

中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况

高利伟^{1,2}, 马林¹, 张卫峰², 王方浩², 马文奇^{1*}, 张福锁²

(1. 河北农业大学资源与环境学院, 保定 071001; 2. 教育部植物—土壤相互作用重点实验室, 中国农业大学资源与环境学院, 中化化肥农大研发中心, 北京 100193)

摘要: 基于统计数据、农户调研数据以及公开发表的文献资料中的数据, 估算了 2006 年中国作物秸秆及其养分资源数量, 并且对其利用状况进行了详细的分析。结果表明, 2006 年中国作物秸秆资源数量超过 7.6 亿 t, 其中, 作物秸秆氮、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 养分资源数量分别达到 776 万 t、249 万 t、1 342 万 t。从作物秸秆去向来看, 作物秸秆还田、秸秆饲用、秸秆燃烧以及其他去向所占比例分别为 24.3%、29.9%、35.3% 和 10.5%。从不同利用方式下作物秸秆养分还田情况来看, 2006 年中国作物秸秆氮、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 养分还田量分别达到 304.6 万 t、175.6 万 t、966.7 万 t, 占秸秆养分资源量的比例分别为 39.3%、70.5% 和 72.0%, 这表明秸秆还田比例及其养分还田比例仍然有很大的提升空间。

关键词: 作物秸秆, 养分, 氮, 磷, 钾

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.032

中图分类号: S141.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0173-07

高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173—179.

Gao Liwei, Ma Lin, Zhang Weifeng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 173—179. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国主要作物秸秆种类有近 20 种。20 世纪中期秸秆的产量就在 7 亿 t 以上, 占世界秸秆资源产量的 25% 左右^[1]。秸秆中蕴藏着巨大的养分资源, 作物吸收的养分将近有一半要留在秸秆中。但是, 长期以来秸秆作为一类资源没有得到充分合理的利用, 大量的秸秆被丢弃、焚烧, 这不仅造成了资源的浪费, 同时也污染了环境^[2-3]。秸秆的利用问题是关系到资源、环境以及农业的可持续发展的重大问题^[4]。而对作物秸秆利用的研究大多集中在区域尺度^[5-7], 国家尺度上的研究主要集中在 20 世纪 90 年代, 多数学者也大多引用 90 年代的数据^[8-9]。近年来在国家尺度上对秸秆利用状况的研究鲜有报道, 秸秆养分利用状况的分析尚属空白。因此, 本文利用统计数据和 2006 年全国农户专项调研数据, 对 2006 年中国农作物秸秆及其养分资源数量进行了估算, 分析和探讨了秸秆及其养分资源的分布和利用状况, 以求为指导中国秸秆资源的合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 秸秆养分资源数量核算方法

收稿日期: 2008-11-06 修订日期: 2009-05-23

基金项目: 科技部支撑项目 (2006BAD05B04); 国家自然科学基金项目 (30571087); 农业部 948 项目 (2006-G60) 资助

作者简介: 高利伟, 男, 研究方向: 养分资源综合管理。保定 河北农业大学资源与环境学院, 071001。Email: gaoliwei1981@163.com

*通信作者: 马文奇, 男, 教授, 博士研究生导师。研究方向: 养分资源综合管理。保定 河北农业大学资源与环境学院, 071001。

Email: mawq@hebau.edu.cn

历史上对作物秸秆的管理开始于 1970 年, 虽早在 1965 年以前作物产量的数据库就已经建立, 但是秸秆产量的数据记录却很有限^[10]。中国历史上对作物秸秆资源量没有专门进行统计, 秸秆资源数量是通过与作物经济产量的关系计算得到的^[11], 即秸秆籽粒比。本文采用这种国际上比较通用的方法来估算中国秸秆养分资源数量, 其计算公式如下

$$St = \sum_{i=1}^n Cr_i \cdot Ra_i \quad (1)$$

$$SN_{(N)} = St \cdot N_i \quad (2)$$

$$SP_{(P_2O_5)} = St \cdot Ph_i \cdot 2.29 \quad (3)$$

$$SK_{(K_2O)} = St \cdot Po_i \cdot 1.2 \quad (4)$$

式中: St ——秸秆资源数量 (风干基); Cr_i ——第 i 种作物经济产量; Ra_i ——第 i 种作物秸秆籽粒比值; SN ——秸秆氮素 (N) 资源数量 (风干基); N_i ——第 i 种作物秸秆氮素养分含量; SP ——秸秆磷素 (P_2O_5) 养分资源数量 (风干基); Ph_i ——第 i 种作物秸秆磷素养分含量; 2.29——单质磷折算为五氧化二磷 (P_2O_5) 的系数; SK ——秸秆钾素 (K_2O) 养分资源数量 (风干基); Po_i ——第 i 种作物秸秆钾素养分含量; 1.2——单质钾折算为氧化钾 (K_2O) 的系数。总共涉及籽粒产量、秸秆籽粒比、秸秆氮含量、秸秆磷含量以及秸秆钾含量 5 个参数 (这里的氮、磷、钾养分分别代表 N、 P_2O_5 、 K_2O)。

