植物营养与肥料学报 2017, 23(6): 1462–1479
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.17430
http://www.plantnutrifert.org

# 我国有机肥料资源及利用

牛新胜[1]，巨晓棠[2*]
（1 中国农业大学曲周实验站，河北曲周 057250；2 中国农业大学资源与环境学院，北京 100193）

**摘要:** 本文对近 30 多年来我国有机肥料资源与利用资料进行了统计概算，分析了我国有机肥料基础资源量估算结果不一致的原因。统计结果表明，当前我国有机肥料基础资源每年约 57 亿 t 实物量，其中畜禽粪尿约 38 亿 t (鲜)，人粪尿约 8 亿 t (鲜)，秸秆约 10 亿 t (风干)，绿肥约 1 亿 t (鲜)，饼肥约 0.2 亿 t (风干)。折合 N 约 3000 万 t、$P_2O_5$ 约 1300 万 t 和 $K_2O$ 约 3000 万 t，$N+P_2O_5+K_2O$ 养分总量约 7300 万 t。然而，我国有机肥料资源利用率较低，主要原因包括社会、经济、政策、技术及推广等多方面。有机肥料资源收集、贮存和加工过程中养分损失严重，不仅导致其利用率低，也成为农业源环境污染的根源。发展种养结合循环农业，加强有机肥料资源收集、加工和施用各个环节的技术开发和相关设施的标准化建设是目前解决其利用问题的关键。坚持政府补助的优惠鼓励政策，推行市场主体参与运行管理，建立有机肥料资源收集、加工和利用的完整产业与利益链条是有机肥料资源化高效利用的社会、经济和政策保障。

**关键词:** 有机肥料资源；有机肥料养分含量；有机肥料利用；粪尿资源；秸秆资源；绿肥；饼肥

# Organic fertilizer resources and utilization in China

NIU Xin-sheng[1], JU Xiao-tang[2*]
( *1 Quzhou Experimental Station, China Agricultural University, Quzhou, Hebei 057250, China;*
*2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China* )

**Abstract:** The literatures published mainly in recent 30 years were reviewed to estimate the basic organic fertilizer resources in China, and inquire into the reasons for the huge yearly discrepancies in the amount of organic fertilizer resources. From the statistics, about 5.7 billion tons (partly in fresh and partly in air dry) of organic resources stock will be produced annually nationwide at present, of which about 3.8 billion tons from animal manure (in fresh), 0.8 billion tons from human excreta (in fresh), one billion tons coming from crop straw (in air dry), 0.1 billion tons from green manure (in fresh) and 0.02 billion tons from cake manure (in air dry), which could provide about 73 million tons of total nutrients ($N+P_2O_5+K_2O$) with 30 million tons of N, 13 million tons of $P_2O_5$ and 30 million tons of $K_2O$ respectively. However, the huge organic resources were not fully used, the causes could be blamed on many factors including society, economy, policies, techniques and extension of technologies. The nutrient loss during collection, storage and processing of organic resources was thought one of key reasons for the low utilization of the resources and therefore the environmental pollution. The technique strategies should be concentrated on developing recycling agriculture, i.e combining the crop production with intensive breeding to create a whole benefit chain from the collection, procession to application of organic fertilizer resources. Government subsidies should be allocated to the construction of standardized facilities required for the above strategies.

**Key words:** organic fertilizer resources; nutrient content of organic fertilizer; organic fertilizer utilization; excreta resource; straw resource; green manure; cake manure

**收稿日期：** 2017–11–09　　**接受日期：** 2017–11–22
**基金项目：** 公益性行业（农业）科研专项（201503106）；国家重大科学研究计划（2014CB953800）资助。
**作者简介：** 牛新胜（1971—），男，安徽濉溪人，博士，高级农艺师，主要从事农业资源与环境科学研究。E-mail：xinshengniu@163.com
* 通信作者 巨晓棠 (1965—)，男，陕西白水人，博士，教授，主要从事氮素循环与温室气体减排探究。E-mail：juxt@cau.edu.cn

我国是农业生产大国，有机肥料资源丰富。明确有机肥料资源量及其构成，对于充分利用有机肥提供的有机质和养分，降低对化肥的依赖，减少环境污染，发展生态循环农业，改善农业生产条件以及农村生活环境都有重要意义。1958 年，农业部在总结农村利用有机肥料经验的基础上，汇编出版了《肥料志》，记载了 96 个有机肥品种[1]。1994 年，农业部开展了一次全国 11 个省 (自治区) 的有机肥料资源调查，于 1999 年出版了《中国有机肥料资源》[2]、《中国有机肥料养分志》[3]以及《中国有机肥肥料养分数据集》[4]，首次系统地总结了我国有机肥料资源量、品种、品质、养分构成与含量以及利用途径，建立了我国有机肥资源数据库。2009 年，全国农业技术推广服务中心在全国 30 个省 (区、市) 以及新疆生产建设兵团开展了秸秆、绿肥、规模化养殖场畜禽粪便、商品有机肥、农家肥 5 类有机肥资源及利用情况调研。2009 年，中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、环境保护部南京环境科学研究所联合编制了《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》[5]，首次对不同规模养殖场，分区域、分畜禽饲养阶段核算了畜禽产排污系数，为合理地估算其资源量和污染物排放量提供了参数。这些工作系统、全面，为明确一定时期我国有机肥料的品质、数量以及利用情况，实现有机肥料投入定量化及其利用提供了重要参考依据，对于推动我国有机肥料资源的利用具有重要意义。尽管如此，我国有机肥料资源的产生，无论从其品质、数量，还是其养分含量，实际上是一个随着生产方式改变而不断变化的动态过程，这些数据的时效性略显滞后，因而需要从有机肥料资源、养分含量以及利用等方面及时总结，为进一步推动数据库更新和完善提供依据。

本文通过文献总结，研究分析：1) 我国有机肥料资源估算量产生差异的原因；2) 目前我国有机肥料实物量及养分资源量；3) 有机肥料养分在贮存和加工过程中的损失；4) 有机肥料资源利用现状及所面临的技术、经济、政策和社会问题；5) 提出了提高有机肥料资源的回田利用率、降低农业面源污染的途径。

## 1　材料与方法

本文利用 Web of Science、中国知网 (CNKI) 中文期刊数据库、维普中文科技期刊数据库、万方数据库等对“有机肥料资源”、“有机肥”、“养分资源”、“畜禽粪尿”、“畜禽粪便”、“人粪尿”、“粪尿资源”、“排泄系数”、“秸秆资源”、“作物秸秆”、“秸秆”、“草谷比”、“收获系数”、“秸秆系数”、“绿肥”、“饼肥”、“有机废弃物”、“畜禽污染物”、“生物质资源”、“有机肥利用”关键词进行检索，并筛选出有关全国有机肥料资源的文献。同时利用《农业技术经济手册》、全国农技推广服务中心编著的《中国有机肥资源》、《中国有机肥料养分志》和《中国有机肥料养分数据集》，以及有关有机肥料资源的书籍、会议论文报告以及电子报道等，对我国 1978～2013 年间全国有机肥料资源估算的相关资料进行总结分析。对于文献中数据用图表达的，我们利用 OriginPro 9.0 软件进行处理得到估算值。对资源量分析所采用的数据，文献中必须有估算过程。

有机肥料来源复杂，为了科学统计，避免各种资源交叉重复计算，全国农技推广服务中心[2]将我国有机肥料资源划分为基础资源 (主要包括粪尿类、秸秆类、饼肥、绿肥)，派生资源 (厩肥、堆沤肥、沼气肥、草木灰) 和可利用资源三大类。派生资源和可利用资源主要来自基础资源。本文只总结分析基础资源，即粪尿类、秸秆类、绿肥和饼肥。

本文不采用基于作物产量、人口和畜禽数量以及草谷比、粪尿排泄系数的方法，而是在概括总结前人估算量的变化趋势基础上，以最新估算值为基点，估算目前有机肥料资源量，即“最新估算值+变化趋势”。具体做法：1) 针对某一基础资源，采用最新的、最为合理的估算方法所报道的“最新估算值”，作为估算目前资源量的基数；2) 作为基数的“最新估算值”的文献须提供详细的估算过程；3) 总结分析文献报道该资源量增长趋势，结合作物产量、人口和动物养殖数量变化分析趋势，估算目前秸秆、粪尿养分资源量。绿肥和饼肥养分资源量基本稳定，取最新报道的平均值为目前估算。

因为文献采用的秸秆系数（草谷比）以及粪尿排泄系数的观测方法均无叙述，单位无法统一，所以本文所收集的文献的秸秆系数和粪尿排泄系数均为文献的原数据和单位，便于读者了解。本文对文献资源量的估算值均保留到小数点后一位，有机肥料资源实物量和养分资源量数值均为整数。

