中国秸秆养分资源及有效还田的时空分布

刘晓永[1]　李书田[1,2]

（1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；2. 国际植物营养研究所（IPNI）北京办事处，北京 100081）

摘要：我国农作物秸秆资源丰富，但不同地区秸秆及其养分资源数量、还田利用状况以及随时间的变化特征不十分清楚。本研究基于官方统计数据和文献资料，分析了我国不同年代各省秸秆资源和氮磷钾养分资源量及其还田利用状况，为秸秆养分资源的合理利用和化肥零增长下作物养分管理提供科学依据和参考。结果表明：从 1980s 到 2010s 我国秸秆及其养分资源总量分别增长了 85.5% 和 104%，西北地区以及西藏、黑龙江增幅明显。华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区的秸秆及其养分资源占全国的 2/3 以上。到 2010s 秸秆资源和氮磷钾养分资源分别达到 9.0×10^8 吨和 2485.6×10^4 吨。各种作物秸秆及其养分资源所占比例各地区差异较大，2010s 谷类作物秸秆及其养分资源分别占全国的 70% 和 56.5%，东北地区谷类作物秸秆比例最高；果蔬类作物秸秆及其养分资源分别占 9.7% 和 22%，东南地区果蔬类作物秸秆比例最高；豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆及其养分资源占比相对较小。从 1980s 到 2010s，秸秆直接还田量持续增加，燃烧还田量从 1980s 到 2000s 增加，2010s 则下降。然而秸秆养分还田量则持续增加，氮磷钾还田总量从 1980s 的 583.9×10^4 吨（N 97.8×10^4 吨、P 40.1×10^4 吨和 K 446.0×10^4 吨）增加到 2010s 的 1770.7×10^4 吨（N 574.5×10^4 吨、P 105.5×10^4 吨和 K 1090.6×10^4 吨）。1980s、1990s、2000s、2010s 秸秆氮磷钾养分还田率分别为 47.9%、56.2%、60.1% 和 71.2%。内蒙古、新疆、黑龙江省秸秆养分还田率增加明显，但华北、长江中下游和四川盆地秸秆养分还田量占全国秸秆养分还田总量的 2/3 以上。

关键词：作物秸秆；秸秆养分；秸秆还田；时空分布

我国农作物秸秆资源丰富，蕴藏着大量的氮、磷、钾、中微量元素和有机物质等，是重要的有机肥资源。秸秆还田增加土壤养分，提高农田养分的利用效率，提高土壤质量，改善土壤水、肥、气、热，达到增加作物产量等诸多作用，同时还减少焚烧、丢弃秸秆出现的资源浪费和环境污染等问题。

纵观我国农作物秸秆资源研究文献，其研究热点主要集中在：秸秆资源数量、秸秆资源利用现状、秸秆综合利用技术路径及其经济效益、环境效益和社会效益，以及监测秸秆焚烧排放物等方面。但是，秸秆及其养分资源总量、种类和分布特征不清晰，其利用现状不明确，不利于国家秸秆资源政策的制定和实施。从国家尺度上，对各地区秸秆及养分资源总量及有效还田的时空分布状况的研究鲜有报道。为此，本文利用官方统计数据和大量的文献资料，系统估算、分析了我国农业发展不同阶段秸秆资源量、养分供应潜力及有效利用的时空变化特征及存在问题，为合理利用秸秆养分资源，实现“减施化肥”和“2020 年化肥零增长目标” 提供科学依据和参考，更为决策者制定秸秆资源综合利用政策和措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 估算方法

参照中国粮食主产区划分如下区域。（1）东北地区：包括黑龙江、吉林和辽宁 3 省；（2）华北地区：北京、天津、河北、河南、山东、山西 6 省（市）；（3）长江中下游地区：上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西 7 省（市）；（4）西北地区：内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆 6 省；（5）西南地区：重庆、四川、贵州、云南、西藏 5 省（市）；（6）东南地区：福建、广东、广西、海南 4 省。本研究未包括香港、澳门、台湾的数据。采用国际上通用的草谷比方法来估算中国秸秆资源量、氮磷钾养分量及其还田资源量，其计算公式如下：

