

我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力

柴如山, 安之冬, 马 超, 王擎运, 章力干, 郜红建*

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036)

摘要:【目的】粮食作物秸秆中钾养分含量及其还田后的当季释放率均较高, 调查我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量, 为秸秆还田条件下农田钾素养分管理提供科学依据。【方法】基于最新统计数据 and 文献资料, 采用草谷比法估算了我国不同省份和农区主要粮食作物秸秆的钾养分资源量, 及其在还田条件下的钾肥替代潜力。

【结果】2015—2017 年在我国主要粮食作物种植区域, 水稻、小麦和玉米秸秆的年均产量分别为 23212 万 t、17083 万 t 和 39918 万 t, 三大粮食作物秸秆主要分布于华北、长江中下游和东北农区, 分别占全国总量的 33.6%、25.4% 和 22.8%。水稻、小麦和玉米秸秆可以提供的年均钾养分资源量分别为 529 万 t、216 万 t 和 568 万 t, 长江中下游、华北和东北农区三大粮食作物秸秆钾养分资源量居于全国前列, 分别占全国总量的 30.4%、28.2% 和 22.0%。各省单位耕地面积水稻秸秆还田当季可提供的钾养分量均较高, 为 K_2O 115.0~209.5 kg/hm²。小麦秸秆还田替代钾肥潜力较大的省份有河南、河北、山东、安徽和江苏, 占全国小麦总播种面积的 71.1%, 钾肥替代潜力为 K_2O 82.3~97.1 kg/hm²。对玉米秸秆还田来说, 其钾肥替代潜力为 K_2O 67.2~170.7 kg/hm²。从全国范围来看, 单位耕地面积水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供钾养分量分别为 K_2O 152.6、82.4 和 124.4 kg/hm²。

【结论】我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供的钾养分量分别为 K_2O 449 万 t、193 万 t 和 479 万 t。我国单位耕地面积水稻、小麦和玉米秸秆还田当季的钾肥替代潜力分别为 K_2O 152.6、82.4 和 124.4 kg/hm², 充分利用秸秆资源, 可基本满足我国粮食作物生产的钾素需求, 维持土壤钾素平衡。

关键词: 水稻; 小麦; 玉米; 秸秆还田; 钾肥替代

Potassium resource quantity of main grain crop straw and potential for straw incorporation to substitute potassium fertilizer in China

CHAI Ru-shan, AN Zhi-dong, MA Chao, WANG Qing-yun, ZHANG Li-gan, GAO Hong-jian*

(Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: 【Objectives】Crop straws contain high content of potassium (K), and the in-season K release rates of returned straws are high in Chinese croplands. Clearance of the quantity of crop straws and the contained K resources in the main grain crops planting areas of China would provide a scientific basis for soil K management under straw returning. 【Methods】Based on latest statistical data and literature review, the K resource quantity of main grain crop straws and the potential of K fertilizer substitution were estimated for different provinces and agricultural regions of China. 【Results】The results indicated that the amounts of crop straw from rice, wheat and maize were 232.12, 170.83 and 399.18 million tons per year, in the main grain crops-planting regions of China during 2015–2017. The crop straws were mainly produced in North China, Middle and Lower Reaches of Yangtze River, and Northeast China, accounting for 33.6%, 25.4% and 22.8% of the total national crop straw yields, respectively. The annual straw K resources from rice, wheat and maize were 5.29, 2.16 and 5.68 million tons. The straw K resources were mainly distributed in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, North China and Northeast China, accounting for 30.4%, 28.2% and 22.0% of the whole resources in China. The K_2O

收稿日期: 2019-04-18 接受日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300901, 2016YFD0200107); 国家自然科学基金项目 (31700452)。

联系方式: 柴如山 E-mail: rschai@ahau.edu.cn; * 通信作者 郜红建 E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

provided by rice straw incorporation ranged from 115.0 to 209.5 kg/hm² in China, that by wheat straw incorporation was relatively higher (K₂O 82.3–97.1 kg/hm²) in Henan, Hebei, Shandong, Anhui and Jiangsu Provinces, where the sowing areas of wheat was about 71.1% of China. For maize, straw incorporation could substitute 67.2–170.7 kg/hm² of K₂O input. At the national scale, the substituting potentials of potash through straw incorporation were K₂O 152.6, 82.4 and 124.4 kg/hm² for rice, wheat and maize, respectively.

【 Conclusions 】 The straws of rice, wheat and maize could averagely provide K₂O resources of 4.49, 1.93 and 4.79 million tons annually under straw returning. The available K₂O amount in season from rice, wheat and maize straws are 152.6, 82.4 and 124.4 kg/hm² in China. Therefore, using straws properly could satisfy the basic potassium requirement for grain production and soil potassium balance.

Key words: rice; wheat; maize; straw incorporation; substitution for potash

作物秸秆是一种重要的有机肥资源, 秸秆还田之后, 可为土壤输入有机物质和养分元素, 并对土壤养分循环过程产生重要影响^[1-5]。杨帆等^[6]运用数值化理论对分布在我国南方地区的 94 个秸秆还田试验的综合评价结果表明, 秸秆还田可有效提高土壤肥力和作物产量。陈轩敬等^[7]运用内梅罗指数法, 对国家紫色土肥力与肥料效益监测基地长期定位试验数据 (20 年) 进行分析, 结果显示长期秸秆还田配施化肥是培肥土壤并实现作物高产的最佳措施。杨志臣等^[8]利用 18 年定位试验比较了秸秆还田和传统腐熟有机物对土壤理化性质、养分状况及作物产量的影响, 结果表明两种施肥方式的土壤培肥效果基本相同。基于整合分析方法的研究结果显示, 秸秆还田能够增加小麦和水稻产量^[9-10]。而且秸秆还田在一定条件下还能提高农产品的品质, 如可增加稻米蛋白质含量, 降低稻米的垩白米率、垩白度, 并有利于稻米食味品质的改善^[11-12]。因此, 在施用化学肥料的基础上, 推广秸秆还田, 可以有效提高农田土壤肥力, 有助于实现农业的可持续发展。