为了讨论分析我国有机肥料资源估算误差来源，本文总结了文献中所使用的各种参数 (表 1，表 2)。

**表 1 文献中采用的农作物草谷比**

**Table 1 Straw/grain ratio of crop used in literatures**

| 作物 Crop | 草谷比 Straw/grain ratio | 作物 Crop | 草谷比 Straw/grain ratio |
|---|---|---|---|
| 水稻 Rice | 0.68[6],0.9[2, 7, 8–9, 10#, 11–14],0.95[3, 15], 0.97[16],1.0[1, 18, 19, 20, 21, 22, 23–26],1.0 ± 0.1[27],1.1[28],1.323[29] | 燕麦 Oat | 1.6[3], 1.94[22] |
| 稻壳 Rice hull | 73.0Д[9, 11] | 油料 Oil plants | 2.0[23–26] |
| 双季早稻 Double-cropping early rice | 1.264[29] | 油菜 Canola | 1.01[6], 1.5[2–3, 7–11, 14], 2[15, 19, 26], 2.7 ± 0.4[27], 2.87[18, 30], 2.985[29], 3[12–13, 16, 21, 23, 28] |
| 双季晚稻 Double-cropping late rice | 1.425[29] | 花生 Peanut | 0.8[3, 7–11, 14], 1[23], 1.14[18, 30]；1.3 ± 0.4[27], 1.348[29], 1.5[21]；1.52[12–13, 16], 2.0[17, 19, 24–26, 28] |
| 一季中稻 Single-cropping medium rice | 1.314[29] | 花生壳 Peanut shell | 31.3[8–9]€ |
| 小麦 Wheat | 0.73[6], 1[17, 19, 26], 1.03[12–13, 16], 1.1[2, 3, 7, 8–9, 21, 10, 11, 14, 23, 28], 1.17 [18, 22], 1.28[15], 1.4[24–25, 28], 1.4 ± 0.3[27], 1.718[29] | 向日葵 Sunflower | 0.6[12], 2.0[17, 21, 23, 26], 2.2[3]；2.217[29], 2.6 ± 0.7[27], 2.63[30], 3[8–10, 28] |
| 冬小麦 Winter wheat | 1.770[29] | 芝麻 Sesame | 0.64[12–13, 16], 2[17, 21], 2.01[13, 30], 2.2[7–11, 14], 3.0[23, 28], 3.0 ± 1.3[27], 5.882[29] |
| 春小麦 Spring wheat | 1.582[29] | 胡麻 Benne | 1.808[29], 2[17, 21, 23, 28], 2.4[8–9] |
| 大麦 Barley | 1.563[29], 1.6[3, 22, 10], 1.04[22] | 其他油料 Other oil plants | 2[15, 18, 25–26] |
| 玉米 Maize | 1.04[18, 22], 1.1 ± 0.2[27], 1.2[2, 3, 7, 8–9, 10, 11, 14], 1.25[15, 6], 1.269[29], 1.37[12–13, 16], 2.0[17, 19, 21, 23–26, 28] | 棉花 Cotton | 1.613[29], 2.91[30], 3.0[12–13, 15, 16–19, 21, 23–26, 28], 3.1 ± 1.5[27]；3.4[8–9, 11], 5.51[6], 9.2[8–11]ϱ |
| 玉米芯 Maize cob | 0.25[8–9]※ | 糖类 Sugar crop | 0.1[24–25], 1.0[7, 14] |
| 春玉米 Spring maize | 1.252[29] | 甘蔗 Sugarcane | 0.06[8–9]ф, 0.1[15, 21, 23, 26, 28], 0.24[8–9]Ж, 0.25[12, 16], 0.3[10, 18], 0.43[18, 30], 1[17], 2.0[8–9, 11]Ю |
| 夏玉米 Summer maize | 1.311[29] | 甜菜 Beet | 0.1[8–9, 15, 21, 23, 26, 28], 0.18[10], 0.43[18, 30], 1.0[19] |
| 高粱 Sorghum | 1[17, 25], 1.592[29], 1.6[3, 8–9, 10], 1.8 ± 0.2[27], 2[21, 23, 28] | 烟草* Tobacco* | 0.5[19], 0.71[18, 30], 1.0[23], 1.508[29], 1.6[8–11], 2.0[17]& |
| 谷子 Millet | 1[35], 1.4 ± 0.3[27], 1.5[21], 1.6[3, 8–9, 10, 23], 1.616[29], 2[28] | 甘薯 Sweet potato | 0.45[30], 0.5[3]。 |
| 其他谷物 Other grains | 1.5[26, 28], 1.5 ± 0.4[27], 1.6[8–9, 18, 21, 10, 23] | 木薯 Cassava | 0.57[30] |
| 其他杂粮 Coarse cereals | 1[24–25], 1.50[15], 1.6[7, 8–9, 11, 14] | 薯类 Tuber crops | 0.5[7–11, 14, 15, 23–25], 0.57[18], 0.61[12–13, 16], 0.8 ± 0.4[27], 1.0[17, 19, 21, 26], 1.2[28] |
| 大豆 Soybean | 1.295[29], 1.4 ± 0.3[27], 1.5[30], 1.6[2–3, 7, 8–9, 10–11, 14, 23] | 马铃薯藤 Potato vine | 0.5[3], 0.71[30] |
| 豆类 Beans | 1.5[15, 17, 24–26], 1.6[2–3, 18, 23], 1.7[21], 1.71[12–13, 16], 2[28] | 瓜类 Melons | 0.1[10] |
| 杂豆 Mixed beans | 1.6[3, 23], 2.0[8–9] | 蔬菜 Vegetables | 0.10$[8–9], 0.10[10] |
| 绿豆 Mung bean | 1.5[19], 1.6[2, 3], 2.0[8–9] | 麻类 Bast fibre crops | 0.78[10], 1.0[19, 24–25], 1.7[12–13, 15, 18, 21, 23], 2.0 ± 0.2[27] |
| 蚕豆 Broad bean | 1.277[29], 1.5[19], 1.6[2–3], 2.0[8–9] | 黄红麻 Jute/kenaf | 1.9[8–9, 11]； |
| 豌豆 Pea | 1.067[29], 1.5[19], 1.6[2–3], 2.0[8–9] | 苎麻 Ramie | 1.5[8–9] |
| 荞麦 Buckwheat | 1.6[3] | 大麻 Hemp | 3.0[8–9, 11]] |
| 青稞 Highland barley | 1.493[29], 4.88[22] | 亚麻 Linum | 4.0¶[8–9], 0.78[8–9]¤ |
| 莜麦 Hulless oat | 2.364[29] | | |

注（Note）：#—风干基；Д—平均出米率；※—玉米芯产量与玉米籽产量之比；€ —花生壳/花生果, 原作者实测；Æ—秸秆/皮棉；ψ—甜菜渣干物质与甜菜产量鲜重之比；Ж—蔗渣 (干) 产量/甘蔗 (鲜)；Ю—蔗渣产量与蔗糖产量之比；ф—甘蔗叶梢干物质产量与甘蔗产量鲜量比；*—秆/叶；&—作者根据[17]推算；$—蔬菜秸秆干量与蔬菜鲜产量之比值；¶—亚麻秆产量与亚麻籽产量之比；¤—亚麻副产品与主产品比。#—Air dried basis; Д—Average milled rice rate; ※—Maize cob/maize grain yield; €—Peanut shell/peanut, measured actually by the original author; Æ—Straw/lint cotton; ψ— Dry sugar beet pulp/sugar yield in fresh; Ж—Bagasse (dry)/ sugarcane (fresh); Ю—Bagasse yield/ yield of cane sugar; ф— Dry yield of blade tip/fresh yield of sugarcane; *—Stalk/leaves; &—Reckoned based on literate[17]; $—Dry stalk/fresh vegetable; ¶— Stalk/grain; ¤—Stalk/grain yield; ¤—By-product/main product.

**表 2　文献中采用的人或畜禽粪尿排泄系数**

**Table 2　Excretion coefficient for human and animals used in literatures**

| 人或动物 Human/animal | 粪 (kg/d) Excrement | 尿 (kg/d) Urine | 粪尿总量 Fecaluria | 生长周期 (d) Growth period |
|---|---|---|---|---|
| 猪 Pig | 1.12 [31]£, 2[10, 31–33], 4.25 [34], 6 [17, 19] | 1.95[31], 3[10], 3.3[32–33], 5.00[34], 15 [17, 19] | 5.3 kg/d[35], 3419.0 kg/a[7, 36], 2280 kg/8 months[2] | 198.49 [10], 199[35, 31£-34, 37£–38], 244[39] |
| 存栏猪 Pig stock | | | 1460 kg/a[15] | |
| 肉猪 Fattening pig | | | 1054.7 kg/a[15] | |
| 母猪 Sow | 2.45[31] | 5.21[31] | 3419 kg/a[2] | 365[39, 31] |
| 大牲畜 Large animal | | | | 365[39] |
| 牛 Cattle | 18[10], 20[32–33], 34[17, 19] | 9[10], 10[32–33], 34[17, 19] | 8703 kg/a[2, 7] | 133.5[10], 365[31–33, 35, 38] |
| 肉牛 Beef cattle | 13.63[31], 24.44[34] | 9.06[31], 10.55[34] | 7700 kg/a[35, 15], 15500.0 kg/a[36] | 365[31, 34, 37] |
| 奶牛 Cow | 24.82[31], 30.00[34] | 11.10[34], 12.34[31] | 19400 kg/a[15], 21900 kg/a[36], 19.4 t/a[35] | 365[31, 34–35, 37] |
| 役用牛 Draft cattle# | 26.67[31], 24.44[34]; | 10.55[34], 18.00[31] | 10.1 t/a[35] | 365[31, 34–35, 37] |
| 黄牛 Cattle | 24.44[34] | 10.55[34] | 8703.0 kg/a[36], 10100 kg/a[15, 35] | 365[31, 34–35, 37] |
| 水牛 Buffalo | 24.44[34] | 10.55[34] | 10100 kg/a[15, 35], 8703.0 kg/a[36] | 365[31, 34–35, 37] |
| 羊 Sheep/goat | 1.5[17, 19, 10], 2.38 [31], 2.6 [32, 34] | 0.5[10], 1.0[34], 2[17, 19] | 0.87 kg/d[37]£, 632.0 kg/a[2, 7, 36], 870 kg/a [15, 35] | 243.05[10], 365[31–35, 37–38] |
| 马 Horse | 9.00[34], 10[10, 17, 19], 16.16 [31] | 2.88[31], 4.9[34], 5 [10], 15 [17, 19] | 5900 kg/a[35], 5237.0 kg/a [2, 7, 36], 5.9 kg/d[37] | 76.57[10], 365[31, 34, 35–37–38] |
| 驴 Donkey | 4.8[34], 10[10], 13.7[31] | 2.88[31, 34], 5 [10] | 5.0 kg/d[37], 3092.0 kg/a [2, 7, 36], 5000 kg/a [15, 35] | 99.95[10], 365[31, 34, 35–37–38] |
| 骡 Maultier | 4.8[34], 10[10], 13.7[31] | 2.88[31, 34], 5[10] | 5.0 kg/d[37], 3092.0 kg/a[2, 7, 15, 35–36] | 63.68[10], 365 [31, 34–35, 37–38] |
| 肉禽 Meat poultry | | | | 183[39] |
| 存栏家禽 Poultry stock | | | 53.5 kg/a[15] | 183[39] |
| 出栏家禽 Poultry slaughtered | | | 5.5 kg/a[15] | 183[39] |
| 禽 Poultry | | | 0.13 kg/d[10] | 210[10, 37] |
| 蛋禽 Egg poultry | | | | 183[39] |
| 蛋鸡 Layer | | | 0.11 kg/d[31], 53.3 kg/a [35], 0.15kg/d[34], 60.0 kg/a [36] | 365 [31, 34, 37–38] |
| 鸡 Chicken | | | 0.071 kg/d[2], 26 kg/a[7]; 0.1 kg/d[17, 19], 0.12 kg/d[32–33] | 183[39], 210[31–33], |
| 肉鸡 Broiler | | | 4.5 kg/a[36], 0.10 kg/d [35–34], 0.14 kg/d[31] | 55[31, 34–35], 210[37–38] |
| 鸭 Duck | | | 24.0 kg/a[36], 39.0 kg/a [35], 0.11 kg/d[31], 0.12 kg/d[34], 0.13 kg/d[32–33], 48 kg/a[7], 0.132 kg/d[2] | 210[31–35, 37–38], 183[39] |
| 鹅 Goose | | | 35.5 kg/a[36], 39.0 kg/a [35], 0.12 kg/d [31, 34], 0.194 kg/d[2], 71 kg/d[7] | 183[39], 210[31, 34–35, 37–38] |
| 鸽 Pigeon | | | 2~3 kg/d[2] | |
| 兔 Rabbit | | | 29 kg/6months[2], 0.08 kg/d[10], 0.11 kg/d[31], 41.4 kg/a[35], 0.2 kg/d[34], 0.15 kg/d[37], 58 kg/a[7], 0.159 kg/d[2], | 90[31, 35, 37–38], 140[34], 179.64[10], 183[39] |
| 存栏兔 Rabbit stock | | | 41.4 kg/a[15] | |
| 出栏兔 Rabbit slaughtered | | | 8.3 kg/a[15] | |
| 人 Human | 113.7 kg/a[2, 39], 182.5 kg/a[17, 19], 0.5 kg/d[15] | 579.3 kg/a [2, 39], 365 kg/a [17, 19], 1.0 kg/d[15] | 693 kg/a [2, 7] | |

注（Note）：#—包括黄牛和水牛Including cattle and buffalo; £—[31]和[37]文献中分动物生长发育阶段和全国不同养殖分区排泄的平均值 Average excreta (excrement and urine) based on different breeding districts over the nation and on different growth stages of animals in literature [31] and [37].

