

黑龙江垦区农田土壤养分平衡分析与评价

楚天舒¹, 王德睿², 韩鲁佳¹, 杨增玲^{1*}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670)

摘要: 养分资源高效利用是农业绿色发展的重要环节。黑龙江垦区是中国粮食主产区之一, 对其进行农田土壤养分平衡评价至关重要。该研究以黑龙江垦区为研究对象, 采用农田土壤养分平衡方法, 分析与评价其 2000—2018 年农田土壤氮、磷、钾养分输入与输出情况。结果表明: 1) 2000—2018 年黑龙江垦区农田土壤氮、磷、钾输入与输出整体呈现“平稳-增长-下降后平稳”的趋势, 养分输入以化肥为主, 养分输出以籽粒和秸秆为主。2) 黑龙江垦区农田土壤单位面积养分输入量较为稳定, 并且所带来的经济效益在增加。3) 2017 年以来黑龙江垦区农田土壤氮和钾处于养分平衡状态, 而磷处于养分盈余状态。2018 年黑龙江垦区氮、磷、钾利用效率分别为 51.03%、27.98%、10.04%。建议黑龙江垦区大力推广有机无机肥配施, 开展农田土壤养分平衡长期调查与监测, 促进区域农业绿色发展。

关键词: 农田; 土壤; 养分平衡; 黑龙江垦区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.003

中图分类号: S158.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-15-0019-09

楚天舒, 王德睿, 韩鲁佳, 等. 黑龙江垦区农田土壤养分平衡分析与评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 19-27. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.003 <http://www.tcsae.org>

Chu Tianshu, Wang Derui, Han Lujia, et al. Analysis and evaluation of farmland soil nutrient balance in Heilongjiang Land Reclamation Areas, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 19-27. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.003 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在农业生产中, 氮、磷、钾等肥料投入不但对农作物稳产增产起到至关重要的作用^[1], 而且与农业生态环境有着密切的关系。如肥料过量施用会造成活性氮损失^[2]、温室气体排放增加^[3]、水体污染^[4]等环境问题。因此, 为促进农业绿色发展, 农田土壤养分资源收支平衡的评价与分析成为当下研究重点。

Bouwman 等^[5]在全球尺度上, 通过分析作物-畜牧生产系统的氮、磷平衡发现, 1950—2000 年间全球养分盈余量持续增加, 氮盈余 1 380 亿 kg/a, 磷盈余 110 亿 kg/a。未来需要科学协调作物种植与畜禽养殖关系, 增大粪肥的施用量。MacDonald 等^[6]针对 123 种作物的磷养分平衡分析也得到类似结论。在国家尺度上, He 等^[7]评估了 1984—2014 年中国农田土壤氮平衡的时空变化, 结果发现土壤氮整体处于盈余状态。其中, 长江中下游地区的氮盈余量最大, 东北地区氮盈余量最小。因此, 建议减少氮肥的施用量, 降低因肥料损失带来的环境污染。Li 等^[8]研究发现 1950—2010 年中国施用氮肥增加了谷物的产量, 但氮肥生产力呈现下降趋势。Pathak 等^[9]对印度农田土壤氮、磷、钾养分平衡进行计算分析, 发现化肥提供的氮、磷、钾质量分数分别为 64%、78%、26%。

Spieess^[10]对瑞士农田土壤养分平衡评价发现减少了化肥的施用, 氮、磷、钾养分盈余均存在一定的减少, 建议未来以粪肥代替更多化肥。Mishima 等^[11]对日本主要农作物农田土壤养分平衡进行评估, 比较分析不同作物养分利用情况。综上所述可知, 运用农田土壤养分平衡方法对某一地区农业生产系统的氮、磷、钾养分输入与输出进行分析与评价, 可从宏观层面上掌握区域内农作物养分利用情况, 有助于提出优化养分管理措施与方案, 提高系统养分利用效率。

黑龙江垦区作为中国农业机械化与现代化生产的典型代表、中国粮食主产区之一。自 1949 年起累计生产粮食达到 4.1 亿 t。其中, 2018 年粮食产量为 2 279.64 万 t, 占全国总产量的 3.47%。养分高效利用与管理是粮食安全的重要基础。但通过中外文献检索发现, 尚未有针对黑龙江垦区农田土壤养分平衡的研究。因此, 本文以黑龙江垦区为研究对象, 分析并评价其 2000—2018 年农田土壤氮、磷、钾养分的输入与输出变化情况, 提出相关养分管理建议, 促进养分的高效率利用, 保障粮食安全与农业绿色发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑龙江垦区位于中国东北部小兴安岭南麓、松嫩平原和三江平原地区 (123°32'~134°33'E, 43°56'~50°21'N)。辖区土地总面积 554 万 hm², 下辖 9 个管理局, 113 个农牧场, 分布在黑龙江省 12 个市。黑龙江垦区地处世界三大黑土带之一, 土壤肥沃, 耕层厚, 腐殖

收稿日期: 2020-03-13 修订日期: 2020-06-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFE0204600); 教育部创新团队发展计划项目 (IRT-17R105)

作者简介: 楚天舒, 博士生, 主要从事农业工程研究。Email: chuts@cau.edu.cn

*通信作者: 杨增玲, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程研究。

Email: yangzengling@cau.edu.cn

质含量高, 土壤类型以黑土、黑钙土、暗棕壤、草甸土、水稻土等为主。2018 年, 黑龙江垦区农业总产值 691.85 亿元, 粮食总产量为 2 279.64 万 t, 种植面积 289.30 万 hm^2 , 其中, 水稻、玉米、大豆为主要农作物, 种植面积分别为 155.79、70.86 和 54.59 万 hm^2 , 分别占总种植面积的 53.85%、24.49% 和 18.87%。此外, 黑龙江垦区种植的农作物还有小麦、高粱、谷子、大麦、马铃薯、油菜、麻类、甜菜、烟叶、蔬菜、瓜类等。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本文中, 肥料(氮肥、磷肥、钾肥、复合肥、有机肥)施用量、农作物总产量、农作物种植面积、农作物单产、种植业总产值等主要基础计算数据均来自《黑龙江垦区统计年鉴 2001—2019》。此外, 肥料养分^[12]、灌溉水养分^[13-16]、大气干湿沉降^[17]、生物固氮^[18-19]、籽粒干物质比例^[20]、籽粒养分^[21]、秸秆利用比例^[22]、草谷比^[20]、秸秆养分^[20,23]、养分损失系数^[24-26]等的数据主要来自文献整理。

1.2.2 农田土壤养分平衡计算方法

农田土壤养分平衡法是对农田土壤养分(氮、磷、钾等)输入量与输出量进行计算与分析, 用于评价表观养分利用与盈余情况^[27]。根据农田土壤养分平衡方法定义, 确定农田土壤养分平衡研究内容。其中, 养分输入途径主要包括化学肥料、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降、生物固氮(只针对氮平衡); 养分输出途径主要包括农作物籽粒、农作物秸秆和养分损失。

