~63.
- [18] 中国农业部/美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- [19] 中国农机学会农机化学会科技交流中心. 农作物秸秆利用技术与设备. 北京:中国农业出版社,1996.
- [20] 刘巽浩,高旺盛,朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式. 北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 高元恩. 中国农业机械年鉴. 北京:机械工业出版社,2003.