## 2 结果与讨论

### 2.1 我国有机肥料资源量及养分量

2.1.1 粪尿资源量及养分量 粪尿类在我国有机肥料基础资源中占有最高比重。据前人统计结果，1994 年，人、畜粪尿实物量约占基础资源总量的 79%[2]，2005 年约 88%[39]，2008 年约 81%[10]。所以，粪尿在我国有机肥料资源总量中约占 80%。1994 年人粪尿占粪尿类资源总量约 21%[2]，2005 年约 17%[39]，表明随着时间的推移，人粪尿所占的比例降低，这是因为畜禽养殖量不断增加[40, 27]，而人口数量逐渐趋于稳定所致。关于人粪尿资源量的估算，有些只包含了农村人口[17, 15]，有的还剔除了进城打工人口的排泄量[15]，有的只估算了 15 岁以上人口的粪尿资源量[2]。张海成等[19]对粪尿资源折算为 80% 含水量鲜基，刘晓燕等[39]则估算了 2005 年全国所有人口的粪尿排泄量约为 7.9 亿 t (鲜)(表 3)。这些估值没有统一标准，显得很混乱，很难相互比较。考虑人口增加的因素，我国人口在 2005～2015 年间年均增长 5.13‰ (图 1)，目前我国人粪尿资源量应高于 7.9 亿 t，约为 8 亿 t。

1978 年以来，我国畜禽粪尿资源量呈不断增加趋势。据朱建春等[37]估算，1978 年至 2010 年，我国畜禽粪尿实物量年均增长约 4.2%。进入上世纪 80 年代，粪尿资源增速减缓。据包雪梅等[7]估算，从 1986 年到 2000 年，年均增速约为 2.8%；朱宁等[40]估算，1990～2010 年畜禽粪尿资源量年均增速约为 0.2%，表明我国畜禽粪尿资源增速放缓，总量逐渐趋于稳定，综合考虑估算时对水分含量的处理以及畜禽粪尿的增长因素，2005～2011 年，畜禽粪尿量年产约为 40 亿 t (鲜)(表 3)。最新公布的数据，2013 年[41]或目前[42–43]我国畜禽粪尿资源年产量约为 38 亿 t。根据 2017 年国家统计局资料[44]分析，作为粪尿主要贡献源的生猪[37, 39–40, 45]，自 2012 年至 2015 年年底存栏量逐年减少 (图 1)，2015 年比 2012 年减少 5.2%。据国家统计局 2017 年发布的公告[46]，2016 年肉类总产量 8540 万 t，比上年下降 1.0%，其中猪肉产量 5299 万 t，下降 3.4%。动物养殖数量下降，必然导致粪尿排放量减少。所以，目前畜禽粪尿资源量比 2005～2011 年平均年产量 40 亿 t 显著减少。综上，目前我国畜禽粪尿资源年产约 38 亿 t。综合人粪尿资源量，目前我国粪尿类资源实物量约为 46 亿 t (鲜)。

从粪尿养分资源量 (本文只考虑有估算过程的研究) 的报道看，1994～2010 年，我国粪尿氮磷钾总养分变幅为每年 3479.6 万 t～5084 万 t (表 3)，总趋势随时间递增而增加。从上面的分析可知，近来我国粪尿资源量增速减缓，养分资源量因而也随之减少，同时也考虑报道的估算过程，本研究仅以 2005 年[39]和 2008 年[10]估算为基数，确定目前我国粪尿养分资源量 ($N$-$P_2O_5$-$K_2O$) 约为 5000 万 t，其中 N 约 2100 万 t、$P_2O_5$ 约 1100 万 t、$K_2O$ 约 1800 万 t (表 3)。

2.1.2 秸秆资源量及养分量 在有机肥料资源估算中，秸秆资源估算最多 (表 3)，从 1949 年至 2011 年，每年的资源量都有报道，同一年份就有多达 10 份报道。我国秸秆资源量呈逐年增长的趋势，从 1949 年 (约 1.6 亿 t[28], 本文表 3 未列出) 到 2011 年 (约 7.4 亿 t[28])，年均增长约 6%。近 30 多年来，秸秆资源量增速下降，从 1990 年至 2005 年，秸秆年产量由约 $6.9 \times 10^8$ t 提高到 $8.4 \times 10^8$ t，年均增长 1.3%[8–9]。值得注意的是，近年来的估算中，秸秆资源量增加，除了秸秆产量自身增加因素外，还存在着由于秸秆资源估算范围增加而导致的秸秆资源量增加[8–9]。

2008 年以来，有研究者重新定义了秸秆的涵义，界定了范围，并重新核算了草谷比，首次把作物主产品加工过程产生的副产物计为秸秆资源的范围[8–9, 20]，使我国秸秆资源量大大增加。据估算，2007～2009 年我国大田作物秸秆副产物每年约 8862.0 万 t[54]。毕于运等[8]研究结果，2005 年我国农产品加工副产品占秸秆资源总量约 12.5%；据谢光辉等[20]估算，2006～2007 年，我国农作物加工副产物约占秸秆资源总量 (7.4 亿 t) 的 12.2%。这两者对我国作物加工副产物总量的估算比较接近，也表明了这些副产物在秸秆总资源中所占比重比较稳定。如果把加工副产品计为秸秆资源，2005 年我国秸秆资源量约为 8.4 亿 t[8–9]。另据报道，2009 年，我国秸秆资源量约为 8.99 亿 t[19]，农业部科技教育司报道约为 8.2 亿 t[55]，两者相差 0.79 亿 t。2005 年以来，我国农作物产量一直处于增长趋势，粮食产量年均增加 2.84%，显然秸秆资源量也会随之增长。据农业部最新报道 (无估算过程)，2015 年我国秸秆资源总量已经达到 10.4 亿 t[41]，所以，目前我国年产秸秆约 10 亿 t (风干)。

文献对秸秆资源养分量的估算差异也较大。首先与秸秆资源实物量估算差异有关，前面分析因估算秸秆资源范围小而低估我国秸秆资源量。其次与

养分系数差异有关。综合考虑各种估算因素，笔者总结出，2005 年以来，我国秸秆 $N+P_2O_5+K_2O$ 总养分资源量年平均 2028 万 t (1634 万 t～2367 万 t)(表 4)。我国秸秆 $N+P_2O_5+K_2O$ 总养分年产 2000 万 t，其中

**表 3　我国人、畜禽粪尿资源量**

**Table 3　Amount of human wastes and animal manure resources in China**

| 年份 Year | 实物量 Material volume (× $10^8$ t) | | | 养分量 Nutrients amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总量 Total amount | 人粪尿 Human excrement | 畜禽粪尿 Manure | 总量 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 1978 | | | 10.4[37]Π | | | | |
| 1979 | | | 10.7[37]Π | | | | |
| 1980 | | | 14.9[37]Π, 6.90[47] | | | | |
| 1981 | | | 11.5[37]Π | | | | |
| 1982 | | | 11.7[37]Π | | | | |
| 1985 | | | 12.9[37]Π, 20.1[37]Π | | | | |
| 1986 | 23.7[7] | | | | | | |
| 1987 | 24.2[7] | | | | | | |
| 1988 | 25.3[7] | | | | | | |
| 1989 | 24.5[7] | | | | | | |
| 1990 | 25.8[7] | | 16.8[37]Π, 22.5[37]Π；14.2[47] | | | | |
| 1991 | 26.3[7] | | 17.3[37]Π | | | | |
| 1992 | 27.1[7] | | 18.0[37]Π | | | | |
| 1993 | 27.8[7] | 1.7[17] | 19.4[37]Π, 34.8[17] | | | | |
| 1994€ | 29.1[7], 31.5[2] | 6.5[2] | 21.5[37]Π, 25.0[2] | 3479.6 [2] | 1470[2] | 673.1[2] | 1336.5[2] |
| 1995 | 31.7[7] | | 18.8[37]Π, 22.7[40]Π | | | | |
| 1996 | 33.7[19][7] | | 20.3[37]Π | | | | |
| 1997 | 32.7[7] | | 22.3[37]Π | | | | |
| 1998 | 31.9[7] | | 23.3[37]Π | | | | |
| 1999 | 38.4Þ | 4.5[15] | 24.0[37]Π, 33.9[15] | | | | |
| 2000 | 33.0[7], 39.3Þ | 4.4[15] | 23.7[40]Π, 24.0[37]Π；34.9[15], 27.1[47] | 2865.0[7] | 1425.0[7] | 855.0[7] | 879.0[7] |
| 2001 | 39.9Þ | 4.4[15] | 23.4[37]Π, 35.6[15] | | | | |
| 2002 | 40.7Þ | 4.3[15] | 23.4[37]Π, 27.5[48], 36.5[15], 37.0[36] | | | | |
| 2003 | 42.1Þ | 4.1[15] | 23.7[37]Π, 31.9[35], 35.2[49], 38.1[15] | 4741.0[49]* | 1817.0[49]& | 963.0[49]& | 1962.0[49]& |
| 2004 | 43.7Þ | 4.0[15] | 23.7[37]Π, 39.3[21], 39.7[15] | | | | |
| 2005 | 46.3[39], 44.9Þ | 4.0[15], 7.9[39] | 22.8[40]Π, 23.8[37]Π, 30.6[47, 50], 38.3[39], 40.9[15] | 5084.0[39] | 2152.3[39] | 1074.8[39] | 1856.9[39] |
| 2006 | 45.2Þ | 4.0[15] | 23.0[37]Π, 41.2[15], 36.0[47, 51] | | | | |
| 2007 | | | 23.1[37]Π | | | | |
| 2008 | 40.2[10] | | 23.6[37]Π, 7.8¶[52] | 4898.4[10] | 2101.4[10] | 1120.7[10] | 1676.3[10] |
| 2009 | 42.4[19] | 2.5[19] | 7.68[27]Б, 24.3[37]Π, 22.6[31], 32.6[34], 39.9[19], 27.7[47] | | 1290[27]* | 710[27]* | 1240[27]* |

续表 3 Table 3 continued

| 年份 Year | 实物量 Material volume (× $10^8$ t) | | | 养分量 Nutrients amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总量 Total amount | 人粪尿 Human excrement | 畜禽粪尿 Manure | 总量 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 2010 | | | 22.3[38], 24.5[37]Π, 23.0[40]Π, 28.2[47] | 3896* | 1400[53], 1642[47]* | 1020[53], 1218[47]* | 1200[53], 1036[47]* |
| 2011 | | | 21.4[40]Π, 24.5[37]Π | | | | |
| 目前¤ Present | | 8.0 | 38 | 5000 | 2100 | 1100 | 1800 |

注（Note）：Π—猪粪当量；Þ—根据文献[15]提供数据合计得到；Б—干物质量；¶—规模化养殖畜禽粪尿的资源量；¤—时间范围设为2005～2011年。考虑人粪尿估算范围更全面，人粪尿采用文献[39]估值，畜禽粪尿采用文献[15, 19, 39]估值的平均; €—该年份原养分估算为N, P和K资源量，这里换算为N、$P_2O_5$和$K_2O$的资源量; &—根据作者提供数据推算；*—仅为畜禽粪尿量，为养分总量；$—原文未明确是N, P和K资源量，还是N、$P_2O_5$和$K_2O$的资源量。Π-Pig fecal equivalent; Þ—Summation based on data from literature [15]; Б-Dry matter mass; ¶—Resources amount from large-scaled breeding farms; ¤—Temporal scale set from 2005 to 2011 and human excreta estimation in literature [39] adopted based on the consideration of resources' scope better full-scale. Mean value of estimation from literature[15, 19, 39] for animal excrement. €—Converting to an estimation for N, $P_2O_5$, $K_2O$ from one for N, P and K originally published; &—Calculating based on data provided by original literature; *—Estimation only for animal manure resorces; $—Whether the estimation is for N, P and K or for N, $P_2O_5$and $K_2O$ is not clear in original literature.