与其他养分元素相比, 秸秆中的钾含量相对较高, 据全国农业技术推广服务中心对我国 11 个省份大样本秸秆的养分测定, 水稻、小麦和玉米秸秆中的钾含量分别为 18.9、10.5 和 11.8 g/kg^[13]。而且在还田条件下, 水稻和玉米秸秆中钾素的当季释放率为 85% 左右, 小麦秸秆中钾素的当季释放率可以达到 90%^[14]。在我国的农业生产中, 作物秸秆是一种重要的钾素来源。谭德水等^[15-16]分析了河北潮土、山西褐土和青海栗钙土上 13 年秸秆还田对耕层土壤钾素状况的影响, 发现氮磷肥配合秸秆还田处理与只施用氮磷肥处理相比, 不同程度地提高了 0—20 cm 土层水溶性钾、非特殊吸附钾和非交换性钾的含量, 降低了土壤中矿物钾的比例。河北潮土区小麦-玉米轮

作长期定位试验 (19 年) 的结果表明, 秸秆还田显著增加了耕层土壤 (0—20 cm) 的速效钾和缓效钾含量, 增强了土壤的供钾能力, 有助于缓解土壤钾素的亏缺状况^[17]。在我国河北、山东、宁夏和青海等地区进行的 5 年定位试验表明, 秸秆还田能明显增加作物的吸钾量^[18]。李继福等^[19]在湖北省水稻-冬油菜轮作区进行的 3 年定位试验表明, 在土壤供钾能力较强的田块上, 秸秆还田配合钾肥施用能显著增加冬油菜的钾吸收量和产量, 在连续秸秆还田条件下, 水稻季和冬油菜季可以分别减少钾肥用量 42.2% 和 31.2% 并能维持产量水平。长期定位试验的研究结果表明, 水稻秸秆还田提供的钾与化学钾肥具有相同的营养功效, 秸秆还田在一定程度上可以部分替代化学钾肥的施用^[20-21]。徐洋等^[22]利用农业农村部 339 个国家级基层肥料信息网点调查数据, 对我国种植业化肥施用状况进行统计分析, 结果表明 2016 年我国种植业的钾肥 (K₂O) 消费量为 1454.4 万 t。李书田等^[23]的研究结果显示, 我国作物秸秆还田每年可提供 636.1 万 t 有效钾素 (K₂O), 占有机肥资源 (包括畜禽粪肥、作物秸秆和人粪尿) 还田可提供的有效钾素总量的 50.0% 左右。从全国范围来看, 目前我国农业生产中钾素养分投入不足, 农田整体钾平衡状况表现为亏缺^[23-24]。秸秆还田对于补充土壤钾库、维持土壤钾素平衡以及减少化学钾肥投入具有重要的意义。

本研究基于我国各省份主要粮食作物的年播种面积及产量, 并根据国家发展改革委办公厅和原农业部办公厅 2015 年发布的《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中我国不同农区主要粮食作物草谷比^[25]及文献调研得到的相关参数, 利用草谷比法估算了主要粮食作物秸秆钾养分资源量及其还田替代钾肥的潜力, 以期对秸秆还田条件下的钾肥合理配置与农田钾养分管理提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域为我国三大粮食作物主要种植省份。水稻的研究范围为辽宁、吉林、黑龙江、河南、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南、福建、广东和广西。小麦的研究范围为河北、山西、内蒙古、山东、河南、江苏、安徽、湖北、陕西、甘肃、新疆、四川和云南。玉米的研究范围为辽宁、吉林、黑龙江、河北、山西、内蒙古、山东、河南、江苏、安徽、湖北、湖南、陕西、甘肃、宁夏、新疆、重庆、四川、贵州、云南和广西。2017 年水稻、小麦、玉米主要种植地区的播种面积分别占全国水稻、小麦、玉米播种面积的 96.9%、96.5% 和 98.8%。根据国家发展改革委办公厅和原农业部办公厅发布的《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》^[25], 本研究将三大粮食作物的主要种植地区划分为如下农区: 东北农区 (辽宁、吉林和黑龙江), 华北农区 (河北、山西、内蒙古、山东和河南), 长江中下游农区 (江苏、浙江、安徽、江西、湖北和湖南), 西北农区 (陕西、甘肃、宁夏和新疆), 西南农区 (重庆、四川、贵州和云南) 及南方农区 (福建、广东和广西)。