秸秆及其养分资源量：

$$TS = \sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri$$

$$TN\ (\text{或}TP\text{或}TK) = \sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri \cdot Nci\ (\text{或}Pci\text{或}Kci)$$

其中：TS 为秸秆理论资源量（风干基），TN、TP、TK 分别为秸秆氮、磷、钾资源量；i 为第 i 种作物，Y 为

作物经济产量，R 为作物草谷比，Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量。

秸秆直接还田：

$$Sd=\sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri \cdot Rdi$$

$$SdN\,(\text{或}SdP\text{或}SdK)=\sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri \cdot Nci\,(\text{或}Pci\text{或}Kci) \cdot Rdi$$

其中：Sd 为秸秆直接还田量（风干基），SdN、SdP、SdK 分别为秸秆氮、磷、钾直接还田量；Rd 为秸秆直接还田率；i 为第 i 种作物，Y 为作物经济产量，R 为作物草谷比，Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量。

秸秆燃烧还田：

$$Sb=\sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri \cdot Rbi$$

$$SbN\,(\text{或}SdP\text{或}SdK)=\sum_{i=1}^{n} Yi \cdot Ri \cdot Nci\,(\text{或}Pci\text{或}Kci) \cdot Rbi \cdot Nr(\text{或}Pr\text{或}Kr)$$

其中：Sb 为秸秆燃烧还田量（风干基），SbN、SbP、SbK 分别为秸秆氮、磷、钾燃烧还田量；Rb 为秸秆燃烧还田率；i 为第 i 种作物，Y 为作物经济产量，R 为作物草谷比，Nc、Pc、Kc 分别为秸秆 N、P、K 含量，Nr、Pr、Kr 分别为秸秆燃烧后氮、磷、钾养分归还率。

秸秆养分还田总量：

StNPK= SdNPK+ SbNPK

其中：StNPK、SdNPK、SbNPK 分别为秸秆氮、磷、钾养分还田总量、直接还田量和燃烧还田量。

1.2 数据及其来源

1.2.1 统计数据

作物产量和耕地面积数据来自《中国统计年鉴》（1981–2016）和《中国农业统计年鉴》（1981–2016）。由于作物种类和种植面积年际间变化的影响，因此本研究以 10 年为周期，分别以 1980–1989、1990–1999、2000–2009 和 2010–2015 的均值表示 1980s、1990s、2000s、2010s 数据，以反应不同时期的平均差异。

农作物产量包括谷类（水稻、小麦、玉米、大麦和其他谷类）、油料（绿豆、红小豆、大豆和其他豆类）、棉麻类（棉花，黄红麻、亚麻、大麻和苎麻）、糖料（甘蔗和甜菜）、烟叶、蔬菜和瓜类（西瓜、甜瓜和其他瓜类），以及水果（香蕉、菠萝）的经济产量。

1980s 和 1990s 重庆的数据包含在四川省。1980s 和 1990s 统计数据中未包含瓜类、香蕉、和菠萝数据。

1.2.2 参数设定

本研究通过收集、整理和分析大量的文献资料、书籍或研究报告等，分地区计算各种作物草谷比的加权平均值作为该地区一定的气候和作物品种下各种作物的草谷比。参考 2000 年中国农业技术推广服务中心出版的《中国有机肥料养分志》和《中国有机肥料资源》的基础上，增加其他文献的秸秆养分含量结果，用加权均值确定各种作物的秸秆养分含量。通过查阅搜集、整理文献资料中秸秆直接还田率和燃烧还田率，用加权均值表示各年代不同地区主要作物的直接还田率和燃烧后还田率。秸秆养分还田时，直接还田的秸秆养分按 100% 还田，而燃烧后还田氮、磷、钾养分还田率则分别按 0%、82.5%、82.5% 计。