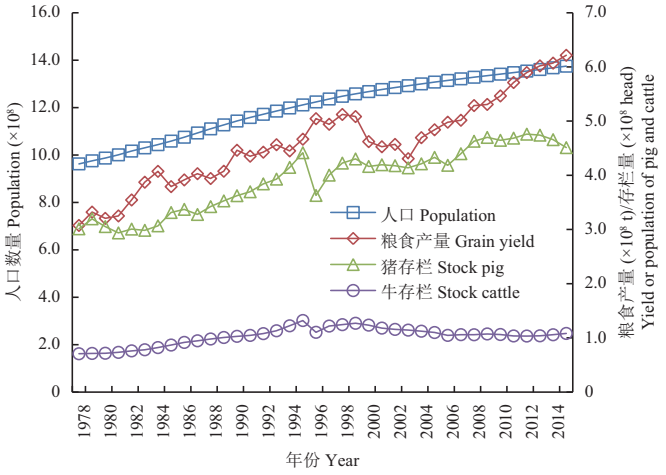


**图 1 我国人口数量、粮食产量和猪、牛存栏变化**

**Fig. 1 Change of population, grain yield, stock pig and stock cattle in China**

[注（Note）：图中 2008 年及以前数据来自中华人民共和国农业部编写的《新中国农业 60 年统计资料》(中国农业出版社，2009)，2008 年以后数据来自中华人民共和国国家统计局发布的"国家数据–年度数据–农业，http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01(EB/OL, 2017)"。The data before 2008 in the figure are from "Statistical data of 60 year's agriculture in China" compiled by the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (China Agriculture Press, 2009), and the data after 2008 from *National data-annual data-agriculture* issued by National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01(EB/OL, 2017).]

N 约 700 万 t，$P_2O_5$ 约 200 万 t 和 $K_2O$ 约 1000 万 t。实际上，由于秸秆资源实物量的增加，其养分量也必然随之增加，所以，我国秸秆养分资源量还应该高于上述估计，这里就采用上述估值作为秸秆养分资源量。

2.1.3 绿肥资源量及养分量 绿肥资源估算的报道较少，主要来自农业部农技推广服务中心的数据。从现有资料看，1992～2008 年，全国绿肥资源量 6612 万 t～34188(鲜基)。自 1994 年 (约 3.4 亿 t) 到目前 (2008 年，约 0.93 亿 t)，绿肥资源量呈减少趋势。自 2000 年以来，绿肥资源量基本稳定在约 1 亿 t 左右 (表 5)。综合考虑研究报道中调查与估算的结果，本文总结出，我国目前绿肥实物量约 1 亿 t (鲜)(表 5)，每年能够提供总养分 (N+$P_2O_5$+$K_2O$) 约 97 万 t，其中 N 约 45 万 t、$P_2O_5$ 约 11 万 t、$K_2O$ 约 41 万 t (表 5)。

2.1.4 饼肥资源量及养分量 同绿肥资源一样，饼肥资源估算的报道也较少，其报道大多也来自农业部农技推广服务中心。1994～2008 年，全国饼肥资源实物量约 0.2 亿 t～0.3 亿 t (风干)(表 6)，总的看来，实物量有增加的趋势。但是，据近十多年来的报

道，我国饼肥实物量基本稳定在 0.2 亿 t 左右，所以我们认为这是目前我国饼肥资源实物量，能够提供总养分 ($N+P_2O_5+K_2O$) 约 230 万 t，其中 N 约 150 万 t、$P_2O_5$ 约 40 万 t、$K_2O$ 约 40 万 t (表 6)。

2.1.5 有机肥资源总量及养分总量　根据以上 4 种有机肥料基础资源量的分析结果 (表 7)，目前我国有机肥料资源总量大约等于 57 亿 t，即 8 亿 t (人粪尿，鲜)+38 亿 t (畜禽粪尿，鲜)+10 亿 t (秸秆，风干)+1.0 亿 t (绿肥，鲜)+0.2 亿 t (饼肥，风干)。如果考虑生活垃圾以及其他有机废弃物，接近于总产量

**表 4　我国秸秆资源量**

**Table 4　Straw resources amount in China**

| 年份 Year | 实物量 Material volume ($10^8$t) | 养分量 Nutrients amount ($\times 10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 总养分 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 1978 | 3.0[18], 4.1[28] | | | | |
| 1979 | 4.7[28] | | | | |
| 1980 | 3.8[56], 4.3[18], 4.6[28] | | | | |
| 1981 | 3.9[56], 4.8[28] | | | | |
| 1982 | 4.3[56], 5.2[28] | | | | |
| 1983 | 4.6[56], 5.7[28] | | | | |
| 1984 | 4.9[56], 6.1[28] | | | | |
| 1985 | 4.6[56], 5.7[28] | | | | |
| 1986 | 4.8[56], 5.9[28] | | | | |
| 1987 | 4.9[56], 6.6[28] | | | | |
| 1988 | 4.8[56], 6.0[28] | | | | |
| 1989 | 4.9[56], 6.0[28] | | | | |
| 1990 | 5.0[18], 5.5[56], 6.8[28], 6.9[8] | | | | |
| 1991 | 5.5[56], 5.5[18], 6.2[24–25]；6.7[28], 7.3[8] | | | | |
| 1992 | 5.5[56], 5.6[18], 6.7[28], 7.0[8] | | | | |
| 1993 | 5.7[18], 5.7[56], 6.2[17], 6.9[28], 7.0[8] | | | | |
| 1994 | 5.6[56], 5.6[18], 6.9[28], 6.9[8] | 1345.3[2] | 430.0[2] | 130.6[2] | 784.8[2] |
| 1995 | 5.9[56], 5.9[18], 6.8[24–25], 7.3[28], 7.3[8] | | | | |
| 1996 | 6.3[56], 6.3[18], 7.4[28], 7.8[8] | | | | |
| 1997 | 6.2[56], 6.3[18], 7.5[28], 7.7[8] | | | | |
| 1998 | 6.4[18, 56], 8.0[28], 8.1[8] | | 632.0[14] | 201.0[14] | 1225.0[14] |
| 1999 | 5.2[13], 6.3[15], 6.3[56], 6.4[18], 6.4[12], 8.0[8, 28] | | | | |
| 2000 | 4.6[13], 5.5[57], 5.8[15], 5.9[56], 5.9[18], 6.1[58], 6.7[14], 6.8[24–25], 7.6[8] | 1633.0[57], 2098.0[14] | 493.9[57], 648.0[14] | 156.7[57] 205.0[14] | 982.5[57] 1245.0[14] |
| 2001 | 4.6[13], 5.7[15], 5.8[56], 5.9[18], 6.1[58], 6.8[25], 7.7[8] | | | | |
| 2002 | 4.7[13], 5.8[15], 6.0[56], 6.0[59], 6.0[18], 6.2[57], 6.9[25], 7.9[8] | | | | |
| 2003 | 4.4[13], 5.5[15], 5.6[56], 5.7[59], 5.7[18], 6.0[58], 6.0[49], 6.6[25], 7.6[8] | 914.0[60]&, 1578.0[49] | | | |
| 2004 | 4.9[13], 5.7[61], 6.0[15], 6.1[56], 6.2[18]；6.1[59], 7.2[24–25], 7.3[21], 8.2[8] | | | | |
| 2005 | 5.0[13], 6.2[15], 6.3[18, 59], 6.3[56], 6.4[39], 7.3[26], 7.5[24–25], 8.4[8–9] | 1948.0[39] | 649.2[39] | 208.1[39] | 1091.1[39] |
| 2006 | 4.3[6], 5.2[13], 6.4[15], 6.5[59], 6.5[18], 7.3[23] | 2367.0[23] | 776.0[23] | 249.0[23] | 1342.0[23] |
| 2007 | 5.3[13], 6.6[59], 6.6[18], 7.4[54] | | | | |

续表 4 Table 4 continued

| 年份 Year | 实物量 Material volume ($10^8$t) | 养分量 Nutrients amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 总养分 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 2008 | 5.6[13], 7.0[59], 7.4[54], 8.0[52], 8.1[10] | 2164.0[10] | 746.7[10] | 227.5[10] | 1189.8[10] |
| 2009 | 6.5[16], 7.0[18], 7.0[27]Б, 7.0[59], 7.4[54], 8.2[55], 9.0[19] | 2655.0[27], 1634.0[16] | 680.0[27], 600.8[16] | 481.0[27], 92.6[16] | 1494.4[27], 940.9[16] |
| 2010 | 7.1[59] | | | | |
| 2011 | 7.4[59] | | | | |
| 目前¤ Present | 8.0 | 1900 | 700 | 200 | 1000 |

注（Note）：П—猪粪当量；Þ—根据文献[15]提供数据合计得到；Б—干物质量；¶—规模化养殖畜禽粪尿的资源量；¤—时间范围设为2005～2011年。考虑最新合理秸秆资源范围的定义，本文采用文献[8–9, 19, 54–55]估值的平均；&—原文是氮、磷、钾总量；$-以2005～2009年资源考量目前量，剔除因为资源范围不足或养分换算系数不清的估算值，选择来自文献[10, 16, 23, 39]报道计算得到。П—Pig fecal equivalent; Þ-Summation based on data from literature [15]; Б—Dry matter mass; ¶—Resources amount from large-scaled breeding farms; ¤—Temporal scale set from 2005 to 2011 here. Mean value from the estimations in literature[8–9, 19, 54–55] based on the consideration of the newest and rational crop straw definition; &—The original values are for total amount based on N, P and K; $—Estimation through selecting literature [10, 16, 23, 39] getting rid of those estimations for irrational resource scope and unclear factors used, based on considering estimation in 2005-2009 as present resources.

**表 5 我国绿肥资源量**

**Table 5 Green manure resources amount in China**

| 年份 Year | 实物量 (× $10^8$ t) Material volume | 养分量 Nutrients amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 总量 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 1992 | 0.7[7] | 64.5[7] | 31.8[7] | 7.2[7] | 25.5[7] |
| 1994 | 3.4[2] | 320.7[2] | 172.7[2] | 19.0[2] | 129.0[2] |
| 2000 | 1.3[7] | 88.9[7] | 43.8[7] | 9.9[7] | 35.2[7] |
| 2002 | 1.0[62] | | | | |
| 2003 | 1.0[49] | | | | |
| 2008 | 0.9[10] | 105.4[10] | 46.7[10] | 11.7[10] | 47.0[10] |
| 目前¤ Present | 1.04 ± 0.1 | 97 ± 12 | 45 ± 2 | 11 ± 1 | 41 ± 8 |

注（Note）：¤—时间范围为2000～2010 年 The temporal scale here set as 2000–2010.