1.2 估算方法

本研究中的秸秆是指田间秸秆, 即收获作物主要农产品之后田间剩余的副产品^[26]。目前国内学者多是利用作物产量和相应的草谷比计算我国秸秆资源量^[1, 14, 27-29]。草谷比指农作物秸秆产生量与经济产量的比值^[26]。对于水稻、小麦和玉米来说, 《中国统计年鉴》中的产量即是经济产量。采用国内通用的草谷比法来估算我国各省份主要粮食作物秸秆产生量, 计算公式为:

$$W_s = W_p \times S_G \quad (1)$$

式中: W_s —作物秸秆产生量; W_p —作物经济产量; S_G —作物草谷比。

为避免年际间的波动, 基于 2015—2017 年《中国统计年鉴》中各省份水稻、小麦和玉米的产量数据, 根据草谷比计算出各省份主要粮食作物的秸秆产生量。

各省份主要粮食作物秸秆钾养分资源量的计算公式为:

$$W_{K_2O} = W_s \times K_s \times 94/78 \quad (2)$$

式中: W_{K_2O} —作物秸秆钾素 (K_2O) 资源量; K_s —作物

秸秆钾 (K) 含量; 94/78—将单质钾 (K) 折算为氧化钾 (K_2O) 的系数。

各省份单位耕地面积主要粮食作物秸秆还田替代钾肥潜力的计算公式为:

$$A_{K_2O} = W_{K_2O}/A \times R_K \quad (3)$$

式中: A_{K_2O} —单位耕地面积主要粮食作物秸秆还田的钾肥替代潜力; A —主要粮食作物的播种面积; R_K —还田条件下秸秆钾养分当季释放率。

1.3 数据来源

主要种植省份水稻、小麦和玉米的年播种面积和产量来自国家统计局编制的《中国统计年鉴》^[30]。为更准确地评估我国各省份主要粮食作物秸秆资源量, 本研究采用国家发展改革委办公厅和原农业部办公厅 2015 年发布的《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中我国不同农区主要粮食作物草谷比^[25](表 1)。《中国有机肥料养分志》中对我国 11 个省份大样本秸秆的养分测定结果显示, 水稻、小麦和玉米秸秆的钾 (K) 含量分别为 1.89% ($n = 474$)、1.05% ($n = 266$) 和 1.18% ($n = 275$)^[13]。本研究对我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量的估算参照《中国有机肥料养分志》中的作物秸秆钾含量数据。水稻、小麦和玉米秸秆还田的钾养分当季释放率分别为 84.9%、89.1% 和 84.4%^[14]。

表 1 我国不同农区水稻、小麦和玉米草谷比^[25]

Table 1 Straw/grain ratios of rice, wheat and maize in different agricultural regions of China

农区 Agricultural region	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	0.97		1.86
华北 North China	0.93	1.34	1.73
长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River	1.28	1.38	2.05
西北 Northwest China		1.23	1.52
西南 Southwest China	1.00	1.31	1.29
南方 South China	1.06		1.32

2 结果与分析

2.1 我国主要粮食作物秸秆资源量及分布

2015—2017 年我国主要粮食作物秸秆年均产量为 80213 万 t, 其中水稻、小麦和玉米秸秆年均产量分别为 23212 万 t、17083 万 t 和 39918 万 t, 产量最

大的是玉米秸秆，占三大粮食作物秸秆总产量的49.8%，其次为水稻秸秆和小麦秸秆，所占比例分别为28.9%和21.3%。从我国不同省份的作物秸秆年产量(表2)来看，水稻秸秆主要分布在湖南、江西、江苏、黑龙江、湖北和安徽，分别占全国水稻秸秆总资源量的14.7%、11.3%、10.6%、10.1%、10.0%和8.3%；小麦秸秆主要分布在河南、山东、安徽、河北和江苏，分别占全国小麦秸秆总产量的27.9%、18.8%、12.0%、11.4%和9.7%；玉米秸秆主要分布在黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁，分别占全国玉米秸秆总资源量的16.1%、13.8%、10.0%、9.8%、8.3%、7.9%和7.2%。三大粮食作物秸秆总产量位于全国前列的省份有黑龙江(8784万t)、河南(8577万t)、山东(7119万t)、吉林(6148万t)、河北(5101万t)、安徽(5039万t)、江苏(4665万t)和内蒙古(4203万t)，这些省份的主要粮食作物秸秆总产量占全国总产量的61.9%。从我国不同农区的作物秸秆资源量来看，水稻秸秆主要分布于长江中下游农区，占全国水稻秸秆总产量的57.9%，其次为东北(14.8%)、西南(13.3%)和南方农区(12.0%)(图1)。小麦秸秆主要分布于华北农区，所占比例为61.5%，长江中下游、西北和西南农区的小麦秸秆资源量分别占全国小麦秸秆资源总量的25.1%、10.0%和3.4%。玉米秸秆主要分布于华北和

表2 我国不同省份水稻、小麦和玉米秸秆产量(×10⁴ t)
Table 2 Straw yields of rice, wheat and maize in different provinces of China

农区 Agricultural region	省份 Province	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	444 ± 31		2888 ± 385
	吉林 Jilin	637 ± 26		5511 ± 464
	黑龙江 Heilongjiang	2352 ± 333		6432 ± 553
华北 North China	河北 Hebei		1953 ± 54	3148 ± 331
	山西 Shanxi		347 ± 31	1574 ± 104
	内蒙古 Inner Mongolia		231 ± 21	3972 ± 317
	山东 Shandong		3210 ± 116	3909 ± 604
	河南 Henan	483 ± 28	4767 ± 173	3327 ± 381
长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River	江苏 Jiangsu	2465 ± 39	1651 ± 124	550 ± 91
	浙江 Zhejiang	690 ± 105		
	安徽 Anhui	1924 ± 164	2043 ± 197	1072 ± 160
	江西 Jiangxi	2631 ± 79		
	湖北 Hubei	2317 ± 150	587 ± 5	674 ± 62
西北 Northwest China	湖南 Hunan	3408 ± 91		394 ± 12
	陕西 Shaanxi		537 ± 33	831 ± 6
	甘肃 Gansu		336 ± 9	869 ± 14
	宁夏 Ningxia			333 ± 10
	新疆 Xinjiang		834 ± 71	1096 ± 70
西南 Southwest China	重庆 Chongqing	501 ± 13		334 ± 8
	四川 Sichuan	1528 ± 47	477 ± 128	1130 ± 216
	贵州 Guizhou	432 ± 16		469 ± 87
	云南 Yunnan	620 ± 79	111 ± 12	1039 ± 120
南方 South China	福建 Fujian	477 ± 53		
	广东 Guangdong	1138 ± 25		
	广西 Guangxi	1164 ± 72		366 ± 6

注 (Note) : 表中数据为平均值 ± 标准差 Data are shown as mean ± SD.

