

青稞养分吸收特征研究

陈初红^{1,2}, 索朗旦增^{1,2}, 索朗多吉^{1,2}, 袁成立^{1,2}, 田科兴³, 琼卓玛⁴

(1. 西藏自治区拉萨市农业科学研究所, 西藏 拉萨 850000; 2. 西藏自治区拉萨市农业技术研究推广站, 西藏 拉萨 850000; 3. 西藏自治区拉萨市林周县农业技术推广站, 西藏 林周 851600; 4. 西藏自治区拉萨市堆龙德庆区农业技术推广站, 西藏 堆龙德庆 851400)

摘要:在2008—2023年拉萨市测土配方施肥“3414”田间肥效试验数据基础上, 分析了青稞产量、施肥量与收获指数的关系, 评价了青稞籽粒养分含量与吸收量、养分内在效率与吨粮养分吸收等青稞养分吸收特征, 为更加准确地优化青稞肥料用量, 提高肥料利用效率, 积极推进化肥减量增效行动, 提升耕地质量、提高青稞产量提供了科学的数据支撑。

关键词:收获指数; 养分内在效率; 吨粮养分吸收

中图分类号: S512.3

文献标志码: A

Study on Nutrient Absorption Characteristics of Highland Barley

CHEN Chuhong^{1,2}, Suolangdanzeng^{1,2}, Suolangduoji^{1,2}, YUAN Chengli^{1,2}, TIAN Kexing³, Qiongzuoma⁴

(1. Lhasa Agricultural Science Institute, Tibet Autonomous Region, Tibet Lhasa 850000, China; 2. Lhasa Agriculture Technology Research Extending Stations, Tibet Lhasa 850000, China; 3. Linzhou County Agricultural Technology Promotion Station, Tibet Linzhou 851600, China; 4. Duilongdeqing District Agricultural Technology Extension Station, Tibet Duilongdeqing 851400, China)

Abstract: Based on the field fertilizer efficiency test data of “3414” formula fertilization in Lhasa from 2008 to 2023, this paper analyzed the relationship between the yield, fertilizer amount and harvest index of highland barley, and evaluated the nutrient absorption characteristics of highland barley such as grain nutrient content and absorption amount, nutrient internal efficiency and nutrient absorption per ton of grain. This paper provides scientific data support for optimizing the fertilizer amount of highland barley more accurately, improving fertilizer utilization efficiency, actively promoting fertilizer reduction and efficiency improvement action, improving the quality of cultivated land, and increasing the yield of highland barley.

Key Words: harvest index; nutrient intrinsic efficiency; tons of grain nutrient absorption

青稞是禾本科大麦属的一种禾谷类作物, 主要产自我国的西藏、青海、四川、云南、甘肃等高海拔地区, 是藏族人民的主要粮食, 对藏区经济发展和社会稳定具有十分重要的意义。2023年西藏全区青稞播种面积14.86万hm², 占农作物播种面积的52.80%^[1], 在青稞生产中施肥不合理问题十分普遍, 不但无法很好地满足农作物生长发育和化肥减量增效的需要, 而且还会造成耕地质量下降。因此, 以我区重要的粮食作物青稞为研究对象, 开展适合青稞生产特点的养分管理尤为重要。开展青

稞养分管理的重要前提是了解青稞养分吸收特征, 然而目前缺乏对青稞长期养分吸收情况的综合研究。本文以青稞主要需要的大量元素氮、磷、钾为研究对象, 分析不同施肥水平下青稞养分吸收特征, 为更加准确地优化青稞肥料用量, 提高肥料利用效率, 积极推进化肥减量增效行动, 提升耕地质量、提高青稞产量等提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文中青稞籽粒产量、N、P、K含量及累积量, 收获指数, 肥料施用量等参数的数据均来自2008—2023年拉萨市测土配方施肥“3414”田间肥效试验, 主要包括在林周、墨竹工卡、达孜、堆龙德

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 2024年拉萨重点科技计划项目: 拉萨农田土壤基础地力与养分利用效率协同提升技术研究(LSKJ202422)。

作者简介: 陈初红(1979-), 男, 正高级农艺师, 主要从事土壤肥料及作物栽培研究, E-mail: wsrf921@163.com。

庆、曲水、尼木等6个拉萨商品粮基地县开展的84个试验。试验地pH值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾等土壤特性数据见表1。