1) 养分输入

在养分输入部分, 农田土壤氮输入途径包括化学氮肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降、生物固氮^[28], 计算式如下:

$$N_{\text{in}} = N_{\text{cfer}} + N_{\text{ofer}} + N_{\text{seed}} + N_{\text{irr}} + N_{\text{str}} + N_{\text{dep}} + N_{\text{bnf}} \quad (1)$$

式中 N_{in} 为农田土壤的氮输入总量, kg; N_{cfer} 、 N_{ofer} 、 N_{seed} 、 N_{irr} 、 N_{str} 、 N_{dep} 、 N_{bnf} 分别为化学氮肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降、生物固氮所带来的氮输入量, kg, 计算式如下:

$$\begin{cases} N_{\text{cfer}} = N_{\text{nfer}} + \text{AD}_{\text{cf}} \cdot \text{TN}_{\text{cf}} \\ N_{\text{ofer}} = \text{AD}_{\text{on}} \cdot \text{TN}_{\text{on}} \\ N_{\text{seed}} = \sum (S_i \cdot U_i \cdot \text{DRY}_i \cdot \text{TN}_i) \\ N_{\text{irr}} = (S_{\text{rice}} \cdot V_{\text{rice}} + S_{\text{soy}} \cdot V_{\text{soy}} + S_{\text{corn}} \cdot V_{\text{corn}}) \cdot \rho \cdot \text{TN}_{\text{irr}} \times 10^{-6} \\ N_{\text{str}} = \sum (Y_{g,i} \cdot \text{DRY}_i \cdot R_{\text{S/G},i} \cdot \text{TN}_{s,i} \cdot A_i) \\ N_{\text{dep}} = S_{\text{total}} \cdot A_{\text{ndep}} \\ N_{\text{bnf}} = S_{\text{soy}} \cdot B_{\text{soy}} + S_{\text{rice}} \cdot B_{\text{rice}} + S_{\text{corn}} \cdot B_{\text{corn}} + S_{\text{wheat}} \cdot B_{\text{wheat}} \end{cases} \quad (2)$$

式中 N_{nfer} 为氮肥施用量(折纯量), kg; AD_{cf} 分别为复合肥施用量(折纯量), kg; TN_{cf} 为复合肥的氮质量分数, %; AD_{on} 为有机肥施用量, kg; TN_{on} 为有机肥的氮质量分数, 1.78%; S_i 为第 i 种农作物的种植面积, hm^2 ; U_i 为第 i 种农作物的播种量, kg/hm^2 ; DRY_i 为第 i 种农

作物籽粒的干物质比例; TN_i 为第 i 种农作物籽粒的氮质量分数; S_{rice} 、 S_{soy} 、 S_{corn} 分别为水稻、大豆和玉米种植面积, hm^2 ; V_{rice} 、 V_{soy} 、 V_{corn} 为水稻、大豆和玉米灌溉水量, m^3/hm^2 , 采用 FAO 推荐的 CropWat 模型计算而得; ρ 为灌溉水密度; TN_{irr} 为灌溉水的氮质量分数, 1.82 mg/kg ; $Y_{g,i}$ 为第 i 种农作物籽粒产量, kg; $R_{\text{S/G},i}$ 第 i 种农作物的草谷比; A_i 为秸秆还田率; S_{total} 为农作物总种植面积, hm^2 ; A_{ndep} 为单位面积大气氮干湿沉降量, 27.6 kg/hm^2 ; B_{soy} 为大豆的共生固氮量, 126.83 kg/hm^2 ; B_{rice} 为水稻的非共生固氮量, 30 kg/hm^2 ; B_{corn} 为玉米的非共生固氮量, 15 kg/hm^2 ; S_{wheat} 为小麦种植面积, hm^2 ; B_{wheat} 为小麦的非共生固氮量, 15 kg/hm^2 。

农田土壤磷输入途径包括化学磷肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降^[28], 计算式如下:

$$P_{\text{in}} = P_{\text{cfer}} + P_{\text{ofer}} + P_{\text{seed}} + P_{\text{irr}} + P_{\text{str}} + P_{\text{dep}} \quad (3)$$

式中 P_{in} 为农田土壤的磷输入总量, kg; P_{cfer} 、 P_{ofer} 、 P_{seed} 、 P_{irr} 、 P_{str} 、 P_{dep} 分别为化学磷肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降所带来的磷输入量, kg, 计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{cfer}} = 0.44 \times (P_{\text{pfer}} + \text{AD}_{\text{cf}} \cdot \text{TP}_{\text{cf}}) \\ P_{\text{ofer}} = 0.44 \times \text{AD}_{\text{on}} \cdot \text{TP}_{\text{on}} \\ P_{\text{seed}} = \sum (S_i \cdot U_i \cdot \text{DRY}_i \cdot \text{TP}_i) \\ P_{\text{irr}} = (S_{\text{rice}} \cdot V_{\text{rice}} + S_{\text{soy}} \cdot V_{\text{soy}} + S_{\text{corn}} \cdot V_{\text{corn}}) \cdot \rho \cdot \text{TP}_{\text{irr}} \times 10^{-6} \\ P_{\text{str}} = \sum (Y_{g,i} \cdot \text{DRY}_i \cdot R_{\text{S/G},i} \cdot \text{TP}_{s,i} \cdot A_i) \\ P_{\text{dep}} = 0.44 \times S_{\text{total}} \cdot A_{\text{pdep}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 0.44 为五氧化二磷(P_2O_5)中磷(P)的质量分数; P_{pfer} 为磷肥施用量(折纯量), kg; TP_{cf} 为复合肥的磷质量分数; TP_{on} 为有机肥的磷质量分数, 0.77%; TP_i 和 $\text{TP}_{s,i}$ 分别为第 i 种农作物籽粒和秸秆的磷质量分数; TP_{irr} 为灌溉水的磷质量分数, 1.497 mg/kg ; A_{pdep} 为单位面积大气磷干湿沉降量, 1.52 kg/hm^2 。

农田土壤钾输入途径包括化学钾肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降^[29], 计算式如下:

$$K_{\text{in}} = K_{\text{cfer}} + K_{\text{ofer}} + K_{\text{seed}} + K_{\text{irr}} + K_{\text{str}} + K_{\text{dep}} \quad (5)$$