超过 60 亿 t (鲜)[63]。因此，目前我国有机肥料基础资源总量比 1994 年资源量[2, 64]增加约 43%。据前面对 4 种基础有机肥料养分资源量的总结，目前这些有机肥料资源可年均提供总养分 ($N+P_2O_5+K_2O$) 约 7300 万 t，其中 N 约 3000 万 t、$P_2O_5$ 约 1300 万 t 以及 $K_2O$ 约 3000 万 t，与刘晓燕等[39]和李书田等[10]的估算接近。其他报道的有机养分资源量实际上还包括了其他有机废弃物 (表 7)，如每年还有城市生活垃圾 2 亿 t，肉类加工厂废弃物 5000～6500 万 t[60]，可能会高于本文的统计结果。

## 2.2 我国有机肥料资源估算量差异的原因及改进建议

2.2.1 估算方法不一致 绿肥和饼肥资源是以单位面积绿肥产量或出饼率估算，相对简单，估算的差异不大，本文不做深入分析。秸秆资源量估算方法一般采用“作物产量 × 草谷比”，估算简单易行，可以大致估算出各种秸秆产量。受统计资料所录数据的限制，文献对我国畜禽粪尿资源量的估算目前主要有 3 种方法：1) 存栏量 × 日排泄系数 × 饲养周期[66]；2)(畜禽出栏量+年末存栏量) × 日排泄系数 × 饲养周期[67]；3) 出栏量或年末存栏量 × 日排泄系数 × 饲养周期[35, 39, 68]，还包括综合以上的其他估算方法。人粪尿资源量的估算有 2 种方法：1) 人口数量 × 每人一年粪尿排泄量[2]；2) 人口数量 × 每人日排泄量 × 365[17]。

通过对已有文献估算方法的分析，我们发现有机资源量的估算存在几方面的问题: 1) 统计资料中出

表 6　我国饼肥资源量

**Table 6　Cake manure resources amount in China**

| 年份 Year | 实物量 (× $10^8$ t) Material volume | 养分量 Nutrients amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 总量 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 1986 | | 158.4[7] | | | |
| 1988 | | 150.7[7] | | | |
| 1990 | | 161.4[7] | | | |
| 1992 | | 157.9[7] | | | |
| 1994 | 0.2[2] | 131.6[2], 219.9[7] | 103.4[2] | 10.2[2] | 18.0[2] |
| 1996 | | 211.7[7] | | | |
| 1998 | 0.3[7] | 233.6[7] | | | |
| 2000 | | 218.0[7] | 139.0[7] | 32.0[7] | 47.0[7] |
| 2002 | 0.2[62] | | | | |
| 2003 | 0.3[49] | | | | |
| 2008 | | 237.5[10] | 156.0[10] | 43.6[10] | 38.0[10] |
| 目前 Present | 0.2 ± 0.04 | 228 ± 14& | 148 ± 12& | 38 ± 8& | 43 ± 6& |

注（Note）：饼肥实物量估算时间范围以2000～2010年为参考 The temporal scale for cake manure estimation is set based on year 2000–2010; &—只考虑有计算过程的估算, 取文献[7]和[10]报道饼肥养分资源量的平均Mean value from the estimations of cake manure resources reported in literature [7] and [10]based on the consideration of the estimation with calculation process provided.

表 7　我国有机肥料资源总量

**Table 7　Total amount of organic fertilizer resources in China**

| 年份 Year | 实物量 (× $10^8$t) Material volume | 养分量 Nutrient amount (× $10^4$ t) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 总量 Total amount | N | $P_2O_5$ | $K_2O$ |
| 1994 | 40.0[2] | 8250.0[2] | 2896.0[2] | 1574.0[2] | 3780.0[2] |
| 2000 | >40.0[7] | 5564.0[7] | 2256.0[7] | 1102.0[7] | 2206.0[7] |
| 2002 | 48.8[49, 62] | 7000.0¶[62] | | | |
| 2003 | 41.3~43.4[60] | 8734.0¤[60] | | | |
| 2005 | >40.0[65] | 7032.0[39], 5316.0[65]¶ | 2802.0[39], 2176.0[65]¶ | 1283.0[39], 870.0[65]¶ | 2948.0[39], 2270.0[65]¶ |
| 2008 | 49.5[10] | 7405.0[10] | 3051.0[10] | 1404.0[10] | 2951.0[10] |
| 2009 | | 6127.0&[27] | 2010.0[27]& | 1237.0[27]& | 2880.0[27]& |
| 2012 | | >7000.0[63] | | | |
| 目前 Present | 57 | 7300 | 3000 | 1300 | 3000 |

注（Note）：¤—总有机废弃物 Sourced from total organic wastes;；¶—未明养分资源范围 Unclear scope of nutrients resources; &—养分资源量估算不包括人粪尿、饼肥、绿肥，但包括城市污泥和生活垃圾 Nutrients resources scope including from household fefuse and municipal sludge but not from human excrement, cake manure and green manure.

栏和存栏动物生长周期不明确。缺少详细区分动物类别的养殖数量以及相应的饲养周期数据，不同研究者采用不同的动物饲养量[47]，不论是用存栏量或出栏量估算，都因为无法确定确切的饲养周期而难以准确估算[15]。如，环保总局发布的估算方法会导致结果偏低，而刘培芳等采用的方法会使结果偏高[18, 67–69]。

2) 有机肥料资源干湿状态不明确。有机肥料资源的干湿状态不同，其质量差异很大，特别是粪尿类资源。通用估算方法里没有强调有机肥料资源的干湿状态，有的研究者以干物质估算，如贾伟[27]估算我国粪肥资源量为 14.64 亿 t (不含绿肥和饼肥)，明显低于其他估值。张无敌等[17]和张海成等[19]估算我国有机

废弃物产沼气潜力时则视秸秆为风干基、粪尿含水量 80% 计算，而大多数估算都是鲜基[35–36, 39]。3) 采用的人口基数不同造成的差异。对于人粪尿资源的估算，研究者根据自己的研究方向或角度估算的资源范围不同，有的研究只估算农村人粪尿的资源量，如全国农业技术推广中心[3]、张无敌等[17]和包雪梅等[7]，而李轶冰等[15]还剔除了进城农民人口。刘晓燕等[39]则估算了全国人粪尿资源量。4) 考虑的资源范围不一致。由于缺乏一些动物的统计数据，如使役动物和鹅鸭养殖数量不清楚，只能推算估计其数量[35, 69]。有的估算不包括某些动物粪尿资源，如 Sun 等[70]的估算不包括禽类。从 2008 年开始，有些研究者把蔬菜、药材加工副产物、玉米芯、稻糠等农产品加工副产物估算为秸秆资源，是我国秸秆资源潜力增加的原因之一[8–9, 20, 54]。林业木料剩余物 (木屑和刨片) 是堆肥的原料[71–72]，也是有机肥资源。林木修剪以及秋冬产生的柴薪和枝叶每年也是一个不小的资源量[21]，但是很少被估算为有机肥料资源。

2.2.2 估算参数不一致　有机肥料资源估算有两类参数，第一类参数用于估算有机资源实物量，如草谷比、粪尿排泄系数、出饼率等；第二类参数用于估算有机肥料养分含量，如氮磷钾等[47]。

1) 参数差异。作物品种、管理等对作物的草谷比影响很大，文献中引用草谷比差异较大 (表 1)。以蔬菜为例，目前所能查到的蔬菜草谷比参数是一个笼统值，没有详细到某种蔬菜，如辣椒、大白菜、菜花等，给估算带来困难，特别是估算某一个地区的资源量。同样，动物的排泄系数变化也较大，如猪粪的排泄系数为 1.12～6 kg/d，牛粪排泄系数的变化范围为 18～34 kg/d 或 7700～15500.0 kg/a (表 2)。这些参数的来源不明确，水分含量不一，参数测定时间不明，对农作物产量统计指标认识不清，会导致估算结果的显著差异[9]。研究者对不同时期的资源量估算采用同一参数值，也会导致偏差。2) 参数陈旧过时。很多文献中所采用的参数陈旧过时，如秸秆资源量所使用的许多参数都来自 30 多年前出版《农业技术手册 (修订本)》[9]，有些来自张福春等[29]的作物经济系数。许多估算所采用的草谷比都是我国 30 多年以前调查的数据。草谷比实际上受地区、品种、产量水平以及种植模式等影响[9, 73]。我国种植业从品种、栽培技术到管理水平等都发生了较大的变化[47]，用这种数据估算当前的秸秆资源量也会带来偏差。虽然不少研究对秸秆草谷比做了重新核算[22, 27, 30]，但是一直不能明确地区之间的差异。出饼率、绿肥产量也一直沿用全国农业技术推广服务中心 1993 年的调研数据[7, 10]。总之，草谷比取值不当导致中国秸秆产量存在较大差异[8–9]。虽然每年有大量粪尿类养分资源的文章发表，但所使用的养分参数基本都来自 1994 年的数据[47]。董红敏等[74]首次提出了畜禽养殖业产污系数分区、分饲养阶段的估算方法。2009 年环保部和中国农科院[5]发布了最新的畜禽产排污核算系数，估算方法和参数都有了比较合理的依据。

2.2.3 改进有机肥料资源量估算的建议

1) 估算方法的统一。鉴于目前各种报道估值不一，比较混乱，需要统一估算方法。首先是粪尿类的估算方法，畜禽粪尿的估算方法建议使用董红敏等[74]所提出的分区、分饲养阶段的估算方法，也避免了出栏、存栏量所导致动物数量不清所产生的不一致。秸秆资源量估算仍然参照毕于运等[8–9]和谢光辉等[20]的类似估算方法，绿肥和饼肥资源估算方法仍沿用全国农业技术推广服务中心[2]的方法。其次，资源干湿状态的统一。鉴于估算结果实际应用的方便，粪、尿类资源和绿肥均采用湿基或鲜基，秸秆和饼肥资源建议使用风干基。再次，资源范围的统一。人粪尿资源的产生源于所有人口，应估算所有的人口，15 岁以下未成年人口排泄量的处理建议采用刘晓燕等[39]提供的方法。统计资料中畜禽养殖数量不清的处理方法建议采用王方浩等[35]和林源等[69]所提供的处理方法，建议今后统计资料中能够区分各种使役动物、家禽鸡、鸭、鹅的养殖数量，因为这些动物的排泄系数、养分含量和生长周期差异很大 (表 2、表 3)，需要分别估算。秸秆类资源范围，毕于运等[8–9]和谢光辉等[20]已经给出较为科学合理的范围，建议在此基础上，增加修剪的林木枝叶、木材加工的刨花等废弃物资源量。