1.2 试验设计

“3414”田间肥效试验是获得各种作物最佳施肥量的根本途径,是建立施肥指标体系的基本环节。“3414”是指氮、磷、钾3个因素、4个水平、14个处理。4个水平的含义:0水平指不施肥;2水平指当地最佳施肥量;1水平=2水平×0.5;3水平=2水平×1.5(该水平为过量施肥水平)。各处理设计见表2。试验肥料品种均为单质肥料,氮肥品种为尿素,磷肥品种为过磷酸钙或重过磷酸钙,钾肥品种为氯化钾。所种植的作物为主推的青稞品种。

1.3 田间试验测产与检测

每个“3414”试验具体的处理采用完全随机排列,每个处理20 m²,3次重复,尿素分为基肥和拔节孕穗期追肥2次施用,磷钾肥在播种前作为基肥撒施。肥料的施用水平见表3。灌溉和其他栽培管理措施与当地大田管理措施相同。

收获时,在小区内按照“梅花”形或“S”形设置3个1 m²采样点采集青稞全植株,采样时间为青稞完熟期。采样分为茎叶部分和籽粒部分,茎叶部分包括茎叶和脱粒后的颖壳。不同处理籽粒和茎叶分别称质量计产。按照《植株全氮含量测定自动定氮仪法》(NY/T 2419)分别测定各处理茎叶、籽粒全氮含量;按照《植株全磷含量测定钼锑抗比色法》(NY/T 2421)或采用钒钼黄比色法分别测定各处理

表1 青稞“3414”试验地土壤特性

县区	pH值	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
林周	7.5~8.5	7.85~21.8	0.546~1.283	18.2~158	3.3~20.8	60~305
墨竹工卡	6.6~8.23	12.0~25.1	0.786~1.531	27.8~138.19	7.5~16.68	61~166
达孜	6.90~8.36	7.7~25.9	0.818~1.486	60.3~151.4	8.8~17.21	58.3~140.6
堆龙德庆	7.37~7.76	22.5~35	1.16~1.889	61.3~163	9.9~18.2	52~109
曲水	7.35~7.81	17.84~25.7	1.05~1.23	95.0~169	10.84~17.8	62~112
尼木	7.6~8.1	17.8~32.3	1.09~1.44	63~144	11.4~19.1	97~139

表2 3414田间肥效试验各处理设计

3414处理编号	处理	X1(N)	X2(P)	X3(K)
1	N0P0K0	0	0	0
2	N0P2K2	0	2	2
3	N1P2K2	1	2	2
4	N2P0K2	2	0	2
5	N2P1K2	2	1	2
6	N2P2K2	2	2	2
7	N2P3K2	2	3	2
8	N2P2K0	2	2	0
9	N2P2K1	2	2	1
10	N2P2K3	2	2	3
11	N3P2K2	3	2	2
12	N1P1K2	1	1	2
13	N1P2K1	1	2	1
14	N2P1K1	2	1	1

表3 2008—2023年拉萨市青稞“3414”试验施肥量

处理	施肥量			数据量/条
	N/(kg·667 m ⁻²)	P2O5/(kg·667 m ⁻²)	K2O/(kg·667 m ⁻²)	
1	0	0	0	66
2	0	3.51(1.20–4.37)	3.31(1.50–9.60)	62
3	3.55(3.14–4.78)	3.71(2.73–4.37)	4.53(2.37–7.73)	22
4	8.66(6.28–14.92)	0	3.35(1.50–9.60)	68
5	7.15(6.28–8.64)	1.80(1.365–2.185)	4.29(2.37–7.73)	26
6	8.66(6.28–14.79)	3.48(1.20–4.37)	3.35(1.50–9.60)	68
7	8.22(6.28–10.50)	5.57(4.095–6.555)	3.24(1.50–7.73)	49
8	8.66(6.28–14.79)	3.48(1.20–4.37)	0	68
9	7.15(6.28–8.64)	3.60(2.73–4.37)	2.15(1.185–3.865)	26
10	8.22(6.28–10.50)	3.71(2.73–4.37)	4.85(2.25–11.595)	49
11	12.28(9.32–15.75)	3.775(2.73–4.37)	3.26(1.50–7.73)	45
12	3.55(3.14–4.78)	1.855(1.365–2.185)	4.53(2.37–7.73)	22
13	3.55(3.14–4.78)	3.71(2.73–4.37)	2.26(1.185–3.865)	22
14	7.15(6.28–8.64)	1.8(1.365–2.185)	2.07(0.9375–3.865)	26

