



孙洪仁, 王显国, 张运龙, 王振国, 白乙拉图, 张桂华, 文峰, 金晓光, 包雪莲, 刘伟春. 我国荞麦土壤钾素丰缺指标和适宜施钾量研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11):170-178.

SUN Hongren, WANG Xianguo, ZHANG Yunlong, WANG Zhenguo, Baiyilatu, ZHANG Guihua, WEN Feng, JIN Xiaoguang, BAO Xuelian, LIU Weichun. Study on the abundance-deficiency index of buckwheat soil K and appropriate K application rates in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11):170-178.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.17

我国荞麦土壤钾素丰缺指标和适宜施钾量研究

孙洪仁¹ 王显国¹ 张运龙¹ 王振国² 白乙拉图² 张桂华² 文峰²
金晓光² 包雪莲² 刘伟春³

(1. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193;

2. 通辽市农牧科学研究所, 内蒙古 通辽 028015;

3. 库伦旗农业技术推广中心, 内蒙古 库伦 028200)

摘要 为建立我国荞麦土壤钾素丰缺指标推荐施肥系统, 在中国知网检索2001—2023年我国荞麦施钾的相关文献, 提取土壤速效钾含量、全钾含量、施钾处理产量和缺钾处理产量等相关数据; 采用“零散试验数据整合法”建立我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤速效钾和全钾含量的回归方程; 采用“土壤养分丰缺分级改良方案”对土壤速效钾和全钾含量进行分级; 采用“养分平衡-地力差减法新应用公式”, 计算不同目标产量、不同肥料利用率情形下不同丰缺级别土壤的荞麦适宜施钾量。结果表明: 我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤速效钾和全钾含量回归方程分别为: $y = 14.008 \ln(x) + 23.513$ 和 $y = 14.445 \ln(x) + 45.649$ 。我国荞麦土壤速效钾第1—6级丰缺指标依次为 ≥ 236 、 $\geq 116 \sim 236$ 、 $\geq 57 \sim 116$ 、 $\geq 28 \sim 57$ 、 $\geq 14 \sim 28$ 和 < 14 mg/kg, 土壤全钾第1—6级丰缺指标依次为 ≥ 44 、 $\geq 22 \sim 44$ 、 $\geq 11 \sim 22$ 、 $\geq 6 \sim 11$ 、 $\geq 3 \sim 6$ 和 < 3 g/kg。当荞麦目标产量在0.90~3.75 t/hm²、且钾肥利用率设定为40%~60%时, 钾素丰缺级别第1—6级土壤的适宜施钾量范围分别为0、7~42、14~84、20~127、27~169和34~211 kg/hm²; 钾肥利用率为60%、55%、50%、45%和40%的适宜施钾量范围依次为0~141、0~153、0~169、0~188和0~211 kg/hm²; 目标产量为0.90、1.50、2.25、3.00和3.75 t/hm²的适宜施钾量范围分别为0~51、0~84、0~127、0~169和0~211 kg/hm²。

关键词 荞麦; 测土施肥; 土壤速效钾; 土壤全钾; 丰缺指标; 施肥量

中图分类号 S153.6; S519

文章编号 1007-4333(2024)11-0170-09

文献标志码 A

Study on the abundance-deficiency index of buckwheat soil K and appropriate K application rates in China

SUN Hongren¹, WANG Xianguo¹, ZHANG Yunlong¹, WANG Zhenguo², Baiyilatu²,
ZHANG Guihua², WEN Feng², JIN Xiaoguang², BAO Xuelian², LIU Weichun³

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Tongliao Agricultural and Animal Husbandry Science Research Institute, Tongliao 028015, China;

3. Hure Banner Agricultural Technology Promotion Center, Hure 028200, China)

Abstract In order to establish a recommended fertilization system based on the abundance-deficiency index of buckwheat soil K, CNKI articles related to buckwheat K fertilization in China since 2001-2023, and the data of soil available K (SAK) and soil total K (STK), as well as the yield for K application treatment and

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-34)

第一作者: 孙洪仁(ORCID:0009-0006-0077-3275), 副教授, 主要从事牧草栽培和作物测土施肥研究, E-mail:sunhongren@cau.edu.cn

without K fertilizer treatments (KFT) were extracted. Using the method of integrating scattered experimental data, two regression equations were established between the relative yield (RY) of buckwheat without KFT and the content of SAK and STK in China. The improvement plan for soil nutrient abundance-deficiency grading was adopted to classify the content of SAK and STK. Using the new application formula based on the methods of nutrient balance and projected yield minus soil fertility yield, the AKAR for buckwheat in different soil fertility levels under different target yields (TY) and fertilizer use efficiency (FUE) was calculated. The results showed that the RY of buckwheat without KFT and the content of SAK and STK in China are as follows: $y = 14.008 \ln(x) + 23.513$ and $y = 14.445 \ln(x) + 45.649$, respectively. The ADI of SAK for buckwheat in China for the 1st to 6th level were ≥ 236 , ≥ 116 -236, ≥ 57 -116, ≥ 28 -57, ≥ 14 -28 and < 14 mg/kg, respectively. The ADI of STK for buckwheat in China for the 1st to 6th level were ≥ 44 , ≥ 22 -44, ≥ 11 -22, ≥ 6 -11, ≥ 3 -6 and < 3 g/kg, respectively. When the TY of buckwheat was 0.90-3.75 t/hm², the FUE of K was 40%-60%, and the soil K abundance-deficiency level (ADL) was from 1st to 6th, the AKAR for ADL from 1st to 6th were 0, 7-42, 14-84, 20-127, 27-169 and 34-211 kg/hm², respectively. The AKAR for FUE of K as 60%, 55%, 50%, 45% and 40% are 0-141, 0-153, 0-169, 0-188 and 0-211 kg/hm², respectively. The AKAR for target yields of 0.90, 1.50, 2.25, 3.00 and 3.75 t/hm² are 0-51, 0-84, 0-127, 0-169 and 0-211 kg/hm², respectively.