2) 参数的更新统一。草谷比、人、畜禽粪尿排泄系数以及秸秆、粪尿类养分含量需要重新调查测定、更新统一。在作物新品种审定的参数中，建议给出收获系数。

基于秸秆、粪尿同样也是种养业生物产出[41]的考虑，建议我国统计资料中增加秸秆生物量以及动物粪尿产量数据的统计报告，给我国有机肥料资源利用提供必要数据。

### 2.3 我国有机肥料资源的利用

2.3.1 有机肥资源利用的现状与问题

第一、现阶段我国作物生产主要依赖于化肥，有机肥在养分投入中的比例低。

据《2004 年中国环境状况公报》，2003 年全国

有机肥施用量仅占肥料施用总量的 25%[75]。2005 年，我国实际用于农业的有机肥料养分量仅占养分资源总量的约 34%，占农田养分投入量约 30%[65]。近来，我国化肥施用量不断增长，1990～2009 年间，世界氮肥生产增加的 61%，氮肥消费增加的 52% 来自中国[76]。据 FAO 数据，2014 年中国大陆化肥总养分 ($N+P_2O_5+K_2O$) 用量占全球总用量的 31%，平均施氮量为 N 253.95 kg/hm$^2$，世界平均施氮量仅为 N 68.75 kg/hm$^2$[77]。

我国有几千年的农耕文明，自古就有重视有机肥更新地力的传统[45]，积累了大量有机肥积制和施用的经验[2]，但是改革开放以来我国农田化肥用量迅速增长，有机肥使用量日趋减少。1949 年，我国有机肥在肥料投入中所占比重为 99.9%，1980 年下降到 47.1%，2000 年下降到 31.4%[45]，2003 年有机肥养分仅占肥料总养分的 25%[75]。2009 年，我国秸秆资源量为 8.2 亿 t，可利用资源为 6.87 亿 t，作为肥料利用 (秸秆还田) 的仅占可收集资源量的 14.78%[55]。2008 年，我国农田人畜粪尿和秸秆氮磷钾养分输入仅分别占农田养分总输入的 23.6% 和 8.0%[10]，大田作物中有机肥施用量更低。据赵荣芳等[78]文献分析，至 2009 年，华北平原小麦-玉米轮作农家肥氮素输入仅占氮素总输入的 10%。据本研究 2014 年在河北曲周县第四疃镇调查结果，有机肥料资源 (秸秆 + 农家肥) 的氮素和磷素输入占小麦-玉米轮作体系氮素和磷素总输入的 19.2% 和 16.6%(未发表资料)。

第二、有机肥资源养分在贮存和加工过程损失严重，只关注实物回田是对有机肥料资源利用认识上的不足。

有机肥料资源利用是一个贮存、加工与施用的全过程。目前有机资源利用大都关注实物量的回田，而忽略了养分回田的实质问题，忽视有机肥料资源在贮存和加工过程中的养分损失，这不利于养分资源管理。从有机肥料资源的实物还田看，据杨帆等[52]报道，我国规模化养殖场畜禽粪便主要处理方式有传统堆沤、工厂化处理和沼气发酵，2008 年我国用这 3 种方式处理粪便约 56 117 万 t，占规模化养殖场总量的 72.4%。据 2010 年我国五个养殖大省 (吉林、四川、浙江、安徽、河北) 的调查结果，农村家禽粪尿还田率 68.7%，猪粪还田率 86.7%[79]。综上，我国畜禽粪尿实物利用处理率约为总量的 80%，但是，有机肥料资源从产生，到贮存、加工，到运输到田间利用，每一个环节都存在着养分的损失。据 Gu 等[80]报道的数据推算，动物粪尿以氨挥发形式在储存过程中的损失率可达到 5.6%～34.0%。猪粪在贮存过程中氮素损失达到 14.7%～41.2%。人粪尿在露天或室内存放 90 天，氮素损失达到 8.40%～68.73%[11]。据我们研究，在河北曲周畜禽粪尿利用过程中贮存环节氮素损失占总氮的 35.1%～43.0%(未发表资料)。粪肥在堆肥过程中氮、磷、钾损失分别达到 30.7%、11.2%、18.7%，储藏过程中氮、磷、钾则分别损失 37.8%、48.1%、43.3%[27]。这样，约有 50% 氮素在加工、贮存以及运输施用过程中损失到环境中去。据研究报道，2002 年，我国畜禽粪尿资源仅有 50% 的氮素养分还田，15% 的氮素挥发损失，22% 的氮素进入水体环境，13% 的氮素养分弃置废弃，损失氮素总量达到 785.96 万 t[36]。综上所述，有机肥料资源的利用要全过程考虑养分的还田率，仅仅考虑产品或实物还田率是认识上的不足。Chadwick 等[47]认为，中国养殖业过去 20 年发展很快，但是粪尿贮存、加工技术和政策远远没有跟上。

第三、有机肥料资源可收集利用率与养分回田率低。

当前我国每年可产生约 57 亿 t 有机肥料实物量，约 7300 万 t 氮磷钾养分总量。这些资源分布在哪里？如何才能有效收集和利用？秸秆可收集利用率受收获方式、耕作制度、农田微地貌等因素的影响[9, 81]。2015 年全国秸秆总产量及其可收集利用量分别为 10.4 亿 t 和 9 亿 t[41]。秸秆养分回田有多种方式，可以作为肥料直接还田、用作饲料过腹还田等，这些方式氮素还田率分别为 100%、50%[14, 82]。据此估算，2000 年，我国秸秆氮素还田率为 46.7%[14]。这是在只考虑秸秆养分回田情况下的结果，当综合所有有机肥料资源氮素回田时，秸秆养分还田还要剔除作为饲料还田的部分，因为畜禽粪尿还田率会把作为饲料的秸秆养分包括进去，出现重复计算。根据包雪梅等[14]报道结果，全国秸秆肥料化利用率为 36.6%，秸秆肥料化利用的氮素回田率为 100%，这样，秸秆氮素回田率实际是 36.6%。

当前农村人粪尿利用出现了新问题。从 2004 年开始，国家设立了农村改厕项目，截至 2009 年底，全国农村卫生厕所普及率为 63.1%，无害化卫生厕所普及率为 40.4%[83]。可是，据我们 2014 年在河北曲周第四疃镇的调查发现，由于该项目厕所改造后的设施缺少污水处理环节，这些污水长期被贮存在地下粪槽，5～10 年才被抽出一次，然后大都抛弃到村外的水沟中，这样，人粪尿养分几乎全部损失到环境中。

如前所述，粪尿在贮存和加工处理过程中会造

成养分的大量损失。以氮素为例，约有50%氮素在贮存和加工的过程中损失，粪尿实物还田仅占资源总量的80%[52, 79]，所以粪尿资源氮素还田率约为40%。综合秸秆和粪尿资源看，我国有机肥料养分资源中氮素回田率低于40%，当前我国有机肥料资源氮素约为3000万t，推算当前我国有机资源氮素回田总量应小于1200万t，与李书田等[10]报道的1125.9万t (粪尿+秸秆) 接近。

2.3.2 有机肥料资源利用低的原因剖析

第一、政策因素

上个世纪80年代，我国农村实行土地经营的家庭联产承包责任制，调动了农民粮食生产积极性，此后又陆续实施各项促进粮食生产政策，各种农业税减免[84]，化肥生产的各种补贴和优惠[85–87]等等，使得化肥在市场、价格上占有优势，促进了化肥的生产和使用。自2006年以来，虽然我国部分地区实行了有机肥补贴政策，但实施力度和范围还相对较弱[47, 52]。

第二、社会与经济因素

1) 农村劳动力缺乏是当前有机肥不能有效利用的重要原因[47, 49]。从上个世纪80年代以来，技术进步把农民从田间地头解放出来，为了增加家庭经济收入，农村劳动力转移到非农业寻求兼职[47]，特别是40岁以下的青壮年外出打工成为常态[88]。北京和浙江农村的家庭收入来自外出务工占63%～79%，留守在农村的70%以上的人口年龄是40～60岁[47]，造成了农村劳动力短缺，而有机肥施用是一个耗时、重体力的农事活动，化肥施用反而方便、省时、省工。

2) 经济因素。2008～2009年，为了化肥工业技术升级改造，我国向化肥生产厂家减税和能源补贴等约496亿元人民币[76](原文献为74.6亿美元，这里根据目前人民币兑美元汇率换算，下同)，2010年上升到1246亿元人民币[85, 89](原文献为187.6亿美元)。20世纪70年代以来，我国农民购买尿素要比国际市场便宜50%～70%[85, 89]，助推了我国化肥的过量施用[70, 85, 89]。以当前尿素市场平均价格40 kg/100元和牛粪(鲜)(氮素含量0.0085g/g) 平均价格150元/t计算，1公斤有机肥纯氮折合市场价格17.6元，但每公斤尿素纯氮只需要5.4元，所以有机肥大都施用在经济价值高的蔬菜和果树上[90–92]。例如，有机肥料在温室大棚蔬菜地、露地蔬菜田、果园和水稻田的每季作物施用量分别约为N 1100 kg/hm$^2$、170 kg/hm$^2$、175 kg/hm$^2$和9 kg/hm$^2$[47, 93]。

第三、技术与技术推广因素

1) 贮存和加工过程保持养分的技术。控制贮存过程的养分损失需要标准化养殖场及农村粪尿贮存的科学管理。当前大多数养殖场的粪尿露天堆放，造成氮素气态损失，遇到下雨天气，造成粪尿养分的流失。缺少粪污分离、沉淀池等贮存工艺或设施。堆肥过程中控制氨损失的技术方法还有待进一步应用。

2) 有机肥施用技术落后。运输粪尿到田间以及撒施有机肥的机械化不足导致粪尿利用率低[70]。许多运送方法还只适用于干清粪[47]，对于液体类粪尿就很困难。农村改用水冲厕所后产生的污水污泥如何使用是一个新问题。目前某些生态区还缺乏与秸秆还田技术相配套的栽培技术。秸秆还田技术已经推广多年，在一定的土壤–气候区实施较好，但在某些土壤-气候条件下还存在许多问题。如皖北地区强制农民推行秸秆还田，禁止焚烧秸秆，而针对当地砂姜黑土耕性差、雨量集中等特点就缺乏相应的耕作技术。当前大部分采用旋耕，普遍造成春后小麦根系浅、缺氮，拔节期发育不良，农户抵触强烈。

3) 有机肥养分含量不清，给科学施用有机肥带来困难。目前我国有机肥资源养分含量的数据，大多来自农技推广技术服务中心1994年发布的结果。我国养殖业历经几十年的发展，动物品种、饲料以及管理都发生了很大的变化，粪尿养分含量同样会随之发生改变，以往的数据已过时。我国有机肥生产标准 (NY525-2011) 要求总养分含量大于5%，缺少氮磷钾养分含量分别标注。另外，对于有机肥当季养分矿化释放量也不清楚，研究报道较少。

4) 技术推广

当前土地承包经营者 (农户、合作社、家庭农场) 获得农业技术，大多是通过农资经销商、电视以及网络途径，但这些途径的针对性不强，难以解决实际问题。乡镇级农业技术推广站是最接近生产实践的推广部门，但这些部门没有有效地把技术推广到农户中去，甚至有些地方的技术人员还要靠销售农资来支撑自己的生活[47]。实质上是由于缺乏完整利益链条的长效运营机制，种养废弃物综合利用产品成本高，商品化水平低[41]。