茎叶、籽粒全磷含量;按照《植株全钾含量测定火焰光度计法》(NY/T 2420)分别测定各处理茎叶、籽粒全钾含量。

1.4 参数介绍及计算方法

养分内在效率(IE):地上部干物质吸收单位养分(N、P或K)所生产的籽粒产量,反映了地上部吸收养分对籽粒产量形成的效率高低。

吨粮养分吸收(RIE):生产1 000 kg籽粒产量地上部所吸收的N、P或K养分量。

收获指数(HI):籽粒干质量与地上部干物质量的比值。

N、P、K养分的收获指数(NHI、PHI或KHI)是籽粒中N、P、K养分累积量与地上部植株各养分累积总量的比值。

1.5 数据统计

基于WPS2024软件对数据进行汇总分析。

2 结果与分析

2.1 产量、施肥量与收获指数

本研究汇总2008—2023年数据($n=619$),青稞平均产量为209 kg/667 m²,变异范围较大,从27 kg/667 m²到438 kg/667 m²不等。统计施肥量,N、P₂O₅和K₂O的施用范围分别为0~15.75 kg/667 m²、0~6.555 kg/667 m²和0~11.595 kg/667 m²,平均的N、P₂O₅和K₂O施肥量分别为6.33 kg/667 m²、2.76 kg/667 m²和2.70 kg/667 m²。根据表4可知,约有26.17%和33.28%的施氮量分布在6~8 kg/667 m²、8~10 kg/667 m²范围内,约有21.32%、12.44%和32.63%的P₂O₅施用量分布在2~3 kg/667 m²、

3~4 kg/667 m²和4~5 kg/667 m²范围内,K₂O的施用水水平较低,约有44.91%、30.37%、19.06%的样本分别分布在0~2 kg/667 m²、2~4 kg/667 m²、4~6 kg/667 m²范围内。

表4 青稞氮磷钾施肥量范围占比

元素	用量	个数	占比/%
N/(kg·667 m ⁻²)	0~2	128	20.68
	2~4	54	8.72
	4~6	12	1.94
	6~8	162	26.17
	8~10	206	33.28
	10~12	27	4.36
	12~14	6	0.97
	14~16	24	3.88
	0~1	134	21.65
	1~2	41	6.62
P/(kg·667 m ⁻²)	2~3	132	21.32
	3~4	77	12.44
	4~5	202	32.63
	5~6	3	0.48
	6~7	30	4.85
	0~2	278	44.91
	2~4	188	30.37
K/(kg·667 m ⁻²)	4~6	118	19.06
	6~8	17	2.75
	8~10	15	2.42
	10~12	3	0.48

青稞收获指数范围处于0.12~0.74之间,平均收获指数为0.44。该平均收获指数与前人麦类作物平均收获指数接近^[2-4]。低的收获指数表明作物产量受到了病虫害或旱涝害等环境因素的影响^[5]。

收获指数的整体分布情况见图1,产量主要分布在150~300 kg/667 m²范围内,其对应的收获指数分布在0.35~0.50范围内。整个汇总数据中约有63.81%的数据 $HI \geq 0.40$ 。

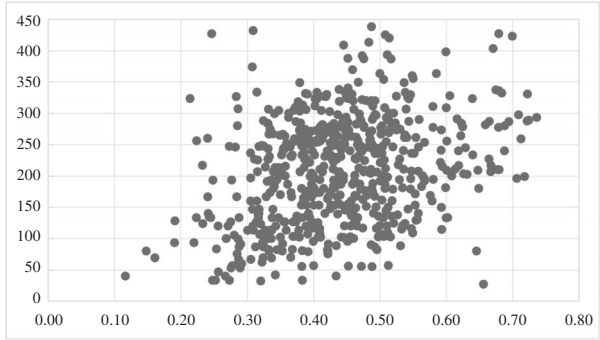


图1 青稞籽粒产量与收获指数的关系

2.2 养分含量与吸收量

由表5可知,青稞籽粒平均氮磷钾养分含量为11.97 g/kg、2.97 g/kg 和4.86 g/kg,茎叶部位平均氮磷钾含量为6.08 g/kg、0.88 g/kg 和10.18 g/kg。植株总体氮吸收累积量范围为2.57~6.39 kg/667 m²,平均为4.49 kg/667 m²;磷累积量范围为0.58~1.1 kg/667 m²,平均为0.86 kg/667 m²;钾累积量范围为2.21~6.33 kg/667 m²,平均为4.27 kg/667 m²。地上部平均