2 结果与分析

2.1 秸秆及其养分资源

通过计算得到 1980s、1990s、2000s、2010s 全国秸秆资源量分别为 4.9×10^8 吨、6.6×10^8 吨、7.4×10^8 吨、9.0×10^8 吨，30 多年来秸秆资源总量增长了 85.5%。其中，新疆、内蒙古、宁夏、甘肃等西北地区以及西藏、黑龙江增幅较为明显，西北地区从 1980s 的 3.5×10^7 吨增加到 2010s 的 12.0×10^7 吨，增长了 246%，而北京、上海、浙江几乎没有明显增长。秸秆资源主要分布华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区，这些地区的秸秆资源量占全国秸秆资源总量的 66.6–72.9%。其中，山东、河南两省秸秆资源量最大，占全国秸秆资源总量的 18.6%。

表 1 2010s 各地区主要作物秸秆资源占本地区秸秆资源总量的比例 （%）

作物	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
谷类	85.23	73.76	72.97	59.92	62.85	45.97	69.86
豆类	6.16	1.14	2.14	3.38	4.63	1.49	2.84
薯类	0.91	1.23	1.22	3.44	6.63	4.26	2.36
油料	2.58	6.70	10.66	7.67	10.49	4.49	7.53
棉麻	0.05	4.50	3.30	17.19	0.20	0.05	4.40
果蔬	4.38	12.41	9.21	7.21	8.89	16.41	9.67
其他	0.69	0.26	0.50	1.19	6.31	27.33	3.35

通过分析 2010s 不同作物秸秆资源比例（表 1），谷类作物秸秆资源占 70%，其次是果蔬类作物秸秆占 9.7%，豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆资源分别占 2.8%、2.4%、7.5%、4.4%、3.3%。不同区域各种作物秸秆资源占比有一定差异，谷类作物占比最大为东北地区，约占该地区秸秆资源总量的 85.2%，其中吉林最高，达到 89.3%；其次是华北地区、长江中下游地区，西北、西南和东南地区谷类作物占比相对较低，东南地区最低为 46%。豆类作物秸秆资源占比最多的是东北地区为 6.2%，其次是西南地区为 4.6%、西北地区为 3.4%，最小的是华北地区，仅有 1.1%。薯类作物秸秆资源所占比例最大的是西南地区，其次是东南、西北地区，华北、长江中下游和东北地区相对较低。油料作物秸秆资源占比例较大是长江中下游、西南地区，棉麻纤维作物秸秆资源占比例最大的是西北地区，果蔬作物和其他类作物秸秆资源占比例最大的是东南地区。

通过估算，1980s、1990s、2000s、2010s 全国秸秆 N、P、K 养分总量分别为 1218.5×10^4 吨、1689.2×10^4 吨、2035.5×10^4 吨、2485.6×10^4 吨，持续增加，新疆、内蒙古、宁夏、甘肃等西北地区以及西藏、黑龙江增长幅度较为明显，西北地区从 1980s 的 80.3×10^4 吨增加到 2010s 的 323.2×10^4 吨，增长了三倍以上，而北京、上海、浙江几乎没有明显增长（图 1）。1980s 秸秆 N、P、K 养分分别为 420.6×10^4 吨、66.2×10^4 吨、731.7×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 1980s 化肥消费均量 1772.2×10^4 吨的 68.8%；1990s 秸秆 N、P、K 养分分别为 605.4×10^4 吨、91.6×10^4 吨、992.2×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 1990s 化肥消费均量 3440.6×10^4 吨的 49.1%；2000s 秸