1.2 数据来源

1.2.1 统计数据

作物产量的基础数据主要来自于《新中国 50 年农业

统计年鉴》^[12]以及中国的历年统计年鉴（2000-2007）中的农作物产量部分。

1.2.2 秸秆籽粒比参数

反映秸秆与籽粒的关系，除了秸秆籽粒比（秸秆/籽粒，为质量比，反映秸秆和籽粒的关系，其中秸秆中不包括根茬部分）之外，还有收获指数（harvest index，反映经济产量和地上部生物量的关系）^[13-14]，为了计算方便，本文采用秸秆籽粒比参数。

本文通过对国内外大量相关文献的搜集和整理，在对比国内外农作物的秸秆籽粒比参数基础上，从中选取中国权威文献中的秸秆籽粒比参数，确定了本研究中各种作物秸秆籽粒比参数值（表 1）。

表 1 不同作物秸秆籽粒比参数

Table 1 Parameters of different ratios of crop straw to grain

作物	秸秆籽粒比	作物	秸秆籽粒比
水稻	1.0 ^[15-19]	薯类	0.5 ^[4,9,12,18,21]
小麦	1.1 ^[4,12,16,20]	马铃薯	0.5 ^[4,12]
玉米	2.0 ^[9,15-16,19-22]	油料	2.0 ^[9,19,21-22]
高粱	2.0 ^[16,20,22]	花生	1.5 ^[16-17]
谷子	1.6 ^[4,12-13]	油菜	3.0 ^[13,16-17,20]
其他谷物	1.6 ^[16-17]	芝麻	3.0 ^[18,20]
豆类	1.6 ^[4,12]	胡麻	2.0 ^[16,18,20]
大豆	1.6 ^[4,12]	向日葵	2.0 ^[9,16]
杂豆	1.6 ^[4,12]	麻类	1.7 ^[17-18,21]
棉花	3.0 ^[9,15-17,19-22]	黄红麻	1.7 ^[18,20]
甜菜	0.1 ^[9,15-16,18,20,21]	苧麻	1.7 ^[18,20]
甘蔗	0.1 ^[9,15-16,18,20,21]	大麻	1.7 ^[18,20]
烟草	1.0 ^[18]	亚麻	1.7 ^[18,20]

1.2.3 秸秆养分含量参数

中国已经有很多文献给出了各种作物秸秆的养分含量，2000 年全国农业技术推广服务中心还做了全国性的普查^[4,8,23]，出版了《中国有机养分志》^[11]一书，本文则主要从中选取秸秆养分含量参数。

1.2.4 秸秆利用核算方法和养分还田比例核算方法

秸秆利用方式主要通过农户调研获取。调研地区遍及东北、华北、华东、中南、西南和西北地区的 21 个省（市），选取播种面积较大的省（市）为主要调研对象，每个省根据种植结构情况选取 3~5 个市，每个市选取 3~5 个县进行，每个县选取 2~3 个自然村进行实地调研，最终有效样本量 2 783 个。

秸秆去向核算包括秸秆还田（主要是指秸秆直接还田和间接还田如有机械粉碎还田、翻压还田、留高茬还田以及秸秆堆沤还田）、饲料（直接喂养牲畜以及垫圈的秸秆以及通过氨化、青贮、微贮方式做饲料的秸秆）、燃烧（农户直接用于生活燃料以及在田间和地头焚烧的秸秆，还包括作沼气的秸秆）和其他方式（包括秸秆用作造纸等的原料以及弃置乱堆）。