N、P 和 K 养分吸收量分别为161.2、40.5 kg/667 m² 和136.1 kg/667 m²,籽粒部位的N、P 和 K 养分累积量分别为2.60、0.60 kg/667 m²和1.00 kg/667 m²。氮磷钾养分的收获指数(N_{HI} 、 P_{HI} 和 K_{HI})分别为0.58、0.69和0.26,表明地上部累积的N和P约有58%和69%转移到籽粒中,而约有74%的K累积在茎叶中。因此,籽粒是地上部N和P养分的主要储存器官,而茎叶是K养分主要储存器官。

2.3 养分内在效率与吨粮养分吸收

养分内在效率是指地上部吸收单位养分所能生产的籽粒产量,吨粮养分吸收指养分内在效率的倒数,即为生产1 000 kg 籽粒产量所需要的养分量。本研究结果显示(表6),氮、磷和钾平均养分内在效率分别为54.02 kg 籽粒/kg N、422.72 kg 籽粒/kg P 和57.23 kg 籽粒/kg K;生产1 000 kg 籽粒产量需要22.0 kg N,4.47 kg P 和20.50 kg K,其氮磷钾比例为4.92:1:4.59。最佳施肥处理(处理6),氮磷钾养分内在效率分别为49.18、588.89和56.37 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量所需要的氮磷钾养分分别为23.20 kg/kg、4.14 kg/kg 和20.46 kg,氮磷钾比例为5.60:1:4.94。不施肥处理(处理1),氮磷钾养分内

表5 不同处理青稞养分吸收特征

处理	参数	单位	个数	均值	标准差	最小值	第25百分位数	中位数	第75百分位数	最大值
处理1	籽粒 N 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	12.51	4.38	4.86	8.52	12.88	14.9	21.01
	籽粒 P 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	3.23	1.32	0.08	2.60	3.48	4.19	6.02
	籽粒 K 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	4.84	1.29	1.70	4.11	5.02	5.77	7.37
	茎叶 N 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	5.57	2.25	1.48	3.77	5.76	6.90	10.30
	茎叶 P 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	1.16	0.78	0.06	0.73	1.06	1.65	5.37
	茎叶 K 含量	$g \cdot kg^{-1}$	66	9.26	3.32	2.29	6.66	9.37	11.95	15.87
	籽粒 N 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	1.58	1.09	0.23	0.89	1.25	2.07	5.98
	籽粒 P 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	0.37	0.20	0	0.26	0.35	0.50	0.83
	籽粒 K 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	0.55	0.21	0.15	0.43	0.50	0.68	1.20
	茎叶 N 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	0.99	0.51	0.09	0.57	0.95	1.31	2.60
	茎叶 P 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	0.20	0.14	0	0.11	0.17	0.25	0.85
	茎叶 K 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	1.66	0.80	0.17	1.10	1.66	2.11	3.88
	植株 N 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	2.57	1.38	0.35	1.69	2.19	3.16	7.46
	植株 P 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	0.58	0.28	0	0.40	0.57	0.75	1.19
	植株 K 累积	$kg \cdot 667 m^{-2}$	66	2.21	0.94	0.32	1.56	2.19	2.71	4.87
	$N-HI$		66	0.60	0.15	0.18	0.52	0.64	0.70	0.83
	$P-HI$		66	0.64	0.13	0.28	0.56	0.65	0.73	0.90
	$K-HI$		66	0.27	0.08	0.13	0.21	0.26	0.31	0.54
	籽粒 HI		66	0.46	0.10	0.23	0.39	0.47	0.51	0.71