2.3.3 提高有机肥料资源利用的途径

1) 技术是解决有机肥料资源循环利用的关键

推行循环农业是解决农业废弃物资源利用的根本途径。秸秆、粪尿等废弃物是物质和能量的载体[2, 41]。由于化肥的应用，长期以来我们轻视了对这种产品的利用，造成了资源浪费。农业部《种养结

合循环农业示范工程建设规划 (2017～2020)》中明确提出大力推行种养结合循环农业，实行“资源–产品–再生资源–产品”的循环经济模式，按照“减量化、再利用、资源化”的循环经济理念，推动农业生产由“资源–产品–废弃物”线性经济向“资源–产品–再生资源–产品”循环经济转变[41]。在循环农业中，秸秆、粪尿等都是资源，有机肥料得到资源化循环利用，真正实现有机肥替代化肥，从而优化我国肥料结构，实现化肥零增长才有希望，彻底改变我国农业生产严重依赖化学肥料的局面。

因地制宜，开辟有机肥料资源利用的多条途径，以应对有机肥料还田的技术问题。秸秆资源可以直接还田，可以作饲料养殖过腹还田，还可以加工成生物炭改良土壤，是解决当前有机肥料资源利用中许多技术难题的多种选择。某些生态区秸秆直接还田后腐解困难，还会造成土传病害的发生 (特别是蔬菜秸秆废弃物的还田)，则可以选择生物炭还田或者过腹还田，过腹还田是最佳的还田方式[94–95]。2008 年，我国秸秆直接还田占还田总量的 54.6%，过腹还田占 42.1%[55]。目前农业部推行种养结合的循环农业[41]，这样可以解决秸秆直接还田的许多技术问题。畜禽粪尿除了生产成商品有机肥外，还可以产沼气，沼渣沼液还田，这些利用方式需要根据当地生态条件选择。

有机资源利用的标准化设施建设。推进养殖场标准化建设以及有机肥料加工标准化建设。实施养殖场“三改两分”(改水冲清粪或人工干清粪为漏缝地板下刮粪板清粪、改无限用水为控制用水、改明沟排污为暗道排污，固液分离、雨污分离)[41]，实现从源头控制养分排放与流失。农村厕所旱改水后，要建设相应的污水处理与利用的标准化设施，如沼气池、污水处理以及污泥处理的设施建设，实现养分高效还田。

2) 在政策支持下，建立由市场主体参与有机肥料资源利用的长效运营机制，是有机肥料资源利用的社会、经济与政策保障。

推进有机肥料产品商品化进程，农业部提出要坚持创新市场主体参与建设机制，以市场运作为主，财政补助，竞争立项等方式，支持各种企业等实业参与投入[41]，解决我国有机肥料产品商品化成本高，有机废弃物收集、加工过程利益链条不完整的长效运营机制的问题，提高有机资源利用率，让有机肥料像化肥一样在生产中受到欢迎和利用。

## 3 结语

我国有机肥料资源丰富，文献综合分析表明，目前年产实物量约 57 亿 t，其中人粪尿约 8 亿 t (鲜)，畜禽粪尿约 38 亿 t (鲜)，秸秆年产约 10 亿 t (风干)，绿肥约 1.0 亿 t (鲜) 以及饼肥约 0.2 亿 t (风干)，能够提供氮磷钾 ($N+P_2O_5+K_2O$) 总养分约 7300 万 t，其中 N 约 3000 万 t、$P_2O_5$ 约 1300 万 t、$K_2O$ 约 3000 万 t，养分资源量巨大，然而目前养分利用率较低，以氮为例，目前回田率不足 40%。

长久以来，我国有机肥料资源量估算不清，相关参数陈旧过时，只注重实物回田率，忽视收集、贮存过程的损失是有机肥料资源利用认识的不足。有机肥料资源利用技术不完善是其利用率低的关键。农村土地自主经营寻求利益最大化、劳动力转移导致农村劳动力缺少等社会经济因素，化肥施用成本低、有机肥施用成本高等经济因素助推了优先使用化肥，忽略了有机肥料资源的开发利用。长期以来，我国有机肥料资源开发的优惠政策低于化肥，有机肥商品化低，没有形成从收集、开发加工、销售和施用的完整利益链，没有形成有机肥料资源开发利用的长效机制。农业部所提出的推进农业生产方式的转变，即由“资源–产品–废弃物”的线性发展方式向“资源–产品–再生资源–产品”种养结合循环农业发展方式的转变，是解决我国有机肥料资源利用的根本。循环农业生产需要解决有机肥料资源利用的各个环节的技术问题，创新由市场主体参与、政府补助、竞争立项建设的长效运行机制是解决我国有机肥料资源循环利用的保障。

**参 考 文 献：**

[1] 中华人民共和国农业部. 肥料志[M]. 北京: 农业出版社, 1958.
Ministry of Agriculture of the People’s Republic of China. Organic fertilizer records [M]. Beijing: Agriculture Press, 1958.

[2] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
National Agricultural Technology Extension and Service Centre. Organic fertilizer resources in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[3] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
National Agricultural Technology Extension and Service Centre. Records of nutrients in organic fertilizer in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[4] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥肥料养分数据集[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
National Agricultural Technology Extension and Service Centre. Data set of nutrients in organic fertilizer in China [M]. Beijing :

China Agriculture Press, 1999.

[5] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 环境保护部南京环境科学研究所. 第一次全国污染源普查,畜禽养殖业源产排污系数手册[Z]. 2009-2.
Research Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Science, Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP. Booklet of excreta factor in animal farming, the first national census of pollution sources [Z]. 2009-2.

[6] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291–296.
Cui M, Zhao L X, Tian Y S, *et al*. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transacation of the CSAE, 2008, 24(12): 291–296.

[7] 包雪梅, 张福锁, 马文奇. 中国有机肥特征、时空分布及养分潜力[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(增刊): 9-13.
Bao X M, Zhang F S, Ma W Q. Resources characteristic and spatial-time distribution of organic fertilizer and its potential of recycling nutrients in China. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(Supplement): 9-13.

[8] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 李宝玉. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211–217.
Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, Li B Y. Estimation of straw resources in China[J]. Transacation of the CSAE, 2009, 25(12): 211–217.

[9] 毕于运, 王道龙, 高春雨, 等. 中国秸秆资源评价与利用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2008.
Bi Y Y Wang D L, Gao C Y, *et al*. Straw resources evaluation and utilization in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008.

[10] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, (20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, (20): 4207–4229.

[11] 牛若峰. 农业技术经济手册[M]. 北京: 农业出版社, 1984. 118.
Niu R F. Agricultrual technology and economy manual [M]. Beijing: Agriculture Press, 1984. 118.

[12] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳. 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 L J, Yan Q J, Liu X Y. Straw resources and their utilization in China[J]. Transacation of the CSAE, 2002, 18(3): 87–91.

[13] 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812–816.
Zhao J N, Zhang G L, Yang D L. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 812–816.

[14] 包雪梅, 张福锁, 马文奇. 我国秸秆资源及养分循环研究[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(增刊): 14-17.
Bao X M, Zhang F S, Ma W Q. The resources of crop straw and their recycling nutrients in China[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(Supplement): 14-17.

[15] 李轶冰, 杨改河, 楚莉莉, 陈豫. 中国农村户用沼气主要发酵原料资源量的估算[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 231–237.
Li Y B, Yang G H, Chu L L, Chen Y. Estimation of resource extent of dominant feedstock for household biogas in rural areas of China[J]. Resources Science, 2009, 31(2): 231–237.

[16] 戴志刚, 鲁剑巍, 周先竹, 等. 中国农作物秸秆养分资源现状及利用方式[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(1): 27–29.
Dai Z G, Lu J W, Zhou X Z, *et al*. The present situation and utilization mode of crop residue nutrient resources[J]. Hubei Agricultual Sciences, 2013, 52(1): 27–29.

[17] 张无敌, 刘士清, 周斌, 何彩云. 我国农村有机废弃物资源及沼气潜力[J]. 自然资源, 1997, (1): 67–71, 80.
Zhang W D, Liu S Q, Zhou B, He C Y. Organic waste resources and their biogas potentiality in rural areas of China[J]. Natural Resources, 1997, (1): 67–71, 80.

[18] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近30年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, (4): 139–145.
Zhu J C, Li R H, Yang X Y, *et al*. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, (4): 139–145.

[19] 张海成, 张婷婷, 郭燕, 杨改河. 中国农业废弃物沼气化资源潜力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 194–199.
Zhang H C, Zhang T T, Guo Y, Yang G H. Chinese marsh gas resource potential of agricultural wastes in 2009[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(6): 194–199.

[20] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 855–863.
Xie G H, Wang X Y, Ren L T. China's crop residues resources evaluation[J]. Chinese Journal of Biotechnoogy, 2010, 26(7): 855–863.

[21] 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): 132.
Liu G, Shen L. Quantitive appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 132.

[22] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 吕润海. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32–44.
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, Lü R H. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 32–44.

[23] 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 L W, Ma L, Zhang W F, *et al*. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transacation of the CSAE, 2009, 25(7): 173–179.

[24] 汪海波, 秦元萍, 余康. 我国农作物秸秆资源的分布、利用与开发策略[J]. 国土与自然资源研究, 2008, (2): 92–93.
Wang H B, Qin Y P, Yu K. Utilization, distribution and exploration tactics of crop stalk resources in China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2008, (2): 92–93.

[25] 汪海波, 章瑞春. 中国农作物秸秆资源分布特点与开发策略[J]. 山东省农业管理干部学院学报, 2007, 23(2): 164–165.
Wang H B, Zhan R C. Distribution characteristics of crop straw resources and development statistics in China[J]. Journal of Shandong Agricultrual Management Cadre Institute, 2007, 23(2): 164–165.

[26] 张培栋, 杨艳丽, 李光全, 李新荣. 中国农作物秸秆能源化潜力估算[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 80–83.

Zhang P D, Yang Y L, Li G Q, Li X R. Energy potentiality of crop straw resources in China[J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(6): 80–83.

[27] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
Jia W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.

[28] 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, (4): 62–67.
Zhong H P, Yue Y A, Fan J W. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. Resources Science, 2003, (4): 62–67.

[29] 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 F C, Zhu Z H. Harvest index for various crops in China[J]. Scientia Agricultrua Sinica, 1990, 23(2): 83–87.

[30] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 薛帅. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9–17.
Xie G H, Wang X Y, Han D Q, Xue S. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 9–17.

[31] 林源, 马骥, 秦富. 中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 1–5.
Lin Y, Ma J, Qin F. The structure distribution and prospect of China manure resource[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 1–5.

[32] 全国规模化畜禽养殖污染调查办公室. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告[R]. 2001-5.
National Office of Pollution Investigation for Livestock and Poultry Farming. Investigation report on pollution national large-scale livestock and poultry farming [R]. 2001-5.

[33] 国家环境保护总局. 环发[2004]43号“关于减免家禽业排污费等有关问题的通知”[Z]. 2004.
State Environmental Protection Administration. Evironment and Development [2004] No. 43”Notification about problems of reducing pollutants releasing of domestic poultry”[Z]. 2004.