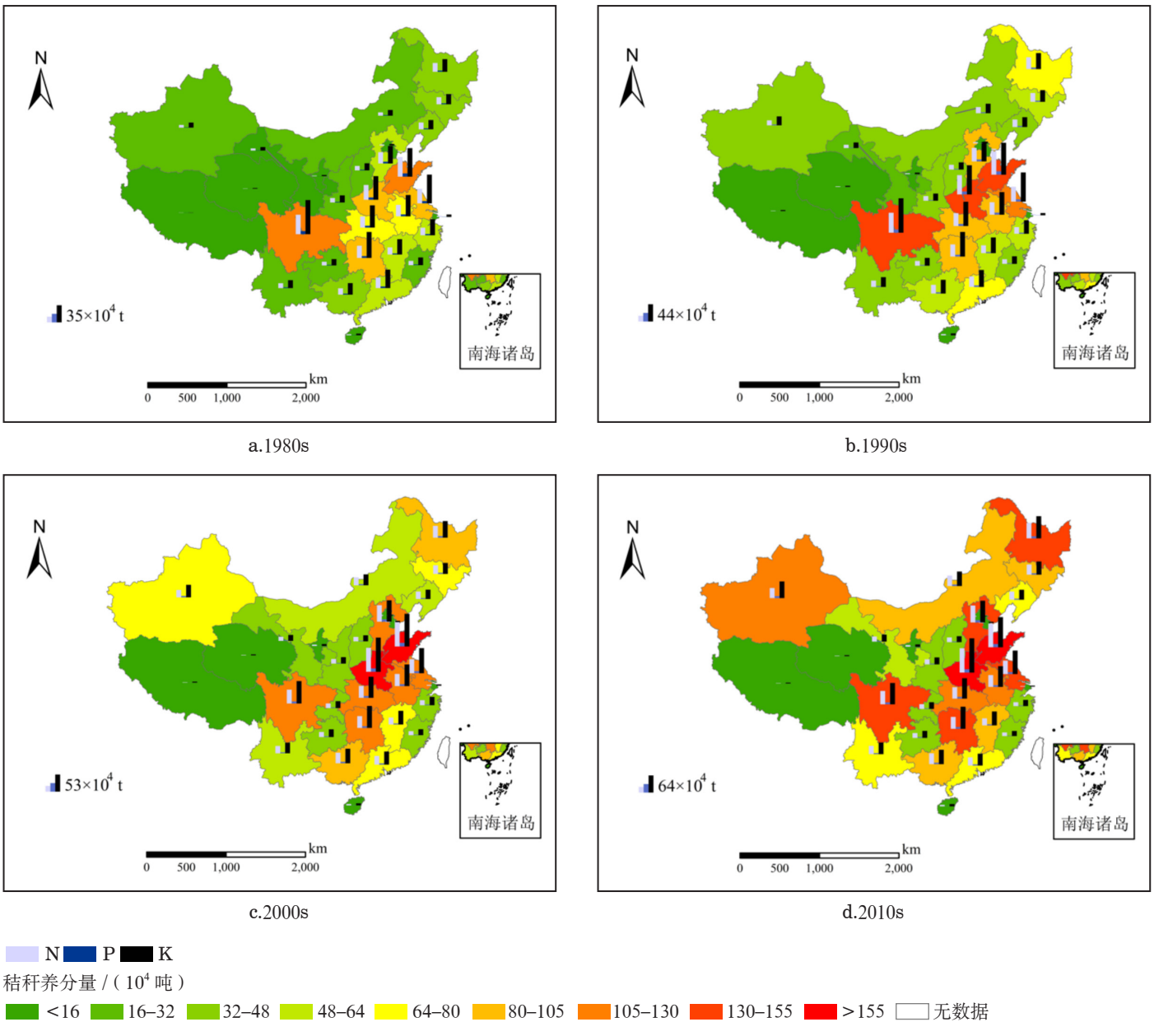

图 1 秸秆养分资源量时空分布

表 2 2010s 各地区主要作物秸秆养分资源量占本地区秸秆养分资源总量的比例（%）

作物	东北	华北	长江中下游	西北	西南	东南	全国
谷类	77.67	54.20	63.11	44.93	51.05	38.49	56.47
豆类	4.20	0.75	1.25	2.18	2.74	0.80	1.75
薯类	2.01	2.12	1.94	7.12	11.22	5.92	4.21
油料	4.16	8.29	10.37	10.91	10.20	4.64	8.57
棉麻	0.05	4.62	3.03	17.21	0.15	0.03	4.28
果蔬	11.25	29.74	19.87	16.68	19.40	31.86	21.99
其他	0.66	0.28	0.44	0.98	5.24	18.26	2.73