不同利用方式下秸秆养分还田包括秸秆直接还田、过腹还田和烧灰还田。3 种秸秆利用方式下养分还田比例是

不相同的。其中，秸秆作肥料的养分可以全部还田（见表 2）；做饲料的秸秆氮、磷、钾养分主要是通过粪尿的形式还田，据资料表明，畜禽粪尿氮的还田率只有 50% 左右^[24]，在还田过程中有 22% 左右的氮以氨挥发的形式损失到环境中去^[25]，因此综合以上因素，本研究认为，秸秆氮、磷养分过腹还田的比例分别为 50%、72%，而秸秆钾养分过腹还田比例本文采用高祥照等人的结果为 77%^[8]；秸秆作燃料（这里为了便于计算把秸秆作生活能源和焚烧合并为燃料计算）还田主要是通过灰分的形式还田，而本研究中秸秆作燃料的比例为 35.3%，而据资料表明秸秆焚烧的比例全国平均为 22.4%^[26]，其余部分主要是做生活能源，因此本文认为秸秆焚烧过程中，灰分可以全部还田（占秸秆燃料还田比例的 63.4%），而秸秆做生活能源灰分不能及时还田导致数量较少（估计小于 10%），并且由于秸秆燃烧过程中氮素养分全部损失到环境中去，因此综合以上原因，本研究认为秸秆做燃料中氮、磷、钾养分还田率分别为 0%、70%、70%。其他秸秆去向养分还田比例记作 0%。秸秆不同利用方式下秸秆养分还田比例见表 2。

表 2 不同利用方式下秸秆养分还田比例

Table 2 Rate of straw nutrient returning in different ways of utilization

养分	秸秆还田/%	饲料/%	燃料/%
N	100	50	0
P ₂ O ₅	100	72	70
K ₂ O	100	77	70

注：燃料和焚烧合并计算。

2 结果与分析

2.1 中国秸秆养分资源分布

2.1.1 不同作物秸秆养分资源的状况

中国农作物秸秆种类繁多，主要作物秸秆就有近 20 种。2006 年中国秸秆及其养分资源分布见表 3，其中秸秆数量以水稻、小麦和玉米三大作物居多，占到秸秆总量的 77.2%，而其他秸秆资源数量只有 1/3 左右。秸秆养分分布方面，三大作物秸秆氮、磷、钾养分数量分别占到总量的 68.8%、74.0%、73.9%，总养分占到总量的 72.3%。其他作物秸秆中以油料作物秸秆居多，比例在 8.7%，其次是豆类、薯类、棉花和杂粮。

2.1.2 不同地区秸秆养分资源的分布

从不同地区秸秆及其养分资源分布来看（见表 4），秸秆及其养分资源分布各地区差异较大，其中主要集中在华东、东北、中南地区。2006 年秸秆和养分资源拥有量最高的前 3 个省分别是河南、山东、黑龙江，分别为 8 023、7 039、5 210 万 t，总养分量分别为 211、188、163 万 t。从数量上看，秸秆拥有量以 2 000~5 000 万 t 的省（市）居多，遍及中国的 13 个省（市）；秸秆养分资源拥有量以 50~150 万 t 的省（市）居多，占到 15 个省（市）。

表 3 2006 年中国不同作物秸秆及其养分资源数量
Table 3 Amount of crop straw and nutrient resources in China in 2006

秸秆种类	资源量		养分资源量							
	秸秆数量 /10 ⁸ t	所占比例 /%	N 数量 /10 ⁴ t	占总 N 比例 /%	P ₂ O ₅ 数量 /10 ⁴ t	占总 P ₂ O ₅ 比例/%	K ₂ O 数量 /10 ⁴ t	占总 K ₂ O 比例/%	总养分量 /10 ⁴ t	占总养分 比例/%
水稻	1.826	23.9	166.1	22.5	54.6	22.9	414.1	31.5	634.8	27.7
小麦	1.149	15.1	74.7	10.1	21.1	8.9	144.8	11.0	240.6	10.5
玉米	2.910	38.2	267.7	36.2	100.4	42.2	412.0	31.4	780.1	34.1
杂粮	0.158	2.1	13.0	1.8	4.9	2.1	28.1	2.1	46.0	2.0
高粱	0.034	0.4	4.2	0.6	1.2	0.5	5.8	0.4	11.1	0.5
谷子	0.028	0.4	2.3	0.3	0.6	0.3	5.8	0.4	8.7	0.4
其他杂粮	0.097	1.3	6.6	0.9	3.1	1.3	16.6	1.3	26.3	1.1
豆类	0.337	4.4	64.1	8.2	16.1	6.5	48.5	3.6	128.7	5.4
大豆	0.256	3.4	46.2	6.3	11.8	4.9	35.9	2.7	93.9	4.1
杂豆	0.081	1.1	17.9	2.4	4.3	1.8	12.6	1.0	34.8	1.5
薯类	0.272	3.6	68.4	9.3	17.5	7.4	114.8	8.7	200.7	8.8
马铃薯	0.074	1.0	19.7	2.7	4.6	1.9	35.3	2.7	59.7	2.6
其他	0.198	2.6	48.7	6.6	12.9	5.4	79.4	6.0	141.0	6.2
油料	0.663	8.7	79.6	10.8	21.6	9.1	126.4	9.6	227.6	9.9
花生	0.220	2.9	40.0	5.4	8.1	3.4	28.8	2.2	76.9	3.4
油菜	0.380	5.0	33.0	4.5	12.2	5.1	88.3	6.7	133.6	5.8
芝麻	0.020	0.3	2.6	0.4	0.3	0.1	1.2	0.1	4.1	0.2
胡麻	0.007	0.1	1.0	0.1	0.1	0	0.4	0	1.5	0.1
向日葵	0.036	0.5	3.0	0.4	0.9	0.4	7.7	0.6	11.5	0.5
棉花	0.202	2.7	25.1	3.4	7.0	2.9	24.8	1.9	56.8	2.5
麻类	0.015	0.2	2.0	0.3	0.2	0.1	1.5	0.1	3.7	0.2
黄红麻	0.002	0	0.2	0	0	0	0.1	0	0.3	0
苧麻	0.005	0.1	0.6	0.1	0.1	0	0.5	0	1.2	0.1
大麻	0.001	0	0.2	0.0	0	0	0.1	0	0.3	0
亚麻	0.007	0.1	0.9	0.1	0.1	0	0.7	0.1	1.7	0.1
糖料	0.110	1.4	11.0	0.8	4.2	2.9	20.1	3.3	35.3	2.5
甘蔗	0.100	1.3	11.0	1.5	3.2	1.4	13.2	1.0	27.4	1.2
甜菜	0.011	0.1	0	0	1.0	0.4	6.9	0.5	7.9	0.3
烟草	0.029	0.4	4.2	0.6	1.1	0.5	6.5	0.5	11.8	0.5
总计	7.620	100	776	100	249	100	1 342	100	2 366	100