式中 K_{in} 为农田土壤的钾输入总量, kg; K_{cfer} 、 K_{ofer} 、 K_{seed} 、 K_{irr} 、 K_{str} 、 K_{dep} 分别为化学钾肥、有机肥、种子、灌溉水、秸秆还田、大气干湿沉降所带来的钾输入量, kg, 计算公式如下:

$$\begin{cases} K_{\text{cfer}} = 0.83 \times (K_{\text{kfer}} + \text{AD}_{\text{cf}} \cdot \text{TK}_{\text{cf}}) \\ K_{\text{ofer}} = 0.83 \times \text{AD}_{\text{on}} \cdot \text{TK}_{\text{on}} \\ K_{\text{seed}} = \sum (S_i \cdot U_i \cdot \text{DRY}_i \cdot \text{TK}_i) \\ K_{\text{irr}} = (S_{\text{rice}} \cdot V_{\text{rice}} + S_{\text{soy}} \cdot V_{\text{soy}} + S_{\text{corn}} \cdot V_{\text{corn}}) \cdot \rho \cdot \text{TK}_{\text{irr}} \times 10^{-6} \\ K_{\text{str}} = \sum \{Y_{g,i} \cdot \text{DRY}_i \cdot R_{\text{S/G},i} \cdot \text{TK}_{s,i} \cdot (A_i + A_f)\} \\ K_{\text{dep}} = 0.83 \times S_{\text{total}} \cdot A_{\text{kdep}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 0.83 为氧化钾(K_2O)中钾(K)的质量分数; K_{kfer} 为钾肥施用量(折纯量), kg; TK_{cf} 为复合肥的钾质量

分数； TK_{on} 为有机肥的钾质量分数，0.78%。 TK_i 和 $TK_{s,i}$ 分别为第 i 种农作物籽粒和秸秆的钾质量分数； TK_{irr} 为灌溉水的钾质量分数，2.245 mg/kg； A_f 为秸秆焚烧率； A_{kdep} 为单位面积大气钾干湿沉降，8.3 kg/hm²。

2) 养分输出

在养分输出部分，农田土壤氮输出途径包括农作物籽粒的氮输出、农作物秸秆的氮输出、氨挥发带来的氮损失、地表径流带来的氮损失、地下淋溶带来的氮损失、

$$\begin{cases} N_{out-grain} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot TN_i) \\ N_{out-straw} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot R_{S/G,i} \cdot TN_{s,i}) \\ N_{NH_3} = (N_{nfer} + AD_{cf} \cdot TN_{cf}) \cdot N_{NH_3-cfer} + (AD_{on} \cdot TN_{on}) \cdot N_{NH_3-ofe} \\ N_{sur} = (N_{nfer} + AD_{cf} \cdot TN_{cf} + AD_{on} \cdot TN_{on}) \cdot A_{nfsur} + S_{rice} \cdot A_{npsur} + (S_{total} - S_{rice}) \cdot A_{nds} \\ N_{sub} = (N_{nfer} + AD_{cf} \cdot TN_{cf} + AD_{on} \cdot TN_{on}) \cdot A_{nfsub} + S_{total} \cdot A_{nsub} \\ N_{den} = (N_{nfer} + AD_{cf} \cdot TN_{cf}) \cdot A_{den-cfer} + AD_{on} \cdot TN_{on} \cdot A_{den-ofe} \end{cases} \quad (8)$$

式中 N_{NH_3-cfer} 为化学氮肥的氨挥发损失系数，21.3%； N_{NH_3-ofe} 为有机肥的氨挥发损失系数，23.0%； A_{nfsur} 为肥料氮地表径流损失系数，0.343%； A_{npsur} 为水田土壤氮地表径流损失系数，3.225 kg/hm²； A_{nds} 为旱地土壤氮地表径流损失系数，2.345 kg/hm²。 A_{nfsub} 为肥料氮地下淋溶损失系数，0.5276%； A_{nsub} 为土壤氮地下淋溶损失系数，3.1605 kg/hm²。 $A_{den-cfer}$ 为化学氮肥的硝化反硝化导致氮损失系数，1.1%； $A_{den-ofe}$ 为有机肥的硝化反硝化导致氮损失系数，1.0%。

农田土壤磷输出途径包括农作物籽粒的磷输出、农作物秸秆的磷输出、地表径流带来的磷损失^[28]，计算式如下：

$$P_{out} = P_{out-grain} + P_{out-straw} + P_{sur} \quad (9)$$

式中 P_{out} 为农田土壤的磷输出总量，kg； $P_{out-grain}$ 、 $P_{out-straw}$ 、 P_{sur} 分别为农作物籽粒的磷输出量、农作物秸秆的磷输出量和地表径流带来的磷损失量，kg，计算式如下：

$$\begin{cases} P_{out-grain} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot TP_i) \\ P_{out-straw} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot R_{S/G,i} \cdot TP_{s,i}) \\ P_{sur} = (P_{pfer} + AD_{cf} \cdot TP_{cf} + AD_{on} \cdot TP_{on}) \cdot A_{pfsur} + S_{rice} \cdot A_{ppsur} + (S_{total} - S_{rice}) \cdot A_{pdsur} \end{cases} \quad (10)$$

式中 A_{pfsur} 为肥料磷地表径流系数，0.1618%； A_{ppsur} 为水田磷地表径流损失系数，0.135 kg/hm²； A_{pdsur} 为旱地磷地表径流损失系数，0.12 kg/hm²。

农田土壤钾输出途径包括农作物籽粒的钾输出、农作物秸秆的钾输出、地表径流带来的钾损失^[29]，计算式如下：

$$K_{out} = K_{out-grain} + K_{out-straw} + K_{sur} \quad (11)$$

式中 K_{out} 为农田土壤的钾输出总量，kg； $K_{out-grain}$ 、 $K_{out-straw}$ 、 K_{sur} 分别为农作物籽粒的钾输出量、农作物秸秆的钾输出量、地表径流带来的钾损失量，kg，计算公式如下：

$$\begin{cases} K_{out-grain} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot TK_i) \\ K_{out-straw} = \sum(Y_{g,i} \cdot DRY_i \cdot R_{S/G,i} \cdot TK_{s,i}) \\ K_{sur} = S_{rice} \cdot A_{sur} \end{cases} \quad (12)$$

式中 A_{sur} 为地表径流所带来的钾损失系数，5.1 kg/hm²。

硝化反硝化带来的氮损失^[28]，计算式如下：

$$N_{out} = N_{out-grain} + N_{out-straw} + N_{NH_3} + N_{sur} + N_{sub} + N_{den} \quad (7)$$

式中 N_{out} 为农田土壤的氮输出总量，kg； $N_{out-grain}$ 、 $N_{out-straw}$ 、 N_{NH_3} 、 N_{sur} 、 N_{sub} 、 N_{den} 分别为农作物籽粒的氮输出量、农作物秸秆的氮输出量、氨挥发带来的氮损失、地表径流带来的氮损失、地下淋溶带来的氮损失和硝化反硝化带来的氮损失，kg，计算式如下：

1.2.3 农田土壤养分平衡评价指标

根据农田土壤养分平衡计算结果，本文设定单位面积养分输入、单位产值养分输入、养分利用效率、养分盈亏量、养分盈亏率 5 个评价指标，对区域农田土壤养分的输入、输出和平衡情况进行评价与分析。其中，养分利用效率由籽粒养分输出量除以养分输入总量计算获得，反映农田土壤养分输入最终转化为作物籽粒的比例。养分盈亏量由养分输入与输出的差值除以总面积计算获得，反映农田土壤单位面积的养分盈亏量。养分盈亏率是由养分输入与输出的差值除以养分输入总量计算获得，当 $-10\% \leq$ 养分盈亏率 $\leq 10\%$ ，为养分平衡；养分盈亏率 $< -10\%$ ，为养分亏缺；养分盈亏率 $> 10\%$ ，为养分盈余^[30]。