秆 N、P、K 养分分别为 767.3×10^4 吨、112.6×10^4 吨、1155.6×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 2000s 化肥消费均量 4723.3×10^4 吨的 43.1%；2010s 秸秆 N、P、K 养分分别增加到 947.0×10^4 吨、136.5×10^4 吨、1402.1×10^4 吨，氮磷钾养分总量是 2010s 化肥消费均量 5839.2×10^4 吨的 42.6%。可见，秸秆养分占化肥消费量的比例是逐渐下降的，主要原因是化肥消费量的增长较快。与秸秆资源量相似，秸秆养分主要分布在粮食主产区，如华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江省，这些地区的秸秆养分资源量占全国总量的 66.0–72.4%，其中，山东、河南两省秸秆养分资源量最大，占全国总量的 15.6–18.9%。

分析 2010s 不同作物秸秆养分资源量占比（表 2），谷类作物占 56.5%，其次是果蔬类作物占 22%，豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类以及其他类作物秸秆养分资源分别占总量的 1.8%、4.2%、8.6%、4.3%、2.7%。不同区域各种作物秸秆养分资源所占有比例也有较大差异，谷类作物秸秆养分占比最大的为东北地区，达到 77.7%，其次是长江中下游（63.1%）、华北地区（54.2%），东南地区最小（38.5%）；果蔬类作物秸秆养分占比最大的是东南地区（31.9%），其次是华北（29.7%）、长江中下游地区（19.9%），最小的是东北地区（11.2%）；豆类作物秸秆养分占比大的是东北地区（4.2%），其次是西南地区（2.7%）、西北地区（2.2%），最小的是华北地区（0.7%）；薯类作物秸秆养分占比最大的为西南地区，达 11.2%，其他类作物秸秆养分占比最大的是东南地区。

2.2 秸秆还田

2.2.1 直接还田

从 1980s 到 2010s，全国秸秆直接还田率从 23.9% 增加到 61.3%，秸秆直接还田量从 1980s 的 1.2×10^8 吨增加到 2010s 的 5.5×10^8 吨，直接还田的 N、P、K 量分别从 1980s 的 97.8×10^4 吨、15.2×10^4 吨、169.4×10^4 吨增加到 2010s 的 314.4×10^4 吨、46.3×10^4 吨、481.0×10^4 吨。新疆、内蒙古的秸秆养分直接还田量增幅最明显，还田的秸秆养分量分别从 1980s 的 4.1×10^4 吨、4.2×10^4 吨增加到 2010s 的 75.7×10^4 吨、50.6×10^4 吨，分别增加 17.3 和 11.0 倍；其次是黑龙江、西藏、河南、宁夏，还田的秸秆养分量分别从 1980s 的 11.4×10^4 吨、0.16×10^4 吨、19.8×10^4 吨和 0.87×10^4 吨增加到 2010s 的 104.9×10^4 吨、1.82×10^4 吨、160.7×10^4 吨和 8.56×10^4 吨，增幅分别为 8.2、10.4、7.1 和 8.8 倍。地域上秸秆及其养分还田主要在华北、长江中下游及四川盆地及 2010 后的黑龙江。

2.2.2 燃烧还田

1980s 到 2000s 秸秆燃烧还田量和燃烧后养分还田量持续缓慢增加，燃烧还田量从 2.0×10^8 吨增加到 2.8×10^8 吨，增加了 35.8%。1980s 秸秆燃烧后养分还田量达 301.5×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 24.9×10^4 吨、276.6×10^4 吨；1990s 秸秆燃烧后养分还田量达 318.2×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 26.8×10^4 吨、291.4×10^4 吨；2000s 秸秆燃烧后养分还田量达 381.9×10^4 吨，其中 P 和 K 分别为 33.0×10^4 吨、348.9×10^4 吨。这一时期秸秆燃烧及其燃烧后养分还田量主要分布在华北、长江中下游和四川盆地，这些地区秸秆燃烧及其燃烧后养分还田量分别占全国的 46.4–69.4% 和 50.0–69.8%。