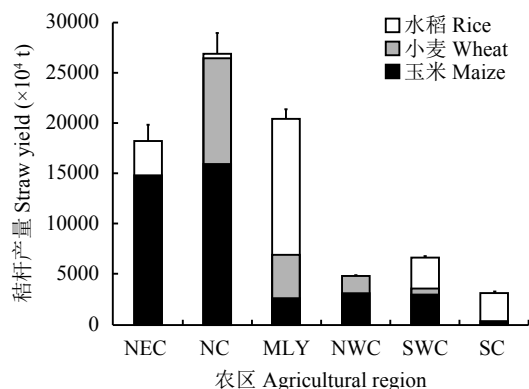


图1 我国不同农区水稻、小麦和玉米秸秆产量

Fig. 1 Straw yields of rice, wheat and maize in different agricultural regions of China

[注 (Note): NEC—东北 Northeast China; NC—华北 North China; MLY—长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River; NWC—西北 Northwest China; SWC—西南 Southwest China; SC—南方 South China; 误差线为标准差 Error bars indicate the standard deviation.]

东北农区, 所占比例分别为 39.9% 和 37.2%。水稻、小麦和玉米秸秆总产量居于全国前列的为华北、长江中下游和东北农区, 各农区的三大粮食作物秸秆总产量分别为 26922 万 t、20405 万 t 和 18265 万 t, 分别占全国总量的 33.6%、25.4% 和 22.8%。

2.2 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及分布

我国主要粮食作物秸秆钾养分年均产量为 1313 万 t, 来自水稻、小麦和玉米秸秆的钾养分资源量分别为 529 万 t、216 万 t 和 568 万 t (表 3), 若按照水稻、小麦和玉米秸秆还田的钾养分当季释放率分别为 84.9%、89.1% 和 84.4%^[14], 则我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供的钾养分量分别为 449 万 t、193 万 t 和 479 万 t。从表 3 中可以看出, 和单一作物秸秆在不同省份间的分布规律一致, 水稻秸秆钾养分资源主要分布在湖南、江西、江苏、黑龙江、湖北和安徽, 这些省份的水稻秸秆钾养分总量占全国水稻秸秆钾养分资源总量的 65.0%; 小麦秸秆钾养分资源主要分布在河南、山东、安徽、河北和江苏, 占全国小麦秸秆钾养分总量的 79.8%; 玉米秸秆钾养分资源主要分布在黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁, 这些省份的玉米秸秆钾养分资源总量占全国玉米秸秆钾养分总量的 73.1%。由于水稻、小麦和玉米秸秆的钾含量存在差异, 在省级尺度上, 三大粮食作物秸秆钾养分总资源量与秸秆总量在全国范围内的分布规律存在差异。三大粮食作物秸秆钾养分资源总量位于全

国前列的省份为黑龙江、河南、山东、吉林、安徽、江苏和湖南, 分别占全国总量的 11.1%、9.0%、7.3%、7.1%、6.5%、6.5% 和 6.3%。从各省份的主要粮食作物秸秆钾养分总量来看, 大于 110 万 t 的为黑龙江和河南, 80 万~100 万 t 的省份有 5 个 (山东、吉林、安徽、江苏和湖南), 50 万~70 万 t 的省份有 6 个 (湖北、河北、江西、内蒙古、四川和辽宁), 10 万~35 万 t 的省份有 11 个 (广西、云南、山西、新疆、广东、陕西、甘肃、贵州、重庆、浙江和福建), 低于 10 万 t 的为宁夏。三大粮食作物秸秆钾养分资源主要分布于长江中下游、华北和东北农区, 各农区的主要粮食作物秸秆钾养分总量分别为 398 万 t、371 万 t 和 289 万 t, 占全国总量的 30.4%、28.2% 和 22.0% (表 4)。

2.3 我国主要粮食作物秸秆还田替代钾肥的潜力

从表 5 中可以看出, 在我国水稻主要种植区域, 单位耕地面积水稻秸秆还田当季可提供的钾养分量居于前列的为江苏、湖北和浙江, 远高于其他省份。单位耕地面积水稻秸秆还田替代钾肥潜力为 K_2O 150.2~161.1 kg/hm² 的省份为辽宁、湖南、安徽、吉林、四川和江西, 这些省份的水稻总播种面积占全国水稻总播种面积的 44.8%; 河南、重庆和黑龙江单位耕地面积水稻秸秆还田替代钾肥潜力为 K_2O 132.4~145.5 kg/hm², 这些省份的水稻总播种面积占全国水稻总播种面积的 16.2%; 单位耕地面积水稻秸秆还田替代钾肥潜力为 K_2O 115.0~126.6 kg/hm² 的区域占全国水稻总播种面积的 21.2%, 包括福建、贵州、广东、广西和云南。在我国小麦主要种植区域, 小麦秸秆还田替代钾肥潜力较大的省份有河南、河北、山东、安徽和江苏, 为 K_2O 82.3~97.1 kg/hm², 占全国小麦总播种面积的 71.1%; 替代钾肥潜力为 K_2O 42.7~77.1 kg/hm² 的省份有新疆、山西、湖北、陕西、四川、甘肃和内蒙古, 面积占比为 27.2%; 云南省小麦秸秆还田替代钾肥的潜力相对较小。对玉米秸秆还田来说, 替代钾肥潜力最大的省份为吉林、辽宁、内蒙古、江苏、黑龙江、新疆、山东、湖南、宁夏和安徽, 这些省份单位耕地面积玉米秸秆还田当季可提供的钾养分量为 K_2O 132.6~170.7 kg/hm², 玉米总播种面积占全国玉米总播种面积的 46.9%; 河北、湖北、河南、山西和甘肃玉米秸秆还田替代钾肥的潜力为 K_2O 102.4~113.4 kg/hm², 占全国玉米总播种面积的 26.8%; 单位耕地面积玉米秸秆还田替代钾肥潜力为 K_2O