2 结果与分析

2.1 农田土壤养分输入

2000—2018 年黑龙江垦区农田土壤氮、磷、钾输入呈现“平稳-增长-下降后平稳”的趋势（图 1）。在氮输入部分（图 1a），2000 年农田土壤氮输入仅为 4.41×10^8 kg，2003—2014 年农田土壤氮输入快速增长，平均年增长率达到 6.43%，2014 年农田土壤氮输入达到最高值 8.43×10^8 kg。由于畜禽养殖量快速下降，有机肥还田量也快速下降，2015 年仅为 1.02×10^8 kg，较 2014 年减少 63.20%。2015—2018 年农田土壤氮输入量保持平稳，2018 年为 6.55×10^8 kg。从组成结构上来看，化学氮肥、有机肥和生物固氮为农田土壤氮输入的主要途径，历年平均占农田土壤氮输入总量的 30.17%、21.67% 和 21.08%。在磷输入部分（图 1b），2018 年农田土壤磷输入为 1.27×10^8 kg。从组成结构上来看，化学磷肥为农田土壤磷输入的主要途径，历年平均占农田土壤磷输入总量的 70.86%。在钾输入部分（图 1c），2018 年农田土壤钾输入为 5.29×10^8 kg。从组成结构上来看，秸秆还田为农田土壤钾输入的主要途径，历年平均占农田土壤钾输入总量的 71.81%。

从数量来看，农田土壤养分输入量从大到小依次为氮、钾、磷。从结构来看，氮输入途径较为分散，主要途径为化学肥料、有机肥和生物固氮；磷输入和钾输入途径较为集中，主要途径分别为化学肥料和秸秆还田。

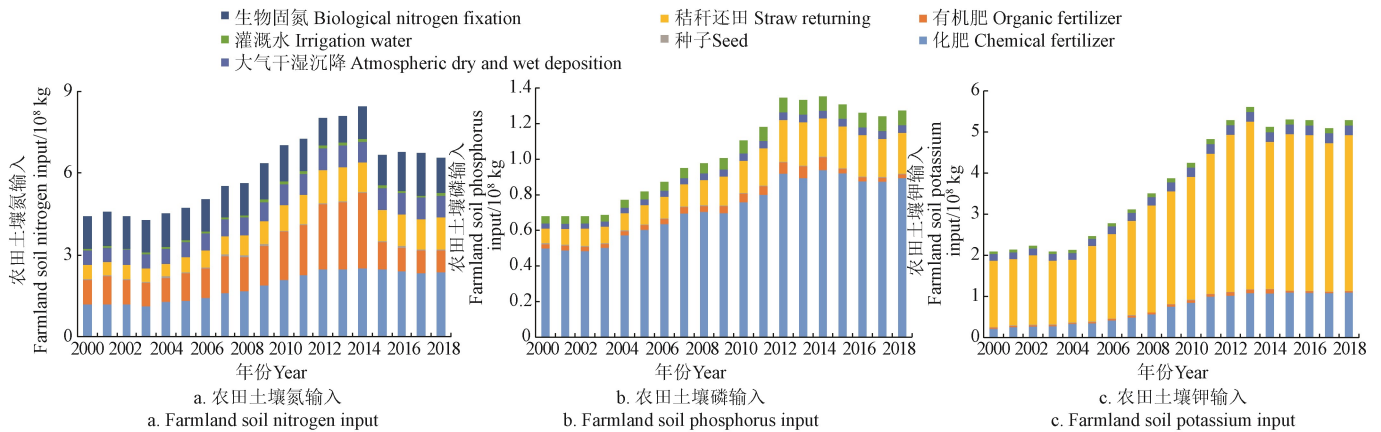


图1 黑龙江垦区农田土壤养分输入

Fig.1 Farmland soil nutrition input in Heilongjiang Land Reclamation Area

2.2 农田土壤养分输出

2000—2018 年黑龙江垦区农田土壤氮、磷、钾输出呈现“平稳-增长-下降后平稳”的趋势(图2)。在氮输出部分(图2a), 2000 年农田土壤氮输出为 3.16×10^8 kg, 2003—2012 年农田土壤氮输出快速增长, 平均年增长率达到 8.66%, 2012 年农田土壤氮输出达到最高值 6.64×10^8 kg, 2018 年为 6.12×10^8 kg。从组成结构上来看, 籽粒和秸秆为农田土壤氮输出的主要途径, 历年平均占农田土壤氮输出总量的 52.96% 和 29.53%。在磷输出部分

(图2b), 2018 年农田土壤磷输出为 7.34×10^7 kg。从组成结构上来看, 籽粒和秸秆为农田土壤磷输出的主要途径, 历年平均分别占农田土壤磷输出总量的 48.34% 和 50.86%。在钾输出部分(图2c), 2018 年农田土壤钾输出为 4.88×10^8 kg。从组成结构上来看, 秸秆为农田土壤钾输出的主要途径, 历年平均占农田土壤钾输出总量的 85.55%。此外, 2013 年和 2016 年农田土壤氮、磷和钾输出均下降, 主要是由于玉米产量下降, 导致以籽粒和秸秆形式的养分输出量下降。

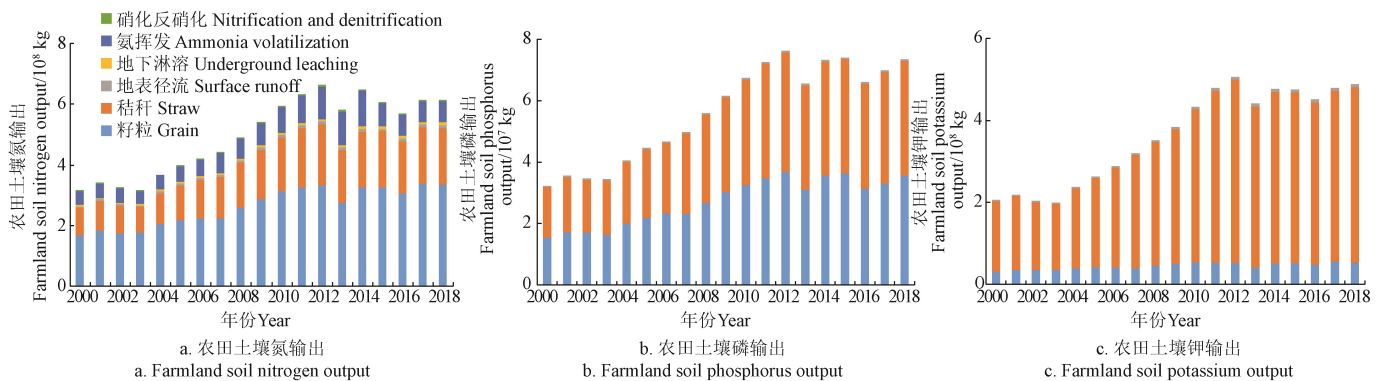


图2 黑龙江垦区农田土壤养分输出

Fig.2 Farmland soil nutrition output in Heilongjiang Land Reclamation Area

从数量来看, 农田土壤养分输出量从大到小依次为氮、钾、磷。从结构来看, 氮输出、磷输出和钾输出途径较为集中, 氮输出和磷输出的主要途径为籽粒和秸秆; 钾输出的主要途径为秸秆。此外, 以氨挥发途径带来的氮输出应引起重视。