2010s 秸秆燃烧及其养分还田量显著下降，燃烧还田的 P 和 K 分别为 22.3×10^4 吨和 222.8×10^4 吨，比 2000s 分别下降 32.4% 和 36.1%。其中上海、浙江、江苏、江西、北京、天津、山东秸秆燃烧及其然烧后养分还田量降幅明显，与近年来政府鼓励秸秆还田、禁止焚烧以及规模化、机械化收获等有关，还与近年来农民依赖秸秆做能源的比重逐渐减少有关。

2.2.3 还田总量

作物秸秆养分还田总量包括直接还田量和间接还田量（图 2）。1980s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 583.9×10^4 吨，还田率为 47.9%，其中秸秆 N、P 和 K 还田量分别为 97.8×10^4 吨、40.1×10^4 吨、446.0×10^4 吨，还田率为 23.3%、60.6%、61.0%。1990s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 948.6×10^4 吨，还田率为 56.2%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 224.8×10^4 吨、61.3×10^4 吨、662.6×10^4 吨，还田率为 37.1、66.9%、66.8%。2000s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 1223.7×10^4 吨，还田率为 60.1%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 314.4×10^4 吨、79.4×10^4 吨、829.9×10^4 吨，还田率为 41.0%、70.5%、71.8%。2010s 秸秆氮磷钾养分还田总量为 1770.7×10^4 吨，还田率为 71.2%，其中 N、P 和 K 还田量分别为 574.5×10^4 吨、105.5×10^4 吨、1090.6×10^4 吨，还田率为 60.7%、77.3%、77.8%。1980s、1990s、2000s、2010s 氮磷钾养分还田量相当于各年代化肥消费量的 33.0%、27.6%、25.9%、30.3%。可见，从 1980s 到 2010s 秸秆氮、磷、钾及其总还田量和还田率持续增加，其中内蒙古、新疆、黑龙江增幅较明显。从区域分布来看，秸秆养分还田主要分布在华北地区、长江中下游地区、四川盆地和黑龙江省，这些地区秸秆养分还田总量约占全国还田养分总量的 68.6–74.7%。

秸秆还田对维持土壤钾素肥力、缓解钾肥资源不足、减少钾肥投入尤为重要。例如 2010s 通过秸秆还田的钾素全国平均为 80.7 千克 / 公顷，而 2015 年通过化肥施用的钾素约为 80 千克 / 公顷，相当于每年施钾量。秸秆直接还田后，养分释放需要一定的时间，因此在研究秸秆还田替代化肥时应考虑秸秆还田后养分的当季有效性，避免简