表 3 我国不同省份水稻、小麦和玉米秸秆钾养分资源量 ($\times 10^4 \text{ t K}_2\text{O}$)

Table 3 Straw potassium resource quantities of rice, wheat and maize in different provinces of China

农区 Agricultural region	省份 Province	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	10.1 $\pm$ 0.7		41.1 $\pm$ 5.5
	吉林 Jilin	14.5 $\pm$ 0.6		78.4 $\pm$ 6.6
	黑龙江 Heilongjiang	53.6 $\pm$ 7.6		91.5 $\pm$ 7.9
华北 North China	河北 Hebei		24.7 $\pm$ 0.7	44.8 $\pm$ 4.7
	山西 Shanxi		4.4 $\pm$ 0.4	22.4 $\pm$ 1.5
	内蒙古 Inner Mongolia		2.9 $\pm$ 0.3	56.5 $\pm$ 4.5
	山东 Shandong		40.6 $\pm$ 1.5	55.6 $\pm$ 8.6
	河南 Henan	11.0 $\pm$ 0.6	60.3 $\pm$ 2.2	47.3 $\pm$ 5.4
长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River	江苏 Jiangsu	56.1 $\pm$ 0.9	20.9 $\pm$ 1.6	7.8 $\pm$ 1.3
	浙江 Zhejiang	15.7 $\pm$ 2.4		
	安徽 Anhui	43.8 $\pm$ 3.7	25.9 $\pm$ 2.5	15.2 $\pm$ 2.3
	江西 Jiangxi	59.9 $\pm$ 1.8		
	湖北 Hubei	52.8 $\pm$ 3.4	7.4 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.9
西北 Northwest China	湖南 Hunan	77.6 $\pm$ 2.1		5.6 $\pm$ 0.2
	陕西 Shaanxi		6.8 $\pm$ 0.4	11.8 $\pm$ 0.1
	甘肃 Gansu		4.2 $\pm$ 0.1	12.4 $\pm$ 0.2
	宁夏 Ningxia			4.7 $\pm$ 0.1
	新疆 Xinjiang		10.6 $\pm$ 0.9	15.6 $\pm$ 1.0
西南 Southwest China	重庆 Chongqing	11.4 $\pm$ 0.3		4.8 $\pm$ 0.1
	四川 Sichuan	34.8 $\pm$ 1.1	6.0 $\pm$ 1.6	16.1 $\pm$ 3.1
	贵州 Guizhou	9.8 $\pm$ 0.4		6.7 $\pm$ 1.2
	云南 Yunnan	14.1 $\pm$ 1.8	1.4 $\pm$ 0.2	14.8 $\pm$ 1.7
南方 South China	福建 Fujian	10.9 $\pm$ 1.2		
	广东 Guangdong	25.9 $\pm$ 0.6		
	广西 Guangxi	26.5 $\pm$ 1.6		5.2 $\pm$ 0.1

注 (Note) : 表中数据为平均值 $\pm$ 标准差 Data are shown as mean $\pm$ SD.

表 4 我国不同农区水稻、小麦和玉米秸秆钾养分资源量及其占比

Table 4 Straw potassium resource quantities of rice, wheat and maize in different agricultural regions of China

农区 Agricultural region	水稻秸秆 Rice straw		小麦秸秆 Wheat straw		玉米秸秆 Maize straw	
	钾资源量	占比	钾资源量	占比	钾资源量	占比
	Quantity of K_2O ($\times 10^4 \text{ t}$)	Percentage (%)	Quantity of K_2O ($\times 10^4 \text{ t}$)	Percentage (%)	Quantity of K_2O ($\times 10^4 \text{ t}$)	Percentage (%)
东北 Northeast China	78.2 $\pm$ 7.5	14.8			210.9 $\pm$ 18.1	37.2
华北 North China	11.0 $\pm$ 0.6	2.1	133.0 $\pm$ 4.2	61.5	226.5 $\pm$ 24.2	39.9
长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River	306.0 $\pm$ 7.9	57.9	54.2 $\pm$ 4.1	25.1	38.2 $\pm$ 4.5	6.7
西北 Northwest China			21.6 $\pm$ 1.3	10.0	44.5 $\pm$ 1.2	7.8
西南 Southwest China	70.2 $\pm$ 2.9	13.3	7.4 $\pm$ 1.8	3.4	42.3 $\pm$ 5.9	7.4
南方 South China	63.3 $\pm$ 3.4	12.0			5.2 $\pm$ 0.1	0.9

注 (Note) : 表中数据为平均值 $\pm$ 标准差 Data are shown as mean $\pm$ SD.