2.3 农田养分平衡评价

2.3.1 单位面积养分输入

黑龙江垦区单位面积养分输入量从大到小依次为: 单位面积氮输入、单位面积钾输入、单位面积磷输入(图3a)。单位面积氮输入和钾输入的变化趋势相近。自2000年起逐渐增大, 并分别于2014年和2013年达到最大值, 分别为 296.61 、 197.83 kg/hm^2 , 随后下降, 2018年分别为 228.08 、 183.98 kg/hm^2 。而单位面积磷输入变化

较小, 2018 年为 44.32 kg/hm^2 。综合来看, 2000—2018 年黑龙江垦区农田土壤单位面积养分输入量较为稳定。

2.3.2 单位产值养分输入

黑龙江垦区单位产值养分输入量从大到小依次为: 单位产值氮输入、单位产值钾输入、单位产值磷输入(图3b)。2000—2018 年单位产值氮、磷和钾输入整体呈下降趋势。其中单位产值磷输入变化范围较小, 2018 年为 18.43 $\text{kg}/\text{万元}$ 。而单位产值氮和钾输入变化趋势基本一致, 均呈先剧烈波动后平稳下降的趋势, 但二者变化范围差别较大, 2000 年, 单位产值氮输入约为单位产值钾输入的 2 倍, 2018 年二者相差不大, 分别为 94.86 和 76.52 $\text{kg}/\text{万元}$ 。整体而言, 2000—2018 年黑龙江垦区农田土壤养分输入所带来的经济效益显著增加。

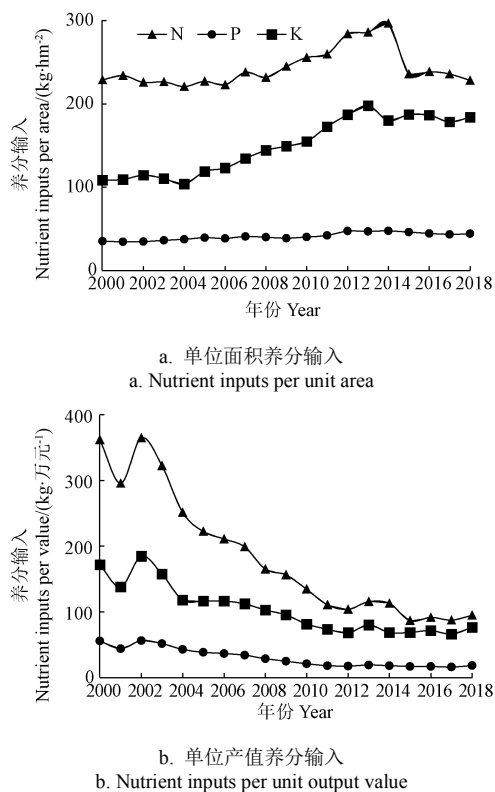


图 3 黑龙江垦区单位面积和单位产值养分输入

Fig.3 Nutrient inputs per unit area and per unit output value in Heilongjiang Land Reclamation Area

2.3.3 养分利用效率

黑龙江垦区养分利用效率从大到小依次为氮、磷、钾，不同养分利用效率的变化趋势表现不同（图 4）。其中磷利用效率在 22.69%~30.11% 间呈波动变化，至 2018 年为 27.98%。氮利用效率先下降后上升，变化范围为 34.02%~51.03%，至 2018 年为 51.03%。钾利用效率缓慢波动下降，变化范围为 7.36%~18.42%，至 2018 年为 10.04%。相比而言，钾的利用效率偏低，这与钾主要以秸秆途径输出有关。

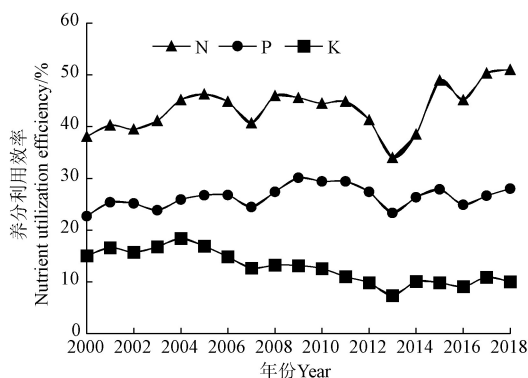


图 4 黑龙江垦区养分利用效率

Fig.4 Nutrient utilization efficiency in Heilongjiang Land Reclamation Area

2.3.4 养分盈亏量与养分盈亏率

对于养分盈亏量，黑龙江垦区养分盈亏量从大到小依次为氮盈亏量、磷盈亏量、钾盈亏量（图 5a）。氮盈

亏量和钾盈亏量的变化趋势相近。自 2000 年起波动变化，并分别于 2018 年和 2004 年达到最小值，分别为 15.08、-12.05 kg/hm²。而磷盈亏量变化较小，变化范围为 15.09~23.91 kg/hm²。对于养分盈亏率，黑龙江垦区氮、磷和钾盈亏率的变化趋势相近，均呈波动变化，但养分盈亏率大小显著不同，其中氮和钾变化范围分别为 7.08%~39.68% 和 -10.40%~27.09%，2017 年以来处于养分平衡状态，而磷盈亏率变化 62.70%~110.67% 之间，处于养分盈余状态。（图 5b），这与农田输入的磷素易被土壤固定有关^[31]。