[34] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241–1249.
Zhang T, Bu M D, Geng W. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1241–1249.

[35] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, (5): 614–617.
Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, *et al*. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. China Environmental Science, 2006, (5): 614–617.

[36] 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 X L, Xu J X, Wang F H, *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.

[37] 朱建春, 张增强, 樊志民, 李荣华. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435–445.
Zhu J C, Zhang Z Q, Fan Z M, Li R H. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 435–445.

[38] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 171–179.
Geng W, Hu L, Cui J Y, *et al*. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. Transacation of the CSAE, 2013, 29(1): 171–179.

[39] 刘晓燕, 金继运, 任天志, 何萍. 中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析[J]. 应用生态学报, 2010, (8): 2092–2098.
Liu X Y, Jin J Y, Ren T Z, He P. Potential of organic manures nutrient resources and their environmental risk in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, (8): 2092–2098.

[40] 朱宁, 马骥. 中国畜禽粪便产生量的变动特征及未来发展展望[J]. 农业展望, 2014, (1): 46–48.
Zhu N, Ma J. Changes and outlook about production amount of livestock and poultry manure in China[J]. Agricultural Outlook, 2014, (1): 46–48.

[41] 中华人民共和国农业部. 种养结合循环农业示范工程建设规划(2017-2020年)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/ghjh/201708/t20170815_5785251.htm, 2017-8-15.
MoA. Planning for demonstration of engineering construction of circular agriculture with plant combined with breeding (2017-2020)[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/ghjh/201708/t20170815_5785251.htm, 2017-8-15.

[42] 中华人民共和国农业部.加快推进畜禽废弃物资源化利用[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/leaders/yukangzhen/bldtpxw/201706/t20170614_5680105.htm. 2017-6-14.
MoA. To accelerate development of reclaiming utilization of waste from animal and poultry resources [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/leaders/yukangzhen/bldtpxw/201706/t20170614_5680105.htm. 2017-6-14.

[43] 印遇龙. 大力发展生态养殖撬动大农业循环发展[EB/OL]. http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2017/3/371005.shtm, 2017-3-20.
Yin Y L. Develop ecological breeding strongly to promote development of big circular agriculture[EB/OL]. http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2017/3/371005.shtm, 2017-3-20.

[44] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据—年度数据[EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01, 2017.
National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China. National data-annual data [EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01, 2017.

[45] 张世贤. 我国有机肥料的资源、利用、问题和对策[J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(1): 8–11.
Zhang S X. Issues on utilization of domestic organic fertilizer resources and its countermeasure[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2001, 16(1): 8–11.

[46] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2016年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201702/t20170228_1467424.html, 2017-02-28.
National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China. Nationaleconomy and society developed statistical bulletin 1994 of People’s Republic of China [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201702/t20170228_1467424.html, 2017-02-28.

[47] Chadwick D, Jia W, Tong Y, *et al*. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in

China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 209: 34–46.

[48] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 311–319.
Gao D, Chen T B, Liu B, *et al*. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 311–319.

[49] 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]. 土壤与肥料, 2006, (1): 3–8.
Huang H X, Li S T, Li X L, *et al*. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soils and Fertilizers, 2006, (1): 3–8.

[50] Wang F, Zhang F, Ma W. The present situation and the countermeasures of agricultural non-point source pollution in China (Report to the Department of Agriculture) [R]. 2007.

[51] Wang F H, Dou Z X, Ma L, *et al*. Nitrogen mass flow in China's animal production system and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, (39): 1537–1544.

[52] 杨帆, 李荣, 崔勇, 段英华. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 77–82.
Yang F, Li R, Cui Y, Duan Y H. Utilization and develop strategy of organic fertilizer resources in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010, (4): 77–82.

[53] 陈清. 控制粪肥施用有助于菜田可持续生产[J]. 中国农资, 2012, (SI): 32.
Chen Q. Controlling of manure applying benefits sustainable production of vegetable fields[J]. China Agricultural Means of Production, 2012, (SI): 32.

[54] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 32–44.
Wei M G, Wang X Y, Xie G H. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one provinces of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 32–44.

[55] 农业部科技教育司. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[R]. 2010.
Science and Technology Education Department of MOA. Report on survey and evaluation of crop straw resources in China. 2010.

[56] 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]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 143–149.
Chen D D, Gao W S, Chen Y Q. Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 143–149.

[57] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242–247.
Gao X Z, Ma W Q, Ma C B, *et al*. Analysis of the current status of utilization of crop straw in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21(3): 242–247.

[58] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 郑方成. 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.
Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, Zheng F C. Estimation of releasing as open burning of crop straw in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(15): 1826–1831.

[59] 郭冬生, 黄春红. 近10年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 948–954.
Guo D S, Huang C H. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in past 10 years in China and its use pattern[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(4): 948–954.

[60] 李国学, 李玉春, 李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252–256.
Li G X, Li Y C, Li Y F. Advance on composting of solid waste and utilization of additives[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(2): 252–256.

[61] 孙育峰, 丰成学, 李友权. 我国农作物秸秆资源及其利用与开发[J]. 调研世界, 2009, (7): 37–39.
Sun Y F, Feng C X, Li Y Q. Exploitation and utilization of crop straw resources in China[J]. The World of Survey and Research, 2009, (7): 37–39.

[62] 范小建. 切实加强有机肥料建设, 努力提高农业综合生产能力[N]. 农民日报, 2005-06-21.
Fan X J. To effectively strengthen the construction of organic fertilizer, to strive to improve integrated producing talent of agriculture [N]. Farmers Daily, 2005-06-21.

[63] 赵秉强. 商品化是否是有机肥的发展方向?[J]. 中国农资, 2012, (SI): 32.
Zhao B Q. Is commercialization the direction for the development of organic fertilizer?[J]. China Agricultural Means of Production, 2012, (SI): 32.

[64] 杨帆, 马常宝. 我国有机肥料产业化利用现状及发展前景[J]. 腐植酸, 2006, (2): 13–18, 32.
Yang F, Ma B C. Utilization situation and development prospect of organic fertilizer industrialization in China[J]. Journal of Humic Acid, 2006, (2): 13–18, 32.

[65] 金继运. 我国肥料资源利用中存在的问题及对策建议[J]. 中国农技推广, 2005, (11): 4–6.
Jin J Y. The problems and their countermeasures and suggestions in utilization of fertilizer resources in China[J]. China Agricultural Technology Extension, 2005, (11): 4–6.

[66] 国家环保总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 14-103.
Department of Nature Environmental Conservation, Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China. The pollution investigation and prevention countermeasures on national large-scale livestock and poultry breeding [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. 14-103.

[67] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 刘杰. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 456–460.
Liu P F, Chen Z L, Xu S Y, Liu J. Waste loading and treatment strategies on the excreta on domestic animals in the Yangtze Delta[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 456–460.

[68] 张绪美, 董元华, 王辉, 沈旦. 中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1311–1318.
Zhang X M, Dong Y H, Wang H, Shen D. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1311–1318.

[69] 林源, 马骥, 秦富. 中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 1–5.
Lin Y, Ma J, Qin F. The structure distribution and prospect of China manure resource[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 1–5.

[70] Sun B, Zhang L, Yang L, *et al*. Agricultural non-point source

pollution in China: causes and mitigation measures[J]. AMBIO, 2012, 41(4): 370.

[71] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Li J, Peng S P. Manual for practical composting (the second version) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

[72] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
Li J, Peng S P. Manual for practical composting [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[73] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划学报, 2014, 35(3): 14–20.
Peng C Y, Luo H L, Kong J. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(3): 14–20.

[74] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303–308.
Dong H M, Zhu Z P, Huang H K, *et al*. Pollution generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. Transacation of the CSAE, 2011, 27(1): 303–308.

[75] 中华人民共和国国家环境保护总局. 2004中国环境状况公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526553974502531.pdf, 2005-5-25.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China environmental state bulletin 2004 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526553974502531.pdf, 2005-5-25.

[76] Zhang W F, Dou Z X, He P, *et al*. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375–8380.

[77] FAO. Food and agriculture data [EB/OL]. http://www.fao.org/faostat/en/#home, 2017-10

[78] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684–697.
Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer maize rotation system in Northern China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 684–697.

[79] 仇焕广, 莫海霞, 白军飞, 等. 中国农村畜禽粪便处理方式及其影响因素—基于五省调查数据的实证分析[J]. 中国农村经济, 2012, (3): 78–87.
Qiu H G, Mo H X, Bai J F, *et al*. Treatments patterns of domestic manure and their effect factors in rural area in China-practical analysis based on survey data in 5 provinces[J]. Chinese Rural Economy, 2012, (3): 78–87.

[80] Gu B J, Ju X T, Chang J, *et al*. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792–8797.

[81] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852–1859.
Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collection amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852–1859.

[82] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社,1998.
Shen S M. Soil fertility in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

[83] 中华人民共和国国家环保总局. 2009中国环境状况公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526561125391815.pdf, 2010-5-31.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China.China environmental state bulletin 2009 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526561125391815.pdf, 2010-5-31.

[84] Huang J K, Wang X B, Rozelle S. The subsidization of farming households in China's agriculture[J]. Food Policy, 2013, 41: 124–132.

[85] Smith L E D, Siciliano G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 209: 15–25.

[86] Zhang W F, Dou Z X, He P, *et al*. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(21): 8375–8380.

[87] 王雁峰, 张卫峰, 张福锁. 中国肥料管理制度的现状及展望[J]. 现代化工, 2011, 31(3): 6–13.
Wang Y F, Zhang W F, Zhang F S. China's fertilizer management system situation, problems and prospect[J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(3): 6–13.

[88] Li Q, Huang J K, Luo R F, Liu C F. China's labor transition and the future of China's rural wages and employment[J]. China & World Economy, 2013, 21(3): 4–24.

[89] Li Y X, Zhang W F, Ma L, *et al*. An analysis of China's fertilizer policies: Impacts on the industry, food security, and the environment[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 972.

[90] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al*. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1): 117.

[91] Hou Y, Gao Z L, Heimann L, *et al*. Nitrogen balances of smallholder farms in major cropping systems in a peri-urban area of Beijing, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 92(3): 347–361.

[92] Gao J J, Bai X L, Zhou B, *et al*. Soil nutrient content and nutrient balances in newly-built solar greenhouses in northern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94(1): 63–72.

[93] Chadwick D, Chen Q, Tong G H, *et al*. Policy brief on improving manure nutrient management practices in China towards sustainable intensification in China[]. UK-China Sustainable Agriculture Innovation Network(SAIN), 2012.

[94] 郭庭双, 杨振海. 我国农作物秸秆过腹还田情况[J]. 中国畜牧业, 1994, (8): 4–5.
Guo T S, Yang Z H. The situation of manure fertilizer from crop straw in China[J]. China Animal Industry, 1994, (8): 4–5.

[95] 陈荣丽, 陈桂月, 陈春生. 秸秆直接还田与过腹还田效益分析探讨[J]. 饲料博览, 2001, (8): 47.
Chen R L, Chen G Y, Chen C S. Comparison the effectiveness between straw incorporated with soil and manure fertilizer return[J]. Feed Review, 2001, (8): 47.