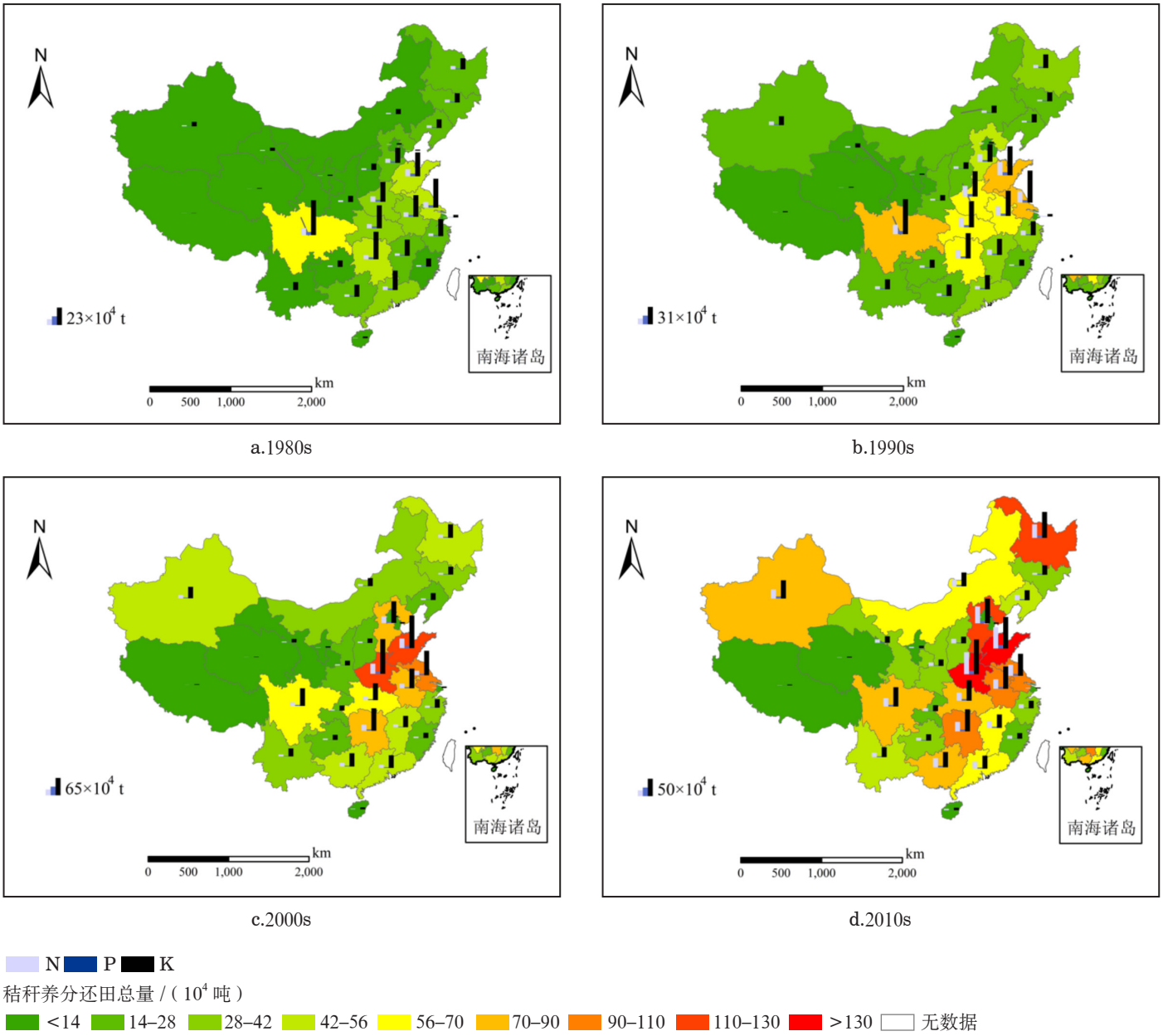

图 2 秸秆养分年均还田量时空分布

单的等养分替代导致养分供应不足而影响作物生长和产量、品质。秸秆养分当季释放率对秸秆还田后调整当季化肥施用量以及实现秸秆与肥料合理配施都非常重要。

3 结论

（1）从 1980s 到 2010s 我国秸秆及其养分资源分别增长了 85.5% 和 104%，西北地区、西藏、黑龙江增幅明显。到 2010s 秸秆资源和氮磷钾养分资源分别达到 9.0×10^8 吨和 2485.6×10^4 吨，2/3 以上分布在华北、长江中下游、四川盆地以及黑龙江地区。

（2）2010s 谷类作物秸秆及其养分资源占总资源量的比例最大，分别达 70% 和 56.5%，东北地区最明显；其次是果蔬类作物秸秆及其养分资源，分别占 9.7%、22%，主要分布在东南地区；豆类、薯类、油料类、棉麻纤维类和其他类作物秸秆及其养分资源占比相对较小。

（3）从 1980s 到 2010s，秸秆氮磷钾养分还田量持续增加，还田总量从 583.9×10^4 吨增加到 1770.7×10^4 吨，华北、长江中下游和四川盆地秸秆养分还田量占全国秸秆养分还田总量的 2 / 3 以上。

参考文献（略）

详情参见：农业工程学报 , 2017, 33(21):1–19.