续表

处理	参数	单位	个数	均值	标准差	最小值	第25百分位数	中位数	第75百分位数	最大值
处理2	籽粒 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	11.66	4.31	4.19	8.12	12.11	14.47	26.97
	籽粒 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	3.25	1.35	0.07	2.74	3.59	4.20	5.48
	籽粒 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	5.11	1.46	2.10	4.29	5.18	5.96	11.28
	茎叶 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	6.15	3.79	1.40	3.93	5.55	7.10	23.70
	茎叶 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	1.27	0.98	0.08	0.78	1.14	1.64	6.44
	茎叶 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	10.60	3.81	2.94	8.00	11.20	14.23	17.50
	籽粒 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	1.56	1.11	0.18	0.81	1.27	2.14	6.61
	籽粒 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	0.40	0.24	0.00	0.25	0.37	0.53	1.01
	籽粒 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	0.61	0.28	0.15	0.44	0.59	0.73	1.52
	茎叶 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	1.11	0.60	0.13	0.64	0.97	1.57	2.54
	茎叶 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	0.23	0.15	0.01	0.12	0.20	0.31	0.79
	茎叶 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	2.02	1.04	0.33	1.32	1.98	2.47	4.79
	植株 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	2.66	1.49	0.31	1.64	2.31	3.39	8.58
	植株 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	0.63	0.36	0.01	0.39	0.58	0.88	1.38
	植株 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	62	2.63	1.24	0.52	1.83	2.61	3.33	5.66
	<i>N-HI</i>		62	0.57	0.17	0.17	0.52	0.60	0.67	0.82
	<i>P-HI</i>		62	0.62	0.14	0.15	0.56	0.63	0.73	0.83
	<i>K-HI</i>		62	0.25	0.07	0.11	0.20	0.24	0.30	0.41
	籽粒 <i>HI</i>		62	0.42	0.09	0.24	0.35	0.43	0.48	0.63
处理4	籽粒 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	13.56	4.88	4.19	8.82	14.05	16.83	23.50
	籽粒 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	2.81	1.15	0.08	2.33	2.87	3.50	5.64
	籽粒 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	4.93	1.21	2.40	4.17	5.07	5.82	7.77
	茎叶 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	6.19	2.45	1.23	4	6.59	8.10	12.90
	茎叶 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	0.67	0.37	0.04	0.44	0.63	0.82	2.36
	茎叶 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	11.02	3.95	2.80	8.31	11.40	14.03	17.48
	籽粒 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	3.17	1.58	0.55	1.88	2.97	4.34	6.74
	籽粒 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.63	0.31	0.02	0.44	0.67	0.80	1.42
	籽粒 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	1.12	0.40	0.24	0.84	1.18	1.35	2.10
	茎叶 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	2.06	1.14	0.39	1.10	1.91	2.72	5.01
	茎叶 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.23	0.16	0.01	0.12	0.18	0.29	0.94
	茎叶 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	3.77	2.16	0.47	2.08	3.20	5.34	9.87
	植株 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	5.23	2.33	1.25	3.47	4.92	6.75	11.10
	植株 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.86	0.41	0.03	0.61	0.89	1.10	1.72
	植株 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	4.88	2.44	0.71	2.80	4.50	6.75	11.14
	<i>N-HI</i>		68	0.60	0.14	0.21	0.53	0.63	0.70	0.85
	<i>P-HI</i>		68	0.73	0.11	0.43	0.65	0.75	0.81	0.90
	<i>K-HI</i>		68	0.26	0.09	0.11	0.19	0.24	0.30	0.47
	籽粒 <i>HI</i>		68	0.46	0.10	0.22	0.38	0.45	0.51	0.72