Keywords buckwheat; soil testing and fertilizer recommendation; soil available K; soil total K; abundance-deficiency index; fertilizer application rate

荞麦是起源于我国的重要药食同源杂粮作物,主要分为甜荞(*Fagopyrum esculentum* Moench)和苦荞(*F. tataricum* Gaertn)2个栽培种。我国荞麦种植面积 ≥ 60 余万 hm²,产量 ≥ 50 万余 t,仅次于俄罗斯,位居世界第二^[1]。合理施肥是荞麦高产、优质、高效和可持续发展的前提基础。施肥不足,无以实现荞麦生产目标;施肥过量,不仅徒增成本,还会降低荞麦产量、质量和效益,并且对土壤、大气和水资源等生态环境造成污染,进而危害人类身体健康。因此,需要科学确定荞麦施肥量。

肥料效应函数法、养分平衡-地力差减法、养分平衡-土壤有效养分校正系数法和土壤养分丰缺指标法是确定作物施肥量的4种基本方法^[2-3]。Bray创建土壤养分丰缺指标法^[4-5],因其拥有时间有效性长、地域有效性广、简便易行等三大优势,故被全球广泛采用。我国作物土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究起步较晚^[6-7],始于20世纪80年代。水稻、玉米、小麦和马铃薯等一些重要作物的若干区域土壤养分丰缺指标推荐施肥系统已经建立起来^[8-11]。而荞麦土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究尚属空白。之所以包括荞麦在内的诸多小作物土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究颇为薄弱,是因为这些小作物的科研投入强度偏低,难以支撑需要大量资金支持和专家投入的土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究。中国农业大学孙洪仁团队于2013年创建了作物土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究新方法,以“零散试验数据整合法”、“土壤养分丰缺分级改良方案”和“养

分平衡-地力差减法新应用公式”为核心的新方法^[12-14],可以有效克服科研投入强度偏低问题。采用新方法,我国诸多小作物的土壤养分丰缺指标推荐施肥系统得以成功建立,如甜菜^[15]、苜蓿^[16]、苹果^[17]、谷子^[18]、桃^[19]、大麦^[20]和燕麦^[21]等。氮、磷、钾乃植物营养三要素,为土壤养分丰缺指标推荐施肥系统研究之重点所在。目前,关于荞麦土壤钾素丰缺指标和适宜施肥量的研究尚未见报道。本研究拟采用孙洪仁团队创建的新方法^[12-14],以广大科研工作者在全国各地开展的荞麦施钾试验和荞麦需钾规律研究的数据为材料,开展我国荞麦土壤钾素丰缺指标和适宜施钾量研究,旨在建立我国荞麦土壤钾素丰缺指标推荐施肥系统,以期为我国荞麦测土施钾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量回归方程的建立

1.1.1 零散试验数据整合法

采用“零散试验数据整合法”^[3]建立我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量回归方程。具体做法如下:1)通过在知网检索2001—2023年针对荞麦在全国各地出于各种目的开展的具有土壤钾素含量和缺钾处理的施钾试验文献;2)人工提取文献中的施钾处理和缺钾处理产量、土壤速效钾和全钾含量数据;3)计算荞麦缺钾处理相对产量;4)建立荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量回归方程。

1.1.2 荞麦施钾试验研究文献和数据

以“荞麦”“施肥”和“钾”为主题词,采用“荞麦”和“施肥”或“荞麦”和“钾”等检索式,利用中国知网(CNKI)数据库资源,检索到我国开展的含有缺钾处理产量、施钾处理产量、土壤速效钾含量和全钾含量的荞麦施钾试验文献总计21篇^[22-42]。其中2001—2010年3篇^[22-24]、2011—2020年15篇^[25-39]、2021—2023年3篇^[40-42];盆栽试验1篇^[35],池栽试验2篇^[37,39],其余均为田间试验。上述研究涉及品种20余个、土壤类型近10个、县市区旗15个。施钾处理施钾量范围为4~240 kg/hm²。剔除部分明显偏离群体和不合理数据后,获得土壤速效钾含量、缺钾处理产量和施钾处理产量数据45组,土壤全钾含量、缺钾处理产量和施钾处理产量数据23组。

1.2 我国荞麦土壤钾素丰缺分级

采用“土壤养分丰缺分级改良方案”^[3,12]对土壤钾素含量进行分级。该改良方案主要特点有二,一是统一和均等化各丰缺级别的缺素处理相对产量跨度为10%,二是确定100%作为最高丰缺级别的缺素处理相对产量下限;主要优点:1)土壤养分丰缺分级的主观随意性降至最低、客观决定性升至最高;2)不同丰缺级别土壤推荐施肥的精准度得以统一;3)整套分级方案的科学性和实践性得以兼顾;4)最高丰缺级别土壤的产量损失得以避免。将改良方案中各个丰缺级别节点之缺素处理相对产量数值代入荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量回归方程,即可求出各个丰缺级别对应的土壤钾素含量范围。

1.3 我国荞麦不同钾素丰缺级别土壤适宜施钾量的确定

1.3.1 养分平衡-地力差减法新应用公式

采用“养分平衡-地力差减法新应用公式”^[3,13]

(式(1)),计算不同目标产量、不同肥料利用率情形下不同丰缺级别土壤的荞麦适宜施钾量。该新应用公式核心特征是引入变量“缺素处理相对产量”作为纽带与“土壤养分丰缺指标分级方案”联结起来。

$$F_K = Y_t \times K_u \times (1 - R_K) \div E_K \quad (1)$$

式中: F_K 为适宜施钾量,kg/hm²; Y_t 为目标产量,t/hm²; K_u 为单位经济产量钾素吸收量,kg/t; R_K 为缺钾处理相对产量; E_K 为钾肥利用率,%。