表 5 我国不同省份和农区单位耕地面积水稻、小麦和玉米秸秆还田的钾肥替代潜力 (K_2O kg/hm²)
Table 5 Potassium substitution potential through rice, wheat and maize straw incorporation in different provinces and agricultural regions of China

农区 Agricultural region	省份 Province	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	161.1 ± 0.5		141.0 ± 10.0
	吉林 Jilin	156.2 ± 1.0		170.7 ± 5.1
	黑龙江 Heilongjiang	132.4 ± 1.4		136.9 ± 3.7
	加权平均 Weight average	139.6 ± 0.6		148.7 ± 4.8
华北 North China	河北 Hebei		94.3 ± 1.3	113.4 ± 6.3
	山西 Shanxi		61.6 ± 1.0	110.9 ± 3.6
	内蒙古 Inner Mongolia		42.7 ± 0.5	138.4 ± 1.2
	山东 Shandong		92.7 ± 0.5	135.4 ± 2.5
	河南 Henan	145.5 ± 3.5	97.1 ± 1.1	112.4 ± 2.9
	加权平均 Weight average	145.5 ± 3.5	91.0 ± 0.7	123.3 ± 2.3
长江中下游 Middle and Lower Reaches of Yangtze River	江苏 Jiangsu	209.5 ± 1.3	82.3 ± 2.4	137.0 ± 7.3
	浙江 Zhejiang	177.0 ± 2.8		
	安徽 Anhui	157.1 ± 4.3	89.4 ± 1.3	132.6 ± 5.1
	江西 Jiangxi	150.2 ± 0.0		
	湖北 Hubei	201.0 ± 4.1	59.2 ± 1.4	113.3 ± 5.0
	湖南 Hunan	158.9 ± 1.2		133.4 ± 0.6
	加权平均 Weight average	171.4 ± 1.5	81.0 ± 1.4	128.0 ± 3.6
西北 Northwest China	陕西 Shaanxi		58.0 ± 0.9	85.5 ± 1.3
	甘肃 Gansu		48.8 ± 0.2	102.4 ± 1.4
	宁夏 Ningxia			132.7 ± 4.6
	新疆 Xinjiang		77.1 ± 1.5	136.0 ± 2.2
	加权平均 Weight average		63.3 ± 0.7	108.7 ± 0.4
西南 Southwest China	重庆 Chongqing	142.6 ± 0.3		86.4 ± 1.0
	四川 Sichuan	151.4 ± 0.6	56.4 ± 0.4	87.0 ± 2.2
	贵州 Guizhou	122.3 ± 2.4		67.2 ± 1.2
	云南 Yunnan	115.0 ± 2.6	31.1 ± 0.5	77.9 ± 2.0
	加权平均 Weight average	136.7 ± 1.7	48.8 ± 0.5	80.0 ± 1.7
南方 South China	福建 Fujian	126.6 ± 1.4		
	广东 Guangdong	118.3 ± 0.4		
	广西 Guangxi	117.5 ± 1.5		72.2 ± 0.7
	加权平均 Weight average	119.3 ± 0.3		72.2 ± 0.7

注 (Note) : 数据为平均值 ± 标准差 Data are shown as mean ± SD.

67.2~87.0 kg/hm² 的区域占全国玉米总播种面积的 16.2%，包括四川、重庆、陕西、云南、广西和贵州。从我国不同农区主要粮食作物秸秆还田替代钾肥的潜力来看，不同农区水稻秸秆还田当季可提供

的钾养分量均较高，替代潜力最大的是长江中下游农区；小麦秸秆还田替代钾肥潜力最大的是华北农区，其次为长江中下游和西北农区，西南农区小麦秸秆还田替代钾肥的潜力最小；玉米秸秆还田替代

钾肥潜力最大的是东北农区,其次为长江中下游和华北农区,西南农区的替代潜力相对较小。总的来看,水稻秸秆还田替代钾肥的潜力较大,其次为玉米和小麦秸秆,单位耕地面积水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供钾养分的加权平均值分别为 K_2O 152.6、82.4 和 124.4 kg/hm^2 。

3 讨论

本研究估算了我国水稻、小麦和玉米主要种植省份秸秆还田替代钾肥的潜力,可以为各省份秸秆还田条件下的农田钾养分管理提供参考。对于作物秸秆产生量的估算来说,目前国内通用的方法是草谷比法,在作物秸秆资源量的计算过程中,草谷比的选择较为关键。高利伟等^[28]通过文献调研得出我国水稻、小麦和玉米的草谷比分别为 1.0、1.1 和 2.0。毕于运等^[27]在对我国秸秆资源数量进行估算的过程中,采用了牛若峰和刘天福主编的《农业技术经济手册(修订本)》中不同粮食作物的草谷比(水稻 0.9、小麦 1.1 和玉米 1.2)。宋大利等^[1]在对我国秸秆资源量进行统计的过程中通过文献分析得出水稻、小麦和玉米的草谷比分别为 1.0、1.1 和 1.2。不同作物的草谷比存在较大差异,同类作物的草谷比取值也受到自然条件、作物品种以及作物的生物产量和经济产量等因素的影响^[26]。刘晓永等^[14]基于相关文献资料计算出我国不同区域各种作物的草谷比:东北、长江中下游、西南和东南地区水稻的草谷比分别为 0.91、1.08、0.95 和 0.93;华北、长江中下游和西北地区小麦的草谷比分别为 1.34、1.39 和 1.10;东北、华北、西北和西南地区玉米的草谷比分别为 1.11、1.23、1.29 和 1.28。本研究采用国家发展改革委办公厅和原农业部办公厅 2015 年发布的《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中我国不同农区的主要粮食作物草谷比,这在一定程度上可以更为准确地评估我国不同省份秸秆资源量。原农业部在对我国 11 个省份有机肥料资源进行调研的基础上,出版了《中国有机肥料资源》和《中国有机肥料养分志》。在对我国作物秸秆养分资源数量进行估算的研究中,宋大利等^[1]采用的是《中国有机肥料资源》中的秸秆养分含量参数,高利伟等^[28]和本研究选取的是《中国有机肥料养分志》中的相关数据。刘晓永等^[14]基于《中国有机肥料养分志》、《中国有机肥料资源》和文献资料用加权均值得到的水稻、小麦和玉米秸秆钾含量低于《中国有机肥料养