表 4 2006 年中国不同地区秸秆养分资源分布
Table 4 Distribution of straw nutrient resources in different regions of China in 2006

区域	省/市	资源量		养分资源量			总养分 /10 ⁴ t	排名
		秸秆产量/10 ⁸ t	所占比例/%	N/10 ⁴ t	P ₂ O ₅ /10 ⁴ t	K ₂ O/10 ⁴ t		
华北	北京	0.02	0.3	1.8	0.6	2.7	5.1	29
	河北	0.46	6.1	42.9	13.5	67.1	123.5	6
	内蒙	0.32	4.2	33.7	10.7	50.2	94.7	11
	山西	0.19	2.5	18.0	5.9	28.2	52.1	19
	天津	0.03	0.3	2.4	0.8	3.7	6.9	27
总 计		1.01	13.3	98.8	31.5	151.9	282.3	V
东北	黑龙江	0.52	6.8	58.3	17.8	86.7	162.9	3
	吉林	0.49	6.5	48.7	16.5	75.6	140.8	4
	辽宁	0.30	3.9	29.0	9.9	47.8	86.7	13
总 计		1.32	17.2	136	44.2	210.2	390.4	III
华东	安徽	0.40	5.2	39.1	11.1	68.7	118.8	8
	福建	0.08	1.0	9.6	2.7	19.1	31.4	24
	江苏	0.40	5.2	37.2	10.9	71.6	119.8	7
	江西	0.21	2.7	20.4	6.1	45.7	72.2	15
	山东	0.70	9.2	66.0	20.1	101.7	187.8	2
	上海	0.01	0.2	1.2	0.4	2.7	4.3	30
	浙江	0.11	1.4	11.2	3.3	22.6	37.1	23
总 计		1.90	24.9	184.7	54.7	332	571.4	II

接上页

区域	省/市	资源量		养分资源量			总养分 /10 ⁴ t	排名
		秸秆产量/10 ⁸ t	所占比例/%	N/10 ⁴ t	P ₂ O ₅ /10 ⁴ t	K ₂ O/10 ⁴ t		
中南	广东	0.17	2.3	18.5	5.9	41.5	66.0	16
	广西	0.24	3.2	21.6	9.2	60.5	91.2	12
	海南	0.02	0.3	2.6	0.9	6.4	9.9	26
	河南	0.80	10.5	72.8	21.4	116.9	211.1	1
	湖北	0.32	4.2	33.4	9.5	61.0	103.9	10
	湖南	0.33	4.3	34.3	10.1	70.4	114.7	9
	总 计	1.89	24.7	183.2	57.0	356.7	596.9	I
西南	贵州	0.17	2.2	19.1	5.7	32.7	57.5	18
	四川	0.39	5.2	43.4	12.6	77.3	133.3	5
	西藏	0.01	0.2	1.1	0.4	2.3	3.9	31
	云南	0.24	3.1	25.0	8.4	48.9	82.3	14
	重庆	0.12	1.6	14.2	4.2	24.9	43.3	21
	总 计	0.93	12.2	102.8	31.3	186.1	320.2	IV
西北	甘肃	0.12	1.6	13.8	4.1	21.9	39.7	22
	宁夏	0.05	0.7	5.1	1.5	8.4	15.0	25
	青海	0.02	0.2	1.9	0.5	2.8	5.2	28
	陕西	0.17	2.2	16.6	5.1	26.3	48.0	20
	新疆	0.21	2.8	21.2	6.5	30.8	58.5	17
	总 计	0.58	7.5	58.6	17.8	90.1	166.5	VI