1.3.2 新应用公式之参数确定

我国荞麦当前的生产实际状况,平均单产水平不足1 t/hm²,而高产田可达3.75 t/hm²以上^[1,22-42]。据此确定5个目标产量:0.90、1.50、2.25、3.00和3.75 t/hm²。水肥管理模式对肥料利用率具有很大影响,如旱作雨养模式下,施肥次数很少,钾肥利用率一般在40%以下;滴灌+水肥一体化模式下,水肥同步,施肥次数亦颇多,钾肥利用率可高达60%以上^[15-21]。依据我国荞麦水肥管理实践,确定5个钾肥利用率:40%、45%、50%、55%和60%。以文献[2,22,43-44]为主要依据,确定我国荞麦单位经济产量钾素吸收量(以K₂O计)为45 kg/t。目标产量和单位经济产量钾素吸收量之积为目标产量的钾素吸收量,5个荞麦目标产量钾素吸收量依次为40.50、67.50、101.25、135.00和168.75 kg/hm²。

2 结果与分析

2.1 我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量回归方程

由图1可知,土壤速效钾和土壤全钾与缺钾处理相对产量回归方程的决定系数(R^2)颇为接近,难分伯仲。土壤速效钾与缺钾处理相对产量

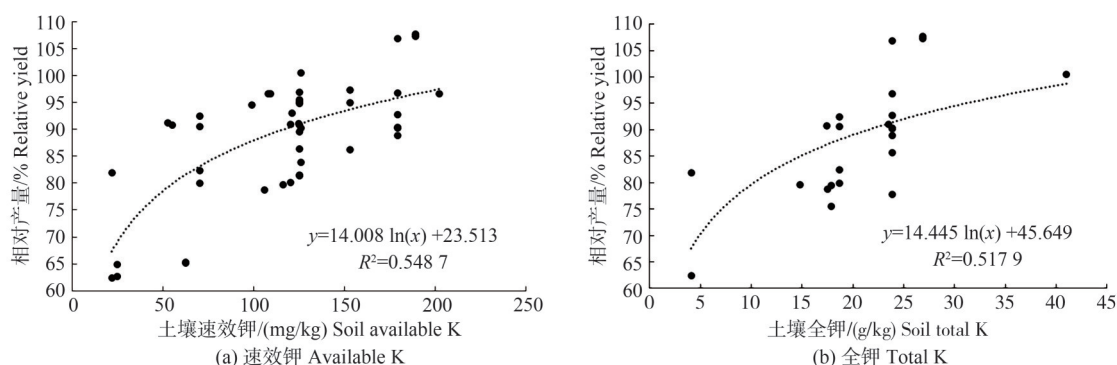


图1 我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤钾素含量相关性

Fig. 1 Regression relation between the relative yield without K fertilizer treatment and soil K for buckwheat in China

散点图的数据点分布相对较为均匀,而土壤全钾与缺钾处理相对产量散点图的数据点集中于 15~25 g/kg。

我国土壤荞麦缺钾处理相对产量与土壤速效钾、全钾含量 2 个回归方程如下,均为自然对数相关,皆达到了极显著水平。

$$y=14.008\ln(x)+23.513\ (r=0.740\ 7,\ n=45,\ P<0.01)\tag{2}$$

$$y=14.445\ln(x)+45.649\ (r=0.719\ 7,\ n=23,\ P<0.01)\tag{3}$$

式中: y 为缺钾处理相对产量,数据范围为 62.64%~107.33%; x 分别为土壤速效钾含量和

全钾含量,数据范围分别为 21.65~202.00 mg/kg 和 4.1~41.0 g/kg。

2.2 我国荞麦土壤钾素丰缺指标

借助式(2)和(3)计算出缺钾处理相对产量 100%、95%、90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20% 和 10% 对应的土壤速效钾含量依次为 235.2、164.6、115.2、56.4、27.6、13.5、6.6、3.3、1.6、0.8 和 0.4 mg/kg,土壤全钾含量依次为 43.1、30.5、21.6、10.8、5.4、2.7、1.4、0.7、0.4、0.2 和 0.1 g/kg。舍弃部分外推数据,得到我国荞麦土壤速效钾和全钾丰缺指标(表 1)。其中,第 6 级在生产实践中极少出现。

表 1 我国荞麦土壤钾素丰缺分级指标
Table 1 The abundance-deficiency index of soil K for buckwheat in China

项目 Item	指标 Index					
	6(<70%)	5(70%~80%)	4(70%~80%)	3(80%~90%)	2(90%~100%)	1(≥100%)
速效钾/(mg/kg) Soil available K	< <u>14</u>	≥ <u>14</u> ~28	≥28~57	≥57~116	≥116~ <u>236</u>	≥ <u>236</u>
全钾/(g/kg) Soil total K	< <u>3</u>	≥ <u>3</u> ~6	≥6~11	≥11~22	≥22~ <u>44</u>	≥ <u>44</u>

注:项目栏 6~1 表示土壤钾素丰缺级别和缺钾处理相对产量。带下划线者为外推数据。
Note: Column 6-1 represent the abundance-deficiency level of soil K and relative yield of buckwheat without K fertilizer treatments. Underlined data is extrapolated data.