分志》中的相关数据。

长期定位试验和多个试验点的研究结果表明,秸秆还田是培肥土壤的有效途径^[6-8]。大量研究结果显示,秸秆还田能够增加作物产量^[9-10],而且秸秆还田的增产效应随还田时间的延长而增加^[31]。同时,秸秆还田在一定条件下还有助于稻米品质的改善^[11-12]。从长期来看,秸秆还田对实现农业可持续发展具有重要意义。作物秸秆中的钾含量较高^[13],秸秆在还田条件下可以作为一种重要的钾素来源。在中性紫色水稻土和第四纪红土红壤发育的水稻土上进行的长期定位试验表明,水稻秸秆还田携入的钾与化学钾肥具有相同的营养功效^[20-21]。秸秆还田可以替代一部分化学钾肥的施用^[32-33],有利于土壤钾素养分的收支平衡,缓解土壤钾素亏缺状况^[34-39],实现农业生态系统中钾素养分的循环利用。在湖北省不同供钾水平稻田上进行的秸秆还田试验表明,在钾肥推荐用量为 K_2O 75 kg/hm^2 、小麦秸秆还田量为 4500 kg/hm^2 的条件下,水稻季高钾土壤(速效钾含量 > 150 mg/kg)和中钾土壤(速效钾含量为 100~150 mg/kg)上秸秆还田分别可以替代 49.1% 和 20.0% 的钾肥^[40]。在江西省进贤县第四纪红色粘土发育的水稻土上进行的 6 年水稻秸秆还田定位试验显示,在试验初始土壤速效钾含量为 98 mg/kg 、钾素养分总投入量为 K_2O 150 kg/hm^2 的条件下,水稻秸秆还田可替代 50.0% 的钾肥^[41]。在安徽省庐江县进行的小麦秸秆还田下钾肥减量试验表明,在速效钾含量为 137 mg/kg 的土壤条件下,与常规施钾处理(K_2O 135 kg/hm^2)相比,小麦秸秆还田(6000 kg/hm^2)基础上钾肥减量 30% 对水稻产量的影响不显著^[42]。作物秸秆在还田条件下对土壤钾素的补充有着十分重要的意义。秸秆的腐解过程受到物料性质(木质素与氮素含量之比)和气候因子(年均温和干燥指数等)的显著影响^[43]。我国不同农区主要粮食作物秸秆的腐解速率和钾养分释放速率可能会存在一定的差异。针对我国不同农区的土壤条件和种植制度,今后应进一步开展秸秆还田替代钾肥效果的田间试验,并对其进行综合评价,为秸秆还田条件下钾肥的合理施用提供依据,充分发挥作物秸秆还田的钾肥替代作用,缓解土壤钾素亏缺,维持土壤钾素平衡。

4 结论

我国主要粮食作物种植区域秸秆产量巨大,2015—2017 年期间三大粮食作物秸秆年均产量为

80213 万 t, 水稻、小麦和玉米秸秆所占比例分别为 28.9%、21.3% 和 49.8%, 三大粮食作物秸秆集中分布于华北、长江中下游和东北农区。我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供的钾养分分别为 449 万 t、193 万 t 和 479 万 t。不同省份水稻秸秆还田替代钾肥的潜力均较大, 可达 K_2O 115.0~209.5 kg/hm²。小麦秸秆还田替代钾肥潜力较大的省份有河南、河北、山东、安徽和江苏, K_2O 替代潜力为 82.3~97.1 kg/hm²。玉米秸秆还田替代钾肥潜力为 K_2O 67.2~170.7 kg/hm²。我国单位耕地面积水稻、小麦和玉米秸秆还田当季可提供的钾养分分别为 K_2O 152.6、82.4 和 124.4 kg/hm², 主要粮食作物秸秆还田可以部分替代化学钾肥的施用, 对于补充土壤钾库和维持土壤钾素收支平衡具有重要意义。

致谢: 本文部分数据来源于已发表文献, 在此对文献作者表示衷心感谢!