2.2 秸秆资源利用状况

2.2.1 不同作物秸秆资源利用

中国作物秸秆利用中，主要以秸秆还田、饲料和燃烧为主，结合表 2 中秸秆不同利用方式下秸秆养分还田比例的结果，由表 5 可以看出，2006 年中国秸秆利用中，三者分别占到 24.3%、29.9%和 35.3%，各种秸秆利用方式下氮、磷、钾养分的还田率分别为 39.3%、70.5%、72.0%，养分还田量分别达到 304.6 万 t、175.6 万 t、966.7 万 t。三大作物秸秆中，作肥料比例大小依次为小麦、水稻、玉米，小麦秸秆还田率达到 43.8%，氮、磷、钾养分还田率分别为 52.2%、73.3%、74.1%。经济作物中，豆类秸

秆主要作肥料，薯类秸秆主要饲料，油料秸秆主要用来燃烧，三者分别占各自利用比例的 45.9%、55.9%、47.7%。由于棉花秸秆木质化程度较高，主要用来燃烧，比例较高达到 73.7%。

2.2.2 不同地区秸秆资源利用

从不同地区来看（表 6），各地区的秸秆利用情况差异较大，其中东北和华东地区秸秆主要用作燃料，比例接近 50%；华北和中南地区秸秆主要用作肥料，占 46.9%。西北地区秸秆主要用作饲料，占到该地区秸秆利用比例的 45%左右。西南地区秸秆还田、肥料和燃烧利用方式都在 25%~35%之间，其中以燃料居多。

表 5 2006 年中国不同作物秸秆利用及其养分资源还田状况
Table 5 Status of crop straw utilization and nutrient resources returning in China in 2006

作物	秸秆利用					养分还田					
						N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	还田/%	饲料/%	燃烧/%	其他/%	总计/%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%
水稻	29.9	23.8	39.1	7.2	100	69.4	41.8	40.6	74.4	313.0	75.6
小麦	43.8	16.8	24.8	14.6	100	39.0	52.2	15.5	73.3	107.3	74.1
玉米	26.4	27.6	36.8	9.2	100	107.6	40.2	72.3	72.0	302.5	73.4
豆类	45.9	13.3	26.8	14.1	100	33.7	52.6	12.0	74.2	36.3	74.9
薯类	18.7	55.9	6.6	18.7	100	31.9	46.7	11.1	63.6	76.2	66.4
油料	18.0	22.8	47.7	11.4	100	23.4	29.4	14.6	67.8	87.1	68.9
棉花	12.5	2.7	73.7	11.1	100	3.5	13.9	4.6	66.0	16.4	66.2
烟叶	5.1	7.0	85.0	2.8	100	0.4	8.6	0.8	69.6	4.5	70.0
甘蔗	0.0	15.0	50.0	35.0	100	0.8	7.5	1.5	45.8	6.1	46.6
加权平均	24.3	29.9	35.3	10.5	100	304.6	39.3	175.6	70.5	966.7	72.0

表 6 2006 年中国不同地区作物秸秆利用及其养分资源还田状况
Table 6 Status of crop straw utilization and nutrient resources returning in different regions of China in 2006

区域	秸秆利用					养分还田					
						N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	秸秆还田/%	饲料/%	燃烧/%	其他/%	总计/%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%	还田量 /10 ⁴ t	还田率 /%
华北	46.9	32	12.3	8.8	100	62.1	62.9	24.7	78.6	121.7	80.2
东北	20.3	26.8	46.6	6.3	100	45.8	33.7	31.9	72.2	154.6	73.6
华东	15.8	24.3	49.7	10.2	100	51.6	28.0	37.2	68.1	230.1	69.3
中南	47.9	12.3	28.9	11.0	100	99.0	54.1	43.9	77.0	276.8	77.6
西南	24.5	32.0	29.6	13.9	100	41.6	40.5	21.4	68.3	130.0	69.9
西北	12.0	44.4	28.2	15.4	100	20.0	34.2	11.3	63.7	59.4	65.9