2.3 我国荞麦适宜施钾量

由表 2 可知,目标产量 0.90~3.75 t/hm²、钾肥利用率 40%~60% 时,第 1—6 级土壤的适宜施钾量分别为 0、7~42、14~84、20~127、27~169 和 34~211 kg/hm²。目标产量 0.90~3.75 t/hm²、土壤钾素丰缺级别第 1—6 级时,钾肥利用率 60%、55%、50%、45% 和 40% 的适宜施钾量范围依次为 0~141、0~153、0~169、0~188 和 0~211 kg/hm²。钾肥利用率 40%~60%、土壤钾素丰缺级别第 1—6 级时,目标产量 0.90、1.50、2.25、3.00 和 3.75 t/hm² 的适宜施钾量范围分别为 0~51、0~84、0~127、0~169 和 0~211 kg/hm²。

3 讨 论

3.1 文献及数据选取

采用“零散试验数据整合法”建立作物缺素处理相对产量和土壤养分含量回归方程,如何进行文

献选取和数据剔除这个问题首当其冲。澳大利亚谷物研究与发展组织对于文献选取和数据处理的规定颇为详尽,比如对试验研究进行评估分级,质量低者可能予以弃用^[45]。本研究未对文献进行分类和分级,既不管研究目的是什么,亦无论采用何种研究方法一如盆栽和池栽,所有文献一律采用,但在进行回归分析时,剔除少量严重偏离群体的数据,保证了回归方程样本数量最大化。

3.2 回归方程样本数量

土壤养分丰缺指标法创始人 Bray^[4-5] 及谭金芳等^[2]、周鸣铮^[46]、黄德明^[47]、金耀青等^[48] 都认为,作物缺素处理相对产量与土壤养分含量回归方程的样本数量宜在 20 个以上。澳大利亚谷物研究与发展组织规定最小样本数量不宜少于 8 个^[49]。孙洪仁等^[50] 的研究表明,采用“零散试验数据整合法”建立作物缺素处理相对产量与土壤养分含量回归方程时,样本数量越多,回归方程越成熟稳定,反之则易

表2 我国荞麦不同目标产量和不同肥料利用率情形下不同丰缺级别土壤的适宜施钾量

Table 2 Appropriate K application rates of different abundance-deficiency level soils under different target yields and different fertilizer use efficiency for buckwheat in China

目标产量/(t/hm ²) Target yield	钾肥利用率/% K fertilizer use efficiency	适宜施钾量/(kg/hm ²) Appropriate K application rates					
		6	5	4	3	2	1
0.90	60	≥34	27	20	14	7	0
	55	≥37	30	22	15	7	0
	50	≥41	32	24	16	8	0
	45	≥45	36	27	18	9	0
	40	≥51	41	30	20	10	0
1.50	50	≥56	45	34	23	11	0
	45	≥61	49	37	25	12	0
	40	≥68	54	41	27	14	0
	50	≥75	60	45	30	15	0
	45	≥84	68	51	34	17	0
2.25	40	≥84	68	51	34	17	0
	50	≥92	74	55	37	18	0
	45	≥101	81	61	41	20	0
	40	≥113	90	68	45	23	0
	50	≥127	101	76	51	25	0
3.00	45	≥113	90	68	45	23	0
	40	≥123	98	74	49	25	0
	50	≥135	108	81	54	27	0
	45	≥150	120	90	60	30	0
	40	≥169	135	101	68	34	0
3.75	50	≥141	113	84	56	28	0
	45	≥153	123	92	61	31	0
	40	≥169	135	101	68	34	0
	50	≥188	150	113	75	38	0
	45	≥211	169	127	84	42	0

注:项目栏6~1表示土壤钾素丰缺级别。
Note: Column 6-1 represent the abundance-deficiency level of soil K.

发生剧烈波动。之所以如此,可能与下列原因有关:1)“零散试验数据整合法”所整合的诸多施肥试验皆为独立开展,无总体规划,具体的试验设计和操作方法没有统一规范;2)研究的时间跨度大,长达数十年之久;3)我国幅员辽阔,气候、土壤类型多样,生产模式和水平众多。如果样本数量足够大,则可依据自然区域、土壤类型、生产模式、生产水平及年代等进行分别研究^[50-52]。本研究样本数量23~45个,符合基本要求,但还不足以开展分区、分类或

分代研究,因此尚需大力开展含有缺钾处理的荞麦施钾试验研究。

3.3 回归方程相关系数及决定系数

相关系数和决定系数越高,回归方程越完美。田间试验不可控因素较多,通常相关系数和决定系数远低于室内试验。而“零散实验数据整合法”三大特性:时间跨度大、空间幅员广、没有统一规范的试验设计和操作方法,也会导致散点图之数据点在回归曲线上波动幅度加大,进而降低回归方程的

相关系数和决定系数。但回归方程和曲线相当于动态平均值,只要样本数量足够多,还是颇为可信的。澳大利亚谷物研究与发展组织^[49]规定,作物缺素处理相对产量与土壤养分含量回归方程的相关系数不应低于 0.2,实践上相关系数大多介于 0.25~0.70,决定系数范围则为 0.05~0.50。本研究所得回归方程的相关系数和决定系数分别为 0.72~0.74 和 0.52~0.55,较为理想。

3.4 我国荞麦土壤速效钾丰缺指标

我国诸多区域水稻^[8]、玉米^[9]、小麦^[10]和马铃薯^[11]缺钾处理相对产量 90% 对应的土壤速效钾指标范围为 80~200 mg/kg,本荞麦研究结果为 116 mg/kg,介于其间。我国甜菜^[15]、苜蓿^[16]、苹果^[17]、谷子^[18]、桃^[19]、大麦^[20]和燕麦^[21]缺钾处理相对产量 100% 对应的土壤速效钾指标为 170~400 mg/kg,本荞麦研究结果为 236 mg/kg。