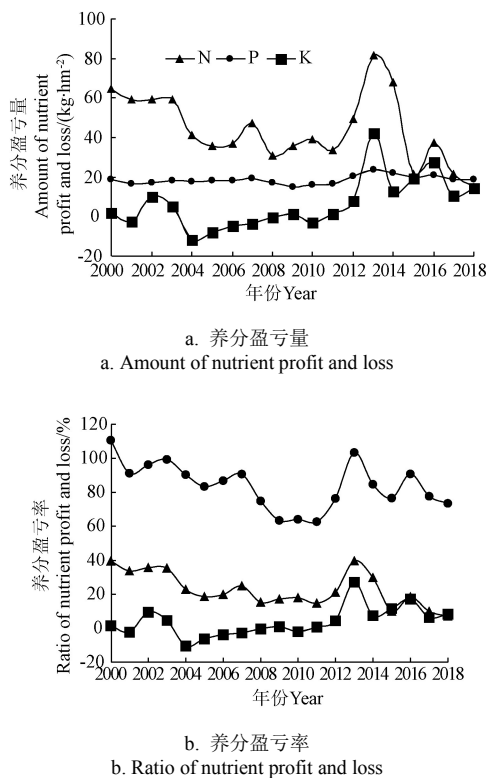


图 5 黑龙江垦区养分盈亏量和养分盈亏率

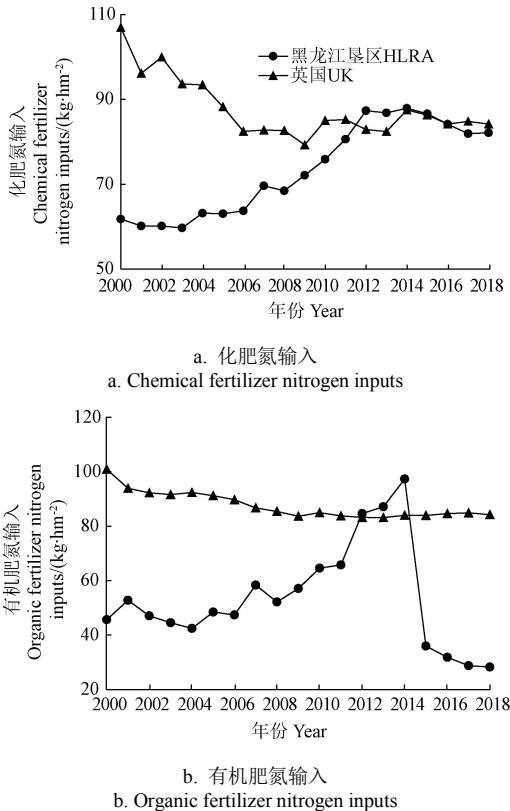
Fig.5 Amount and ratio of nutrient profit and loss in Heilongjiang Land Reclamation Area

2.3.5 中外对比分析

1) 氮肥施用

氮肥投入作为农田土壤养分输入的重中之重，与粮食产量密切相关。化肥氮和有机肥氮作为氮肥两大组成部分，协调好两者的关系，显得极其重要。英国农业现代化程度高，并对农业面源污染防治高度重视，长期开展土壤养分调查与管理工作，其农田土壤养分平衡调查数据可追溯到 1990 年。根据英国环境、粮食和农村事务部官网数据，整理计算获得英国 2000—2018 年单位面积化肥氮输入和单位面积有机肥氮输入，并与黑龙江垦区的数据比较分析。在化肥施用方面（图 6a），2000—2011 年，黑龙江垦区单位面积化肥氮输入低于英国；2012—2018 年，黑龙江垦区与英国单位面积化肥氮输入基本相当，输入量变化也趋于稳定。这说明近年来黑龙江垦区在化学氮肥施用与管理趋于成熟。在有机肥施用方面（图 6b），英国单位面积有机氮输入量相对稳定，而黑龙江

垦区单位面积有机氮输入量先增长后下降, 尤其 2017—2018 年黑龙江垦区单位面积有机氮输入是英国的三分之一。这说明黑龙江垦区有机肥施用量不稳定且相对较低。



注: HLRA 为黑龙江垦区, 下同。英国的数据来源于英国环境、粮食和农村事务部官网 (<https://www.gov.uk/government/statistics/uk-and-england-soil-nutrient-balances-2018>)。

Note: HLRA is Heilongjiang Land Reclamation Area. Same as below. Date of UK was collected from the Department for Environment, Food & Rural Affairs website (<https://www.gov.uk/government/statistics/uk-and-england-soil-nutrient-balances-2018>).

图6 黑龙江垦区与英国的化肥氮和有机肥氮输入

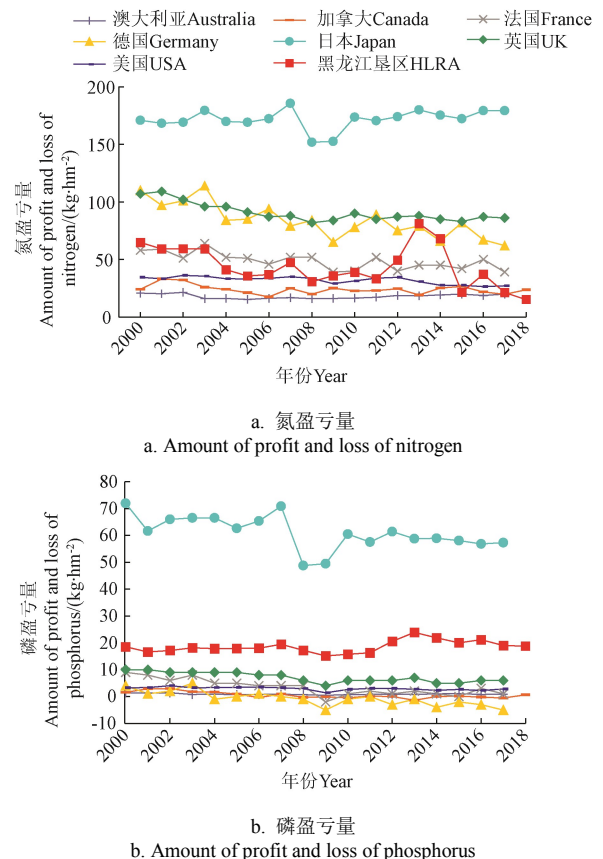
Fig.6 Chemical fertilizer and organic fertilizer nitrogen inputs of Heilongjiang Land Reclamation Area and UK

进而, 结合实地调研成果, 本文对黑龙江垦区有机肥施用现状与成因进行分析可知: 其一, 有机肥施用量不稳定, 主要受到畜禽养殖的影响。2013 年起黑龙江垦区畜禽养殖量快速下降, 导致可施用的有机肥量也快速下降。其二, 有机肥施用量较低。由于作业成本、作业时间和机械配备的影响, 大田粮食作物尚未大面积推广有机肥施用, 有机肥施用量相对较低。在作业成本方面, 有机肥的施用需要在秋整地之前增加一道工序, 即拖拉机带专用的撒肥机作业施肥。导致机械作业成本、人工成本等提高。在作业时间方面, 秋收时节, 由于气候原因, 垦区收获与耕整地时间相当紧迫。若增加施用有机肥的工序, 而延后秋整地作业时间, 可能会影响到秋整地作业质量与完成量, 这对农场农机管理部门也是个不小的挑战, 并且尚未有大规模机械作业试验验证。在机械配套方面, 有机肥施用需要依靠专用的撒肥机, 现阶段农场并未配备专用的撒肥机。并且, 农户新购置农机意愿不强。

因此, 建议黑龙江垦区农场与科研院所相结合, 直面当下存在的问题, 合理规划种养业生产规模, 稳定可施用的有机肥量; 开展有机肥机械施用可行性方案的研究与验证; 未来采用补贴等多种途径逐步在大田生产中推广有机无机肥配施^[32], 促进有机肥合理稳定使用。