参 考 文 献:

- [1] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1–21.
Song D L, Hou S P, Wang X B, *et al.* Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1–21.
- [2] Chen B Q, Liu E K, Tian Q Z, *et al.* Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 429–442.
- [3] Damon P M, Bowden B, Rose T, *et al.* Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 74: 127–137.
- [4] Liu C, Lu M, Cui J, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.
- [5] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, *et al.* Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40–50.
- [6] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3040–3044.
Yang F, Dong Y, Xu M G, *et al.* Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3040–3044.
- [7] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 139–144.
Chen X J, Zhao Y N, Chai G Q, *et al.* Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 139–144.
- [8] 杨志臣, 吕貽忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 214–218.
Yang Z C, Lü Y Z, Zhang F R, *et al.* Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(3): 214–218.
- [9] 周延辉, 朱新开, 郭文善, 等. 中国地区小麦产量及产量要素对秸秆还田响应的整合分析[J]. *核农学报*, 2019, 33(1): 129–137.
Zhou Y H, Zhu X K, Guo W S, *et al.* Meta-analysis of the response of wheat yield and yield components to straw returning in China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(1): 129–137.
- [10] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 188–194.
- [11] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2736–2746.
Xu G W, Tan G L, Wang Z Q, *et al.* Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on grain yield and quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2736–2746.
- [12] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(12): 1802–1816.
Chen M Y, Li X F, Cheng J Q, *et al.* Effects of total straw returning and nitrogen application regime on grain yield and quality in mechanical transplanting japonica rice with good taste quality[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(12): 1802–1816.
- [13] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分分志[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.
- [14] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1–19.
Liu X Y, Li S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 1–19.
- [15] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 106–112.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(1): 106–112.
- [16] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(5): 886–893.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(5): 886–893.
- [17] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 等. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5):

- 1096–1102.
- Sun L M, Li C J, He P, *et al.* Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(5): 1096–1102.
- [18] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 123–132.
- Liu R L, Jin J Y, Wu R G, *et al.* Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000, 6(2): 123–132.
- [19] 李继福, 薛欣欣, 李小坤, 等. 水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 317–325.
- Li J F, Xue X X, Li X K, *et al.* Substituting effect of crop residues for potassium fertilizer in rice-rapeseed rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 317–325.
- [20] 王玄德, 石孝均, 宋光煜. 长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 302–307.
- Wang X D, Shi X J, Song G Y. Effects of long-term rice straw returning on the fertility and productivity of purplish paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(3): 302–307.
- [21] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3541–3550.
- Liao Y L, Zheng S X, Nie J, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3541–3550.
- [22] 徐洋, 杨帆, 张卫峰, 等. 2014—2016 年我国种植业化肥施用状况及问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 11–21.
- Xu Y, Yang F, Zhang W F, *et al.* Status and problems of chemical fertilizer application in crop plantations of China from 2014 to 2016[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 11–21.
- [23] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1416–1432.
- Li S T, Liu X Y, He P. Analyses on nutrient requirements in current agriculture production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1416–1432.
- [24] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 920–930.
- Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, *et al.* Farmland potassium balance in China: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 920–930.
- [25] 国家发展改革委办公厅, 农业部办公厅. 关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知[EB/OL]. (2015–12–09)[2019–12–15]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhly/201512/t20151216_1135517.html.
- Office of National Development and Reform Commission, Office of the Ministry of Agriculture. Announcement on the final assessment of planning for comprehensive utilization of crop straw[EB/OL]. (2015–12–09)[2019–12–15]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhly/201512/t20151216_1135517.html.
- [26] 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*, 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.
- [27] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 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, *et al.* Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211–217.
- [28] 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]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173–179.
- [29] Li H, Cao Y, Wang X M, *et al.* Evaluation on the production of food crop straw in China from 2006 to 2014[J]. *Bioenergy Research*, 2017, 10(3): 949–957.
- [30] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 (2016–2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016–2018.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook (2016–2018)[M]. Beijing: China Statistic Press, 2016–2018.
- [31] 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1073–1082.
- Wang D J, Chang Z Z, Wang C, *et al.* Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1073–1082.
- [32] 刘秋霞, 戴志刚, 鲁剑巍, 等. 湖北省不同稻作区域秸秆还田替代钾肥效果[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1548–1557.
- Liu Q X, Dai Z G, Lu J W, *et al.* Effect of the substitution of straw incorporation for K fertilization in different rice producing regions of Hubei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(8): 1548–1557.
- [33] 张磊, 张维乐, 鲁剑巍, 等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19): 3745–3756.
- Zhang L, Zhang W L, Lu J W, *et al.* Study of optimum potassium reducing rate of rice, wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3745–3756.
- [34] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 133–139.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133–139.
- [35] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 801–808.
- Wang H T, Jin J Y, Wang B, *et al.* Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. *Journal of Plant Nutrition*

- and Fertilizers, 2010, 16(4): 801–808.
- [36] 王志勇, 白由路, 杨俐苹, 等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 900–906.
Wang Z Y, Bai Y L, Yang L P, *et al.* Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(4): 900–906.
- [37] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1110–1118.
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [38] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 936–942.
Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, *et al.* Effect of different straw return modes on potassium balance and potassium pool in cinnamon soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(4): 936–942.
- [39] 师江澜, 李秀双, 王淑娟, 等. 长期浅耕与秸秆还田对关中平原冬小麦-夏玉米轮作土壤钾素含量及层化比率的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3322–3328.
Shi J L, Li X S, Wang S J, *et al.* Effect of long-term shallow tillage and straw returning on soil potassium content and stratification ratio in winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3322–3328.
- [40] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 292–302.
Li J F, Lu J W, Ren T, *et al.* Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 292–302.
- [41] 曾研华, 范呈根, 吴建富, 等. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 658–668.
Zeng Y H, Fan C G, Wu J F, *et al.* Replacement ratio of nitrogen and potassium fertilizer by straw incorporation in early rice under the same nitrogen, phosphorus and potassium input[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(3): 658–668.
- [42] 金梦灿, 张舒予, 郜红建, 等. 麦秆还田下钾肥减量对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1653–1660.
Jin M C, Zhang S Y, Gao H J, *et al.* Effects of reducing potassium fertilizer on rice yield and potassium use efficiency under wheat straw return condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1653–1660.
- [43] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 16–27.
Wang J Z, Lu C A, Zhang W J, *et al.* Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 16–27.