3.5 我国荞麦土壤全钾丰缺指标

关于作物土壤全钾丰缺指标研究,除孙洪仁等^[18,20-21]研究,尚未见其他报道。我国谷子^[18]、大麦^[20]和燕麦^[21]缺钾处理相对产量 80%、90% 和 95% 对应的土壤全钾含量指标初步研究结果依次为 4~11、15~21 和 19~40 g/kg,本研究结果分别为 11、22 和 31 g/kg,与其存在一定差异。考虑到荞麦研究样本数量明显多于谷子^[18]、大麦^[20]和燕麦^[21],可靠性相对较高。若需进一步提高可靠性,今后可开展荞麦缺钾处理相对产量与土壤全钾含量回归关系研究。

3.6 我国荞麦适宜施钾量

本研究引用文献[22-42]的施钾量为 4~240 kg/hm²。本研究结果发现:当目标产量 0.9~3.75 t/hm²、且钾肥利用率在 40%~60% 时,第 1—6 级土壤的适宜施钾量分别为 0、7~42、14~84、20~127、27~169 和 34~211 kg/hm²。本研究结果与已发文献[22-42]中采用的施钾量接近。

4 结 论

利用已有荞麦施钾试验数据建立了我国荞麦缺钾处理相对产量与土壤速效钾和全钾含量回归方程,分别为: $y=14.008 \ln(x)+23.513$, $y=14.445 \ln(x)+45.649$ 。确定我国荞麦土壤钾素第 1—6 级丰缺指标,速效钾依次为 ≥ 236 、 ≥ 116 ~236、 ≥ 57 ~116、 ≥ 28 ~57、 ≥ 14 ~28 和

<14 mg/kg;全钾依次为 ≥ 44 、 ≥ 22 ~44、 ≥ 11 ~22、 ≥ 6 ~11、 ≥ 3 ~6 和 <3 g/kg。当荞麦目标产量 0.90~3.75 t/hm²、钾肥利用率为 40%~60%、土壤钾素丰缺级别第 1—6 级时,第 1—6 级土壤适宜施钾量范围分别为 0、7~42、14~84、20~127、27~169 和 34~211 kg/hm²;钾肥利用率 60%、55%、50%、45% 和 40% 的适宜施钾量范围依次为 0~141、0~153、0~169、0~188 和 0~211 kg/hm²;目标产量 0.90、1.50、2.25、3.00 和 3.75 t/hm² 的适宜施钾量范围分别为 0~51、0~84、0~127、0~169 和 0~211 kg/hm²。

参考文献 References

- [1] 严慧玲,陈泓旭,叶雪玲,曹亚楠,赵江林,向达兵,胡一晨,邹亮.我国荞麦产业发展现状与对策浅析[J].四川农业科技,2023(2):12-15,23
Yan H L, Chen H X, Ye X L, Cao Y N, Zhao J L, Xiang D B, Hu Y C, Zou L. Analysis on the development status and countermeasures of buckwheat industry in China [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2023(2): 12-15, 23 (in Chinese)
- [2] 谭金芳,韩燕来.作物施肥原理与技术[M].第3版.北京:中国农业大学出版社,2021
Tan J F, Han Y L. *Principle and Techniques of Crop Fertilization* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2021 (in Chinese)
- [3] 孙洪仁,刘文清,朱伟军.苜蓿种植技术[M].北京:中国林业出版社,2020
Sun H R, Liu W Q, Zhu W J. *Alfalfa Planting Techniques* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020 (in Chinese)
- [4] Bray R H. Soil-plant relations: I The quantitative relation of exchangeable potassium to crop yields and to crop response to potash additions[J]. *Soil Science*, 1944, 58(4): 305-324
- [5] Bray R H. Soil-plant relations: II Balanced fertilizer use through soil tests for potassium and phosphorus [J]. *Soil Science*, 1945, 60(6): 463-474
- [6] 周鸣铮.中国的测土施肥[J].土壤通报,1987,18(1):7-13
Zhou M Z. Soil testing and fertilization in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1987, 18(1): 7-13 (in Chinese)
- [7] 黄德明.我国农田土壤养分肥力状况及丰缺指标[J].华北农学报,1988,3(2):46-53
Huang D M. Soil fertility and fertility index for cropland soils in China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1988, 3(2): 46-53 (in Chinese)
- [8] 孙洪仁,张吉萍,江丽华,吕玉才,王应海.我国水稻土壤有效磷和速效钾丰缺指标与适宜磷钾施用量研究[J].中国稻米,2018,24(5):1-10
Sun H R, Zhang J P, Jiang L H, Lv Y C, Wang Y H. Study on the abundance-deficiency index of soil available P and K and appropriate nutrient application rates of P and K for rice in China[J]. *China Rice*, 2018, 24(5): 1-10 (in Chinese)
- [9] 孙洪仁,张吉萍,江丽华,吕玉才,王应海.中国五大自然区域玉米土壤速效钾丰缺指标推荐施肥系统[J].北方农业学报,2019,47(2):36-45
Sun H R, Zhang J P, Jiang L H, Lv Y C, Wang Y H. Corn fertilizer recommendation system based on the abundance-deficiency index of soil available K in five great natural regions of China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(2): 36-45 (in Chinese)