2) 养分盈亏量

养分盈亏量作为判断农田土壤养分平衡状况的重要评价指标, 将评价结果与其他农业发达国家进行横向对比分析, 有利于更加清楚了解黑龙江垦区养分利用现状。根据经合组织官网数据, 整理得到澳大利亚、加拿大、法国、德国、日本、英国和美国的农田土壤氮、磷盈亏量, 并与黑龙江垦区数据比较分析。对于氮盈亏量 (图 7a), 除日本外, 澳大利亚等 6 国的氮盈亏量变化相对稳定, 黑龙江垦区的氮盈亏量波动减小。并且, 近年来黑龙江垦区的氮盈亏量相对较低。对于磷盈亏量 (图 7b), 除日本外, 黑龙江垦区与澳大利亚等 6 国磷盈亏量变化相对稳定, 但黑龙江垦区磷盈亏量相比处于较高水平。由此可见, 黑龙江垦区农田土壤氮管理与利用的整体发展态势良好, 未来还需要加大对磷的管理与利用, 促进养分盈亏量稳定。



注: 澳大利亚、加拿大、法国、德国、日本、英国和美国的数据来源于经合组织官网 (<https://data.oecd.org/agrland/nutrient-balance.htm>)。

Note: Date of Australia, Canada, France, Germany, Japan, UK, and USA were collected from the OECD website.

图7 不同国家和地区的氮磷盈亏量对比

Fig.7 Comparison of the amount of profit and loss of nitrogen, phosphorus in different countries and regions

因此, 在管理层面上, 建议黑龙江垦区参考德国^[33]、

美国^[34]的农田养分管理体系发展经验, 逐步完善农田养分管理体系的构建, 规范各项养分投入的管理措施。在技术层面, 各类养分管理技术已经在黑龙江垦区农场推广与应用^[35-36], 提高作物养分利用效率, 助力垦区早日实现化肥零增长。其中, 氮、磷调控是未来黑龙江垦区农田土壤养分平衡的重点研究内容。此外, 从长期发展的角度来看, 缺乏农田土壤养分平衡系统性观测数据。因此, 建议黑龙江垦区在各个管理局建立农田生态系统定位观测站, 对于水稻、玉米和大豆等主要农作物, 开展农田土壤养分平衡长期调查与监测, 为未来养分管理措施的调整与优化提供基础数据。在推广层面, 通过实地走访调研, 各个农场均建有农业科技示范园区, 开展了测土配方施肥、水稻侧深施肥等养分管理技术示范与推广。而种植户对化肥减施, 心中仍存在一定的疑虑。因此, 建议农场采用新颖的技术推广模式, 调动种植户的的积极性, 引导农户科学种植与高效养分管理。此外, 建议黑龙江垦区开展长期农田土壤养分平衡情况调查与监测, 有利于科学调整与优化短期养分管理措施, 制定中长期养分管理方案与策略, 提高养分利用效率, 促进农业绿色发展。

4 结 论

本文通过对 2000—2018 年农田土壤氮、磷、钾养分的输入与输出进行分析与评价, 得到以下结论:

1) 2000—2018 年, 黑龙江垦区农田土壤氮、磷、钾输入与输出整体呈现“平稳-增长-下降后平稳”的趋势, 2018 年农田土壤氮、磷、钾输入分别为 6.55×10^8 、 1.27×10^8 、 5.29×10^8 kg。从农田土壤养分输入的结构来看, 氮输入途径较为分散, 主要途径为化学肥料、有机肥和生物固氮; 磷输入和钾输入途径较为集中, 分别为化学肥料和秸秆还田。2018 年农田土壤氮、磷、钾输出分别为 6.12×10^8 、 7.34×10^7 、 4.88×10^8 kg。从农田土壤养分输出的结构来看, 氮输出、磷输出和钾输出途径较为集中, 氮输出和磷输出的主要途径为籽粒和秸秆; 钾输出的主要途径为秸秆。

2) 黑龙江垦区单位面积养分输入从大到小依次为单位面积氮输入、单位面积钾输入、单位面积磷输入。2018 年单位面积氮、磷、钾输入为 228.08、44.32、183.98 kg/hm²。近年来, 黑龙江垦区农田土壤单位面积养分输入量较为稳定。而黑龙江垦区单位产值养分输入从大到小依次为单位产值氮输入、单位产值钾输入、单位产值磷输入。2018 年单位产值氮、磷、钾输入为 94.86、18.43、76.52 kg/万元。整体而言, 黑龙江垦区农田土壤养分输入所带来的经济效益在增加。

3) 2017 年以来黑龙江垦区农田土壤氮和钾处于养分平衡状态, 而磷处于养分盈余状态, 这与农田输入的磷素易被土壤固定有关。2018 年黑龙江垦区氮、磷、钾利用效率分别为 51.03%、27.98%、10.04%。

[参 考 文 献]

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [2] Zhu Zhaoliang, Jin Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese with English abstract)
- [3] Chen X, Cui Z, Fan M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486.
- [4] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [5] Wu Liang. Nitrogen Fertilizer Demand and Greenhouse Gas Mitigation Potential Under Nitrogen Limiting Conditions for Chinese Agriculture Production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [6] Yu C, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. Nature, 2019, 567(7749): 516-520.
- [7] Bouwman L, Goldewijk K K, Van D H K W, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20882-20887.
- [8] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [9] He W, Jiang R, He P, et al. Estimating soil nitrogen balance at regional scale in China's croplands from 1984 to 2014[J]. Agricultural Systems, 2018, 167: 125-135.
- [10] Li S, He P, Jin J. Nitrogen use efficiency in grain production and the estimated nitrogen input/output balance in China agriculture[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(5): 1191-1197.
- [11] Pathak H, Mohanty S, Jain N, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium budgets in Indian agriculture[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(3): 287-299.
- [12] Spiess E. Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 91(3): 351-365.
- [13] Mishima S, Kimura S D, Eguchi S, et al. Changes in soil available-nutrient stores and relationships with nutrient balance and crop productivity in Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 59(3): 371-379.
- [14] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [15] Liu Xiaoyong. Study on Nutrients Balance and Requirement in Agricultural Production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩晓增, 王守宇. 中国生态系统定位观测与研究数据集. 农田生态系统卷. 黑龙江海伦站: 1998—2008[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [17] 卢玲, 董崇智, 赵彩霞, 等. 黑龙江水系不同水域水质的理化特征[J]. 水产学报, 2003(4): 364-370.
- [18] Lu Ling, Dong Chongzhi, Zhao Caixia, et al. Physico-chemical characteristics of different waters in