3 讨 论

3.1 提高作物秸秆养分还田率的途径

作为有机肥资源，秸秆占中国有机资源总量比例在 12%~19% 之间^[4,22,27]，其氮、磷、钾等养分资源占有有机养分资源的 25%~35%^[28]。秸秆还田作肥料不但可以替代一部分化肥，同时可以提高农田养分的循环利用效率。近年来，由于政策的引导以及农业补贴力度的加大，有力地促进了秸秆还田技术的应用以及秸秆还田机械的推广，并且配合秸秆禁烧和综合利用取得了明显的成效，秸秆还田水平有了很大的提高（见表 7）。2006 年中国秸秆还田比例接近 25%，较 20 世纪 90 年代增加近 10 个百分点。不同利用方式下氮、磷、钾养分还田量分别为 305 万 t、176 万 t、967 万 t，分别占到秸秆氮、磷、钾总养分的 39.3%、70.5%、72.0%，秸秆养分的还田潜力仍有很大空间。

表 7 中国秸秆资源利用历史变化
Table 7 Historical changes of straw resources utilization in China

年代	秸秆还田%	饲料%	燃烧%	原料%	其他%
20 世纪 90 年代 ^[17]	15.2	30.9	45	2.9	6
2006-2007 年*	24.3	29.9	35.3		10.6**

注：*本文研究数据，**表示两者之和的比例。

秸秆还田比例在增加，但是秸秆养分还田比例仍然不高。影响秸秆养分还田的因素主要存在以下两个方面：首先，秸秆过腹还田养分（畜禽粪尿养分）在逐年减少。随着中国规模化养殖的不断扩大，农牧分离，导致大量的粪尿资源不能被及时利用，不仅污染了环境，同时也浪费了大量的资源。经研究证明：中国畜禽规模化养殖下粪尿资源利用与农户散养下畜禽粪尿利用比例相比是较低的^[29-30]。其次，秸秆燃烧后灰分中存在的大量磷、钾养分大量被丢弃。秸秆是农村生活能源的主要组成部分，随着化石能源的比例在农村生活能源消费中的比重不断加大，秸秆焚烧严重，加上秸秆作生活能源燃烧后的灰分收集又比较困难。因此，大量的养分就被白白的浪费掉了。

3.2 秸秆饲用提高养分的吸收效率

随着人口增加和人民生活水平的提高，肉、蛋、奶在食物消费中所占的比例越来越大，中国将长期面对饲

料粮短缺的问题^[31]。但是，秸秆直接饲用的适口性和牲畜的采食性都较差，在消化道中停留时间长，消化利用率仅为 20%~30%^[32]。为了提高秸秆的采食率和消化率，近年来，中国秸秆饲料化主要采用秸秆氨化、青贮和微贮、颗粒饲料等技术^[19,33-34]，可以将秸秆中的粗蛋白含量提高到 0.71%、改善纤维素的组成，可以使消化速率提一倍^[35]。2000 年中国秸秆饲用量达到 1.98 亿 t^[36]，而 2006 年秸秆饲用达到 2.3 亿 t，主要贡献取决于秸秆的绝对量的增加，但是比例却没有显著的变化。

尽管新技术的应用，但是秸秆作为饲料资源在饲料组成中所占的比重还是比较小的，究其原因主要是秸秆在收集、运输以及贮藏过程中存在的一系列不便的因素，因此提高秸秆的饲用率以及养分的吸收效率需要各方面共同努力。

3.3 秸秆作燃料减少碳排放

秸秆的含碳量较高，其能源密度一般为 14.0~17.6 MJ/kg^[37]，长期以来在农村生活能源中占有重要地位。因此秸秆资源又被定义为生物质能源。在中国农村能源的消费比例中，秸秆资源从 1989 年的 34.8% 下降到 2005 年的 17.1%，下降了 13 个百分点之多^[38-39]，秸秆作能源比重下降导致大量的秸秆被焚烧，同时带来了环境污染和经济损失^[2,21]。秸秆燃烧的灰分没有全部的回田，造成大量的养分浪费，尤其是灰分中的钾，对弥补中国农田中化肥钾投入的不足有着深远的意义。

秸秆直接燃烧的效率比较低，只有 12%~15%，近年来发展了开发秸秆能源的新技术：其中包括秸秆气化、成型燃料等技术，秸秆燃烧热值分别比直接燃烧提高 2 倍^[40]和 3~4 倍^[41-42]，为提高秸秆的燃烧效率做出了很大的贡献。由于秸秆资源固定了大量的碳资源，秸秆的燃烧不会带来空气中 CO₂ 净增加，因此增加秸秆在农村能源中的消费比例，减少化石燃料的消费，对减轻我国碳的排放会起到很大的作用。