- [10] 孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 吕玉才, 王应海. 中国小麦土壤速效钾丰缺指标与适宜施钾量研究[J]. 土壤, 2019, 51(5): 895-902
Sun H R, Zhang J P, Gang L H, Lv Y C, Wang Y H. Study on abundance-deficiency indices of soil available potassium and appropriate potassium application rates for wheat in China[J]. *Soils*, 2019, 51(5): 895-902 (in Chinese)
- [11] 孙洪仁, 江丽华, 张吉萍, 吕玉才, 王应海. 中国马铃薯土壤氮磷钾丰缺指标与适宜施肥量[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5): 78-85
Sun H R, Gang L H, Zhang J P, Lv Y C, Wang Y H. The abundance-deficiency indexes of soil NPK and appropriate fertilization rates for potato in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(5): 78-85 (in Chinese)
- [12] 孙洪仁, 曹影, 刘琳, 吴雅娜, 杨晓洁, 赵雅晴. 测土施肥土壤有效养分丰缺分级改良方案[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(10): 1-5
Sun H R, Cao Y, Liu L, Wu Y N, Yang X J, Zhao Y Q. An improved scheme for the grading of abundance and deficiency of soil available nutrients in soil testing and fertilizer recommendation[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(10): 1-5 (in Chinese)
- [13] 孙洪仁, 曹影, 刘琳, 吴雅娜, 杨晓洁, 赵雅晴. “养分平衡—地力差减法”确定适宜施肥量的新应用公式[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(7): 1-4
Sun H R, Cao Y, Liu L, Wu Y N, Yang X J, Zhao Y Q. A new application formula for determining the appropriate amount of fertilizer application with the methods of nutrient balance and dissimilar subtraction of soil fertility [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(7): 1-4 (in Chinese)
- [14] 孙洪仁, 曹影, 刘琳, 吴雅娜, 杨晓洁, 赵雅晴. 测土施肥不同丰缺级别土壤的适宜施肥量[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(12): 7-11
Sun H R, Cao Y, Liu L, Wu Y N, Yang X J, Zhao Y Q. The appropriate amount of fertilizer application for the soils with different levels of nutrient abundance and deficiency using soil testing and fertilizer recommendation [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(12): 7-11 (in Chinese)
- [15] 孙洪仁, 张吉萍, 吕玉才, 郑笑冉, 张利霞, 宋琼, 林柏森. 中国北方甜菜土壤速效钾丰缺指标与适宜施钾量研究[J]. 中国糖料, 2020, 42(1): 45-49
Sun H R, Zhang J P, Lv Y C, Zheng X R, Zhang L X, Song Q, Lin B S. Study on abundance-deficiency index of soil available K and appropriate potassium application rates for sugar beet in the north of China[J]. *Sugar Crops of China*, 2020, 42(1): 45-49 (in Chinese)
- [16] 孙洪仁, 王显国, 穆尼热·买买提, 沙吾列·沙比汗, 杨彩林, 闫朝, 倪兴成, 郝小军. 中国三大自然区紫花苜蓿土壤速效钾丰缺指标和推荐施钾量[J]. 中国草地学报, 2021, 43(3): 19-28
Sun H R, Wang X G, Maimaiti M, Shabihan S, Yang C L, Yan Z, Ni X C, Hao X J. Study on available potassium rich-lack index and recommended potassium application rate of alfalfa soil in three natural regions of China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 19-28 (in Chinese)
- [17] 王彦, 朱凯迪, 孙洪仁, 张吉萍, 吕玉才, 王剑. 中国苹果土壤养分丰缺指标与适宜施肥量初步研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(5): 69-78
Wang Y, Zhu K D, Sun H R, Zhang J P, Lv Y C, Wang J. Abundance-deficiency index of soil nutrients and appropriate fertilizer application rates for apple planting in China: A preliminary study [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(5): 69-78 (in Chinese)
- [18] 朱凯迪, 孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 吕玉才, 王国军, 魏登峰. 我国籽实和饲草谷子土壤钾素丰缺指标及推荐施钾量[J]. 北方农业学报, 2022, 50(6): 31-39
Zhu K D, Sun H R, Zhang J P, Gang L H, Lv Y C, Wang G J, Wei D F. The abundance-deficiency index of soil K and recommended potassium fertilizer application rates for grain and forage millet in China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2022, 50(6): 31-39 (in Chinese)
- [19] 张明, 吕志伟, 孙洪仁, 张吉萍, 吕玉才, 刘元青. 中国桃土壤速效钾丰缺指标与适宜施钾量研究[J]. 农学学报, 2023, 13(4): 61-65
Zhang M, Lv Z W, Sun H R, Zhang J P, Lv Y C, Liu Y Q. Abundance-deficiency index of soil available potassium and appropriate fertilizer application rates for peach planting in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(4): 61-65 (in Chinese)
- [20] 杨小可悦, 孙洪仁, 王显国, 张运龙, 杜雪燕, 李林霞, 陶润志, 冯泽娟. 我国籽实和饲草大麦土壤钾素丰缺指标和推荐施钾量初步研究[J]. 中国奶牛, 2023(11): 60-67
Yang X K Y, Sun H R, Wang X G, Zhang Y L, Du X Y, Li L X, Tao R Z, Feng Z J. The abundance-deficiency index of soil K and recommended potassium fertilizer application rates for grain and forage barley in China[J]. *China Dairy Cattle*, 2023(11): 60-67 (in Chinese)
- [21] 孙洪仁, 王显国, 张运龙, 杜雪燕, 李林霞. 我国籽实和饲草燕麦土壤钾素丰缺指标与推荐施钾量初步研究[J]. 中国奶牛, 2024(6): 54-59
Sun H R, Wang X G, Zhang Y L, Du X Y, Li L X. Preliminary study on abundance-deficiency index of soil K and recommended potassium fertilizer application rates for grain and forage oats in China[J]. *China Dairy Cattle*, 2024(6): 54-59 (in Chinese)
- [22] 王志远, 毛丛义. 对养麦养分吸收及平衡施肥的初探[J]. 青海农技推广, 2001(3): 58-60
Wang Z Y, Mao C Y. Experiment on absorption and balanced fertilizer application of buckwheat[J]. *Qinghai Agro-Technology Extension*, 2001(3): 58-60 (in Chinese)
- [23] 尹迪信, 唐华彬, 罗红军, 郑汝权, 郭克强. 贵州野生牧草“金荞麦”平衡施肥试验研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1152-1155
Yin D X, Tang H B, Luo H J, Zheng R Q, Guo K Q. Balanced fertilization for *Polygonum cymosum* tvev: A wild forage grass in Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1152-1155 (in Chinese)
- [24] 马宁, 刘杰英, 贾瑞琳, 魏立萍, 陈富. 甘肃中部半干旱雨养生态区甜荞麦施肥优化数学模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 108-111
Ma N, Liu J Y, Jia R L, Wei L P, Chen F. Mathematical model of optimal fertilization for sweet buckwheat in semiarid rain-fed region in central Gansu [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(6): 108-111 (in Chinese)
- [25] 李桂强, 何平, 张春平, 张益锋, 胡世俊. 药用金荞麦“3414”施肥效应研究[J]. 中药材, 2011, 34(2): 171-175
Li G Q, He P, Zhang C P, Zhang Y F, Hu S J. Effects of “3414” fertilizer application on the yield of *Fagopyrum cymosum* [J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2011, 34(2): 171-175 (in Chinese)
- [26] 侯迷红, 范富, 宋桂云, 苏雅乐, 纪凤辉. 钾肥用量对甜荞麦产量和钾素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 340-346
Hou M H, Fan F, Song G Y, Su Y L, Ji F H. Effect of K application rate on yield and K use efficiency of buckwheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 340-346 (in Chinese)
- [27] 刘纲, 熊仿秋, 钟林, 李发良, 苏丽萍, 朱剑锋, 沈阿依, 杨宏樞, 罗晓玲. 高寒山区苦荞麦氮磷钾“3414”肥料效应试验报告[J]. 农业科技通讯, 2014(12): 79-82, 161
Liu G, Xiong F Q, Zhong L, Li F L, Su L P, Zhu J F, Shen A Y, Yang H Y, Luo X L. Experimental report on the effect of nitrogen, phosphorus and potassium “3414” fertilizer on Tartary buckwheat in alpine mountain