- Heilongjiang system[J]. Journal of Fisheries of China, 2003(4): 364-370. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姜作发, 唐富江, 董崇智, 等. 黑龙江勤得利湾水质理化特征[J]. 水产学杂志, 2004, 17(2): 15-19.
- Jiang Zuofa, Tang Fujiang, Dong Chongzhi, et al. Physico-chemical characteristics in Heilongjiang Qindeli bay[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2004, 17(2): 15-19. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhang Y, Fan C, Diao Z, et al. Evaluation of water quality in Er-longshan reservoir by fuzzy model[J]. Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences, 2009, 1(1): 30-39.
- [17] 许稳. 中国大气活性氮干湿沉降与大气污染减排效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- Xu Wen. Studies on Dry and Wet Deposition of Atmospheric Reactive Nitrogen and Air Pollution Control Effects in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [18] 关大伟, 李力, 岳现录, 等. 我国大豆的生物固氮潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1497-1504.
- Guan Dawei, Li Li, Yue Xianlu, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1497-1504. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘忠. 中国区域农田养分平衡及流域环境风险评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- Liu Zhong. Evaluating Regional Cropland Nutrient Balance and Watershed Environmental Risk in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. Kyoto: IPCC, 2019.
- [21] 杨月欣. 中国食物成分表 标准版 第 6 版 第 1 册[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018.
- [22] 郭玄, 佟启玉. 黑龙江垦区农作物秸秆综合利用评估报告[J]. 现代化农业, 2015(2): 42-44.
- Guo Xuan, Tong Qiyu. Evaluation report on comprehensive utilization of crop straw in Heilongjiang Reclamation Area[J]. Modern Agriculture, 2015(2): 42-44. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 蔡祖聪. 中国氮素流动分析方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [25] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏. 全国农田面源污染排放系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [26] 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 Hongjie, Zhang Huaizhi, Zhang Weili, et al. Farmland potassium balance in China: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 920-930. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1305-1310.
- Chen Minpeng, Chen Jining. Inventory of regional surface nutrient balance and policy recommendations in China[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1305-1310. (in Chinese with English abstract)
- [28] 万炜, 师纪博, 刘忠, 等. 栖霞市苹果园氮磷养分平衡及环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 211-219.
- Wan Wei, Shi Jibo, Liu Zhong, et al. Nitrogen and phosphorus nutrient balance and environmental risk assessment of apple orchard in Qixia City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 211-219. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 178-185.
- Hao Xiaoyu, Zhou Baoku, Ma Xingzhu, et al. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张卫峰, 易俊杰, 张福锁, 等. 中国肥料发展研究报告 2016[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2017.
- [31] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 1-8.
- Ji Hongjie, Zhang Huaizhi, Zhang Weili, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [32] 魏丹, 孟凯. 中国东北黑土[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [33] 张维理, 张认连, 冀宏杰, 等. 中德农业源污染管控制度比较研究[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 965-976.
- Zhang Weili, Zhang Renlian, Ji Hongjie, et al. A comparative study between China and Germany on the control system for agricultural source pollution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 965-976. (in Chinese with English abstract)
- [34] 潘昭隆, 李婷玉, 马林, 等. 美国农田养分管理体系的发展及启示[J]. 土壤通报, 2019, 50(4): 965-973.
- Pan Zhaolong, Li Tingyu, Ma Lin, et al. Development and enlightenment of cropland nutrient management system in the United States[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4): 965-973. (in Chinese with English abstract)
- [35] 安晓飞, 付卫强, 魏学礼, 等. 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 66-70.
- An Xiaofei, Fu Weiqiang, Wei Xueli, et al. Evaluation of four-element variable rate application of fertilization based on maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王秋菊, 焦峰, 刘峰, 等. 草甸白浆土稻秆氮利用效率及氮素调控对水稻产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 86-94.

Wang Qiuju, Jiao Feng, Liu Feng, et al. Nitrogen utilization efficiency of rice straw and effect of nitrogen regulation technology on yield in meadow albic soil[J]. Transactions of

the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 86-94.(in Chinese with English abstract)

Analysis and evaluation of farmland soil nutrient balance in Heilongjiang Land Reclamation Areas, China

Chu Tianshu¹, Wang Derui², Han Lujia¹, Yang Zengling^{1*}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: Efficient nutrient utilization has become an essential part of green development in modern agriculture. Evaluation on the nutrient balance of farmland soil is therefore critical to the Heilongjiang Land Reclamation Area (HLRA), one of the major grain-producing regions in China. HLRA has produced 410 million tons of grain since 1949, currently serving as a typical representative of agricultural mechanization and modern production. In HLRA, the total grain output was $2\,279.64 \times 10^4$ t in 2018, accounting for 3.47% of the national total. Taking the HLRA as the research subject, this study aims to develop a nutrient balance method for the evaluation on the input and output of N, P, and K from farmland soil during the period from 2000 to 2018. The results showed that: 1) From 2000 to 2018, the N, P, and K inputs of farmland soil in HLRA showed a steady-increase-decline trend. In 2018, the N, P and K input decreased to 6.55×10^8 , 1.27×10^8 and 5.29×10^8 kg. The N input mainly came from chemical fertilizer, organic fertilizer, and biological nitrogen fixation, whereas, the P and K inputs were mostly from chemical fertilizer and straw returning to field. 2) The N, P, and K outputs of farmland soil in HLRA also showed a steady-increase-decline trend from 2000 to 2018. In 2018, the N, P and K outputs decreased to 6.12×10^8 , 7.34×10^7 and 4.88×10^8 kg. The main ways of N and P outputs were for grain and straw, with special emphasis on the N output from ammonia volatilization, whereas the way of K output was mainly for straw. 3) The N, P, and K inputs per area of farmland soil in HLRA also showed a steady-increase-steady trend from 2000 to 2018. The N, P and K inputs per area in 2018 were 228.08, 44.32 and 183.98 kg/hm². The N, P, and K inputs per value of farmland soil in HLRA showed a decline trend from 2000 to 2018. Specifically, the N, P, and K inputs per value in 2000 were 94.86, 18.43, 76.52 kg/10⁴ yuan. There was an increase in the N and P utilization efficiency of farmland soil in HLRA, but a decrease in that of K, indicating 51.03% for N, 27.98% for P, and 10.04% for K in 2018. There was an increase trend in the N profit and loss of farmland soil in HLRA, and a steady trend for that of P, while a decline trend for that of K. The N profit and at an excellent level, compared with that from Australia, Canada, France, Germany, Japan, UK, and the USA. But a relatively low level occurred for the profit and loss. It infers that the N and K were in a nutrient balance state since 2017, whereas P was in a nutrient surplus condition. The reason can be that the P input into the farmland was easily fixed by soil. At the current stage, the fertilizer input in HLRA was mainly relying on chemical fertilizer, whereas, the amount of organic fertilizer was relatively low. This arrangement can be not conducive to fertilizing soil and slowing down the degradation of black soil. Therefore, a sound recommendation for HLRA can be made to develop various methods, such as subsidies and demonstration, further to gradually promote the application of organic fertilizers. Besides, a long-term monitoring of nutrient balance in the farmland soil was required in the near future, in order to scientifically adjust and optimize management strategies of soil nutrients, and thereby to improve nutrient utilization efficiency and food security in green development of modern agriculture.

Keywords: farmland; soil; nutrient balance; Heilongjiang Land Reclamation Area