4 结 论

中国作物秸秆资源量巨大，2006 年超过 7.6 亿 t，其中蕴含的氮（N）、磷（P₂O₅）、钾（K₂O）养分资源数量分别达到 776 万 t、249 万 t、1 342 万 t，但还田养分分别只占秸秆资源养分量的 39.3%、70.5% 和 72.0%，可见秸秆还

田比例及其养分还田比例仍然有很大的提升空间。同时, 由于秸秆本身的特殊性, 通过饲用过腹还田、作为生物质能源也是可用的模式。因此, 优化管理秸秆资源、提高秸秆养分资源循环利用效率仍是中国农业可持续发展的重要方面。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31: 575—584.
- [2] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, 52(15): 1826—1831.
- [3] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4): 389—393. Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4): 389—393. (in Chinese with English abstract)
- [4] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [5] 闫丽珍, 成升魁, 闵庆文. 典型农区秸秆资源利用及其影响因素探析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 196—198. Yan Lizhen, Cheng Shengkui, Min Qingwen. Utilization of crop straws and its driving forces in typical rural areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 196—198. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘俊浩, 陈斌, 郝宝青. 信阳市秸秆资源综合利用现状及展望[J]. *黄河科技大学学报*, 2008, 10(2): 66—68. Liu Junhao, Chen Bin, Hao Baoqing. The present situation and forecast of comprehensive utilization of the straw resources of Xinyang City[J]. *Journal of Huanghe S&T University*, 2008, 10(2): 66—68. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王荣兴, 杨璞, 李勇. 吉林省秸秆资源综合开发利用现状与开发前景分析[J]. *现代农业*, 2007, (12): 63—64.
- [8] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆利用现状[J]. *华中农业学报*, 2002, 21(3): 242—247. Gao Xiangzhao, Ma Wenqi, Ma Changbao, et al. Analysis on the current of utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, 21(3): 242—247. (in Chinese with English abstract)
- [9] MOA/DOE Project Expert Team. Assessment of Biomass Resources Availability in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1998.
- [10] Johnson J M F, Allmaras R R, Reicosky D C. Estimating source carbon from crop residue, roots and rhizodeposits using the national grain-yield database[J]. *Agronomy*, 2006, 98(3): 622—636.
- [11] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 53—81.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 新中国五十年农业统计资料[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [13] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83—87. Zhang Fuchun, Zhu Zhihui. Harvest index for various crop in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83—87. (in Chinese with English abstract)
- [14] 潘晓华, 邓强辉. 作物收获指数的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2007, 29(1): 1—5. Pan Xiaohua, Deng Qianghui. Review on crop harvest index[J]. *Acta Agriculurae Universitatis Jiangxiensi*, 2007, 29(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张培栋, 杨艳丽, 李光全, 等. 中国农作物秸秆能源化潜力估算[J]. *可再生能源*, 2007, 25(60): 80—83. Zhang Peidong, Yang Yanli, Li Guangquan, et al. Energy potentiality of crop straw resources in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(60): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 9—18. Liu Gang, Shen Lei. Quantitive appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 9—18. (in Chinese with English abstract).
- [17] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 87—91. Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiaoyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)
- [18] 苑亚茹. 我国有机废弃物的时空分布及其利用现状[D]. 北京: 中国农业大学, 2008. Study on the Temporal and Spatial Distribution of Organic Wastes and the Utilization in Farmland in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008.
- [19] 田宜水, 孟海波. 农作物秸秆开发利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [20] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. *资源科学*, 2003, 25(4): 62—67. Zhong Huaping, Yue Yanzhen, Pan Jiangwen. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. *Resources Science*, 2003, 25(4): 62—67. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王丽, 李雪铭, 许妍. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济学损失研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 170—175. Wang Li, Li Xueming, Xu Yan. The economic losses caused by crop residues burnt in open field in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2): 170—175. (in Chinese with English abstract)
- [22] 包雪梅. 中国有机肥料资源与养分再循环研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002. Bao Xuemei. Resource Characteristic of Organic Fertilizer and Nutrients Recycling in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘更另, 金维续, 等. 中国有机肥料[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [24] 刘晓利, 许俊香, 王方浩, 等. 我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J]. *河北农业大学学报*, 2005, 28(5): 27—32. Liu Xiaoli, Xu Junxiang, Wang Fanghao, et al. The resource and distribution of nitrogen nutrient in animal excretion in China[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [25] 鲁如坤. 农田养分再循环研究—IV. 防止粪肥氮挥发的研究[J]. *土壤*, 1996, 28(1): 8—13.