- area[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2014(12): 79-82, 161 (in Chinese)
- [28] 刘迎春, 乌朝鲁门, 李永娟, 丁素荣, 李峰. 荞麦氮、磷、钾肥的效应研究[J]. 作物杂志, 2014(6): 95-98
- Liu Y C, Wuchaolumen, Li Y J, Ding S R, Li F. Research on effects of N, P, K fertilizer in common buckwheat[J]. *Crops*, 2014(6): 95-98 (in Chinese)
- [29] 宋毓雪, 胡静洁, 孔德章, 曹玉洪, 陈庆富, 黄凯丰. 不同氮、磷、钾水平对苦荞产量和品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(3): 411-415
- Song Y X, Hu J J, Kong D Z, Cao Y H, Chen Q F, Huang K F. Effects of different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium on yield and quality of Tartary buckwheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(3): 411-415 (in Chinese)
- [30] 宋毓雪, 陈小娥, 魏让, 陈庆富, 黄凯丰. 不同肥料配比对甜荞产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3): 49-53
- Song Y X, Chen X E, Wei R, Chen Q F, Huang K F. Effects of different ratios of NPK fertilizer on yield and quality of common buckwheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(3): 49-53 (in Chinese)
- [31] 宋毓雪, 郭肖, 杨龙云, 陈庆富, 黄凯丰. 不同氮磷钾肥料处理对苦荞籽粒充实度及产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(6): 1568-1572
- Song Y X, Guo X, Yang L Y, Chen Q F, Huang K F. Effects of different NPK treatments on the yield and plumpness of Tartary buckwheat [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(6): 1568-1572 (in Chinese)
- [32] 汪灿, 胡海, 杨浩, 胡丹, 阮仁武, 袁晓辉, 易泽林. 播种量和施肥水平对西荞2号春播光合速率及产量的影响[J]. 种子, 2014, 33(8): 88-92
- Wang C, Hu H, Yang H, Hu D, Ruan R W, Yuan X H, Yi Z L. Effects of seeding rate and fertilizer on photosynthetic rate and yield of Youqiao No 2 planted in spring[J]. *Seed*, 2014, 33(8): 88-92 (in Chinese)
- [33] 向达兵, 杨玲玲, 李静, 刘亚男, 高全利, 任友坤, 刘学仪, 赵钢, 周勇, 黄海霞, 张莹, 贾晓凤. 施肥对苦荞麦产量、经济效益及肥效的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(4): 83-87
- Xiang D B, Yang L L, Li J, Liu Y N, Gao Q L, Ren Y K, Liu X Y, Zhao G, Zhou Y, Huang H X, Zhang Y, Jia X F. Effect of fertilization application on yield, economic benefit and fertilizer efficiency of Tartary buckwheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(4): 83-87 (in Chinese)
- [34] 艾蓉, 邓蓉, 王安娜. 氮磷钾配施对黔金荞麦1号块茎产量影响[J]. 贵州畜牧兽医, 2015, 39(5): 63-64
- Ai R, Deng R, Wang A N. Effect of combine application of nitrogen, phosphorus and potassium on tuber yield of Qianjin buckwheat No 1[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2015, 39(5): 63-64 (in Chinese)
- [35] 王雨, 赵权, 孔德章, 周良, 王炎, 李振宙, 黄小燕, 黄凯丰. 化学肥料调控对连作甜荞生长的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(4): 87-93
- Wang Y, Zhao Q, Kong D Z, Zhou L, Wang Y, Li Z Z, Huang X Y, Huang K F. Effect of chemical fertilizers regulation on the growth of *Fagopyrum esculentum* with continuous cropping [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(4): 87-93 (in Chinese)
- [36] 张伟丽, 白文琴, 白文明, 宋莫凡, 夏美娟, 王鹏科, 冯佰利, 高金锋. 氮磷钾对苦荞主要农艺性状、产量及干物质积累与分配的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 105-113
- Zhang W L, Bai W Q, Bai W M, Song M F, Xia M J, Wang P K, Feng B L, Gao J F. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on main agronomic characters, yield and accumulation and distribution of dry matter in Tartary buckwheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2): 105-113 (in Chinese)
- [37] 王炎. 不同耕作方式及施肥量对甜荞产量的影响[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019
- Wang Y. Effects of different tillage methods and fertilization amount on the yield of buckwheat[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2019 (in Chinese)
- [38] 张伟丽. 氮磷钾素对苦荞产量性状及其淀粉理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
- Zhang W L. Effects of nitrogen phosphorus and potassium on yield traits and physicochemical characters of tartary buckwheat starch [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019 (in Chinese)
- [39] 李振宙. 不同耕作方式对苦荞产量形成的影响[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020
- Li Z Z. Effect of different cultivation methods on the yield formation of tartary buckwheat[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020 (in Chinese)
- [40] 边巴卓玛. 拉萨河谷农区苦荞“3414”肥料效应试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(4): 398-403
- Bianbadrolma. Experimental study on fertilizer effect of Tartary Buckwheat “3414” in agricultural area of Lhasa River Valley[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(4): 398-403 (in Chinese)
- [41] 李振东. 栽培措施对不施氮处理下苦荞生长及产量的影响[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022
- Li Z D. Effect of cultivation measures on the growth and yield of Tartary buckwheat without nitrogen application treatment [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022 (in Chinese)
- [42] 纪志超, 王欣欣, 王连会, 董喆, 张立媛, 郑伟, 边丽梅, 刘迎春. 荞麦-大豆轮作条件下不同配比N、P、K肥对作物产量与土壤肥力的影响[J]. 作物研究, 2023, 37(3): 213-217, 258
- Ji Z C, Wang X X, Wang L H, Dong Z, Zhang L Y, Zheng W, Bian L M, Liu Y C. Effects of N, P and K fertilizers on crop yields and soil fertility under the condition of buckwheat-soybean rotation [J]. *Crop Research*, 2023, 37(3): 213-217, 258 (in Chinese)
- [43] 戴庆林, 任树华, 刘基业, 王永亮. 半干旱地区荞麦吸肥规律的初步研究[J]. 内蒙古农业科技, 1988(3): 11-13, 18
- Dai Q L, Ren S H, Liu J Y, Wang Y L. Preliminary study on the fertilizer absorption law of buckwheat in semi-arid area [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 1988, 16(3): 11-13, 18 (in Chinese)
- [44] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q. *Guide to Fertilization of Major Crops in China* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009 (in Chinese)
- [45] Watmuff G, Reuter D J, Speirs S D. Methodologies for assembling and interrogating N, P, K, and S soil test calibrations for Australian cereal, oilseed and pulse crops[J]. *Crop and Pasture Science*, 2013, 64(5): 424-434
- [46] 周鸣铮. 土壤肥力测定与测土施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1988
- Zhou M Z. *Determination of Soil Fertility and Soil Testing and Fertilization Recommendation* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988 (in Chinese)
- [47] 黄德明. 作物营养和科学施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1993
- Huang D M. *Crop Nutrition and Scientific Fertilization* [M]. Beijing:

- Agriculture Press, 1993 (in Chinese)
- [48] 金耀青, 张中原. 配方施肥方法及其应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993
- Jin Y Q, Zhang Z Y. *Formula Fertilization Method and Its Application* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1993 (in Chinese)
- [49] Dyson C B, Conyers M K. Methodology for online biometric analysis of soil test: Crop response datasets[J]. *Crop and Pasture Science*, 2013, 64(5): 435-441
- [50] 孙洪仁, 王显国, 卜耀军, 吕林有, 赵艳, 高凯, 张玉霞, 刘庭玉. 我国紫花苜蓿土壤有效磷丰缺指标与推荐施磷量[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 199-215
- Sun H R, Wang X G, Bu Y J, Lv L Y, Zhao Y, Gao K, Zhang Y X, Liu T Y. Abundance and deficiency index of soil available P and the recommended P application rates for alfalfa in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 199-215 (in Chinese)
- [51] Speirs S D, Reuter D J, Peverill K I, Brennan R F. Making better fertiliser decisions for cropping systems in Australia: An overview [J]. *Crop and Pasture Science*, 2013, 64(5): 417-423
- [52] 孙洪仁, 穆尼热·买买提, 沙吾列·沙比汗, 卜耀军, 乔楠. 西北荒漠绿洲区紫花苜蓿土壤氮素丰缺指标和推荐施氮量初步研究[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 87-97
- Sun H R, Maimaiti M, Shabihan S, Bu Y J, Qiao N. Preliminary study on rich-lack index of soil N and recommended N fertilizer application rates for alfalfa in the northwest desert oasis of China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(2): 87-97 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 孙洪仁, 中国农业大学草业科学与技术学院副教授, 主要从事牧草栽培和作物测土施肥研究。中国畜牧业协会草业分会常务理事、原副秘书长, 国家草产业科技创新联盟常务理事, 中国草学会饲料生产专业委员会常务理事, 中国植物营养与肥料学会施肥技术专业委员会原委员, 农业农村部“振兴奶业苜蓿发展行动”专家组专家, 中国薯网测土施肥技术顾问, “中国草都”首席顾问。创建了以“零散试验数据整合法”“土壤养分丰缺分级改良方案”“养分平衡—地力差减法新应用公式”为核心的作物测土推荐施肥系统研究新方法”, 并采用该法建立了紫花苜蓿、燕麦、大麦、谷子、荞麦、甜菜、甘蔗、柑橘、苹果、桃、葡萄、番茄、黄瓜、西瓜、棉花等诸多作物的土壤养分丰缺指标推荐施肥系统。创建了作物施肥量通用检索表。以第一作者或通信作者身份正式发表论文 100 余篇, 主编及副主编出版专著 9 部, 以第一起草人身份编制国家级团体标准和省级地方标准 6 项。