- [26] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9—13.
Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Zheng Fangcheng, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. Resources Science, 2006, 28(1): 9—13. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006(1): 3—8.
Huang Hongxiang, Li Shutian, Li Xianglin, et al. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soils and Fertilizers, 2006(1): 3—8. (in Chinese with English abstract)
- [28] 包雪梅, 张福锁, 马文奇. 我国作物秸秆资源极其养分循环研究[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(增刊): 14—17.
- [29] 苏杨. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 15—18.
Su Yang. Research of countermeasures on waste treating of intensive livestock and poultry farms in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(2): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李远. 我国规模化畜禽养殖业存在的环境问题与防治对策[J]. 上海环境科学, 2002, 21(10): 597—599.
Li Yuan. Existing problems and prevention and control countermeasures of intensive livestock cultivation in China[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2002, 21(10): 597—599. (in Chinese with English abstract)
- [31] 毕于运, 王道龙, 高春雨, 等. 中国作物秸秆资源评价与利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [32] 郭旭生, 崔慰贤. 提高秸秆利用率和营养价值的研究进展[J]. 饲料工业, 2002, 23(11): 12—15.
- [33] Xianyang Zeng, Yitai Ma, Lirong Ma. Utilization of straw in biomass in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11: 976—987.
- [34] 曹稳根, 高贵珍, 方雪梅, 等. 我国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 宿州学院学报: 2007, 22(6): 110—112, 126.
- [35] Yang Zhongping, Guo Kangquan, Zhu Xinhua, et al. Straw resources utilizing industry and pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 27—31.
- [36] 吴树栋. 我国农作物秸秆综合利用现状[J]. 人造板通讯, 2005, 2(8): 1—4.
Wu Shudong. Present situation of comprehensive utilization of agricultural straws in China[J]. Wood-based Panels, 2005, 2(8): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [37] Li Junfeng, Hu Runqing, Song Yangqin, et al. Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China[J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 29: 167—177.
- [38] Zhongren Zhou, Wenliang Wu, Xiaohua Wang, et al. Analysis of changes in the structure of rural household energy consumption in northern China: A case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 1(13): 187—193.
- [39] Zhongren Zhou, Wenliang Wu, Qun Chen, et al. Study on sustainable development of rural household energy in northern China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 8(12): 2227—2239.
- [40] 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 中国农作物秸秆资源化利用的生态效应和技术选择分析[J]. 中国农学报, 2007, 23(10): 143—149.
Chen Dongdong, Gao Wangsheng, Chen Yuanquan. Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 143—149. (in Chinese with English abstract)
- [41] 马学良, 方宪法, 陈开化. 我国农作物秸秆高效利用技术现状与趋向[J]. 农业现代化研究, 1995, 16(6): 399—400.
- [42] 陈东水, 盖振东, 陈燕琴, 等. 秸秆利用现状及资源化利用方向[J]. 上海农业科技, 2006, (5): 32—33.

Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China

Gao Liwei^{1,2}, Ma Lin¹, Zhang Weifeng², Wang Fanghao², Ma Wenqi^{1*}, Zhang Fusuo²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;

2. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, SINOCHM-China Agricultural University Fertilizer Research and Development Center, Beijing, 100193, China)

Abstract: Based on agricultural statistics, investigating data of farmer and a number of data published in the literatures, the amount of crop straw and its nutrient resources were estimated in 2006, and the utilization situation of crop straw and its nutrient resources were analyzed in China. The results showed that there was more than 760 million tons crop straws in 2006, which included the amount of nitrogen, phosphorus (P_2O_5), potassium (K_2O) nutrient were 7.76 million tons, 2.49 million tons, 13.42 million tons, respectively. Four kinds of crop straw fate appeared as follow: returned to field (including straight returning and making compost), fuel (including straight burning, setting fire and biogas), fodder and others (including raw material of industry and throwing aside), and the percentage of that were 24.3%, 29.9%, 35.3% and 10.5% in 2006, respectively. The amount of crop straw nitrogen, phosphorus (P_2O_5), potassium (K_2O) nutrient returned to field were 3.05 million tons, 1.76 million tons, 9.67 million tons, respectively. And the rates of the straw nutrient returned to field were 39.3%, 70.5% and 72.0%, respectively. There were great potential of crop straw returned to field, and drastic measures would be needed to reverse the trend of straw burned.

Key words: crop straw, nutrients, nitrogen, phosphorus, potassium