续表

处理	参数	单位	个数	均值	标准差	最小值	第25百分位数	中位数	第75百分位数	最大值
处理6	籽粒 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	13.41	4.89	4.87	9.61	13.30	17	25.82
	籽粒 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	3.03	1.29	0.07	2.36	3.30	3.88	5.98
	籽粒 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	5.06	1.57	2.30	4.08	5.01	5.83	12.94
	茎叶 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	6.79	3.73	1.51	4.14	6.65	8.11	23.72
	茎叶 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	0.74	0.31	0.06	0.58	0.75	0.91	1.44
	茎叶 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	10.85	3.86	2.86	7.91	11.20	13.23	18.3
	籽粒 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	3.67	1.90	0.46	2.26	3.26	5.21	8.67
	籽粒 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.78	0.42	0.02	0.48	0.70	1.08	1.82
	籽粒 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	1.33	0.59	0.48	1	1.22	1.49	3.52
	茎叶 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	2.53	1.79	0.49	1.37	2.45	3.07	12.03
	茎叶 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.27	0.15	0.03	0.16	0.24	0.37	0.78
	茎叶 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	4	1.91	0.76	2.64	3.83	5.21	8.48
	植株 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	6.20	2.93	1.10	3.92	6.25	7.93	16.25
	植株 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	1.04	0.51	0.06	0.68	1	1.41	2.11
	植株 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	5.33	2.29	1.24	3.77	5.12	6.89	10.95
	<i>N-HI</i>		68	0.60	0.16	0.23	0.55	0.62	0.70	0.84
	<i>P-HI</i>		68	0.72	0.12	0.37	0.65	0.73	0.79	0.90
	<i>K-HI</i>		68	0.27	0.08	0.16	0.20	0.24	0.33	0.47
	籽粒 <i>HI</i>		68	0.46	0.11	0.25	0.38	0.45	0.54	0.70
处理8	籽粒 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	13.68	4.73	4.48	9.33	13.87	17.35	27.21
	籽粒 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	3.04	1.26	0.09	2.40	3.28	3.97	5.69
	籽粒 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	4.94	1.50	2.30	4.06	4.91	5.68	12.49
	茎叶 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	6.19	2.37	1.40	4.17	6.40	8.01	10.8
	茎叶 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	0.81	0.61	0.04	0.54	0.73	0.86	4.66
	茎叶 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	68	9.82	3.59	2.03	7.84	9.59	12.7	16.7
	籽粒 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	3.15	1.55	0.46	2	2.94	3.98	6.52
	籽粒 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.66	0.33	0.01	0.44	0.64	0.87	1.30
	籽粒 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	1.10	0.53	0.25	0.80	1.03	1.33	3.96
	茎叶 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	2.07	1.06	0.48	1.09	2.09	2.81	4.86
	茎叶 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.26	0.17	0.01	0.15	0.21	0.36	0.80
	茎叶 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	3.40	1.84	0.38	1.91	3.26	4.77	7.72
	植株 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	5.22	2.32	1.32	3.55	5.07	6.89	11
	植株 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	0.92	0.45	0.02	0.67	0.85	1.21	1.90
	植株 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	68	4.50	2.21	0.63	2.73	4.31	6.15	9.29
	<i>N-HI</i>		68	0.60	0.14	0.21	0.53	0.63	0.71	0.81
	<i>P-HI</i>		68	0.71	0.11	0.31	0.66	0.72	0.79	0.87
	<i>K-HI</i>		68	0.27	0.09	0.15	0.20	0.26	0.32	0.47
	籽粒 <i>HI</i>		68	0.47	0.09	0.25	0.40	0.47	0.53	0.69
处理1-14	籽粒 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	11.97	4.77	3.35	8.02	10.6	15.45	27.21
	籽粒 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	2.97	1.10	0.07	2.29	3	3.68	6.14
	籽粒 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	4.86	1.17	1.7	4.10	4.72	5.58	12.94
	茎叶 N 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	6.08	2.99	1.12	3.49	6.20	8.21	23.72
	茎叶 P 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	0.88	0.70	0.04	0.57	0.75	1	7.66
	茎叶 K 含量	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	619	10.18	3.97	2.03	7.49	10.70	13.20	19.80
	籽粒 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	619	2.60	1.67	0.18	1.31	2.22	3.53	8.67
	籽粒 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	619	0.60	0.32	0	0.38	0.56	0.78	1.82
	籽粒 K 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	619	1	0.47	0.15	0.63	0.98	1.28	3.96
	茎叶 N 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	619	1.89	1.26	0.09	0.89	1.62	2.64	12.03
	茎叶 P 累积	$\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	619	0.25	0.17	0	0.14	0.22	0.32	2.13

续表

处理	参数	单位	个数	均值	标准差	最小值	第25百分位数	中位数	第75百分位数	最大值
处理 1-14	茎叶 K 累积	kg·667 m ⁻²	619	3.27	2.05	0.17	1.61	2.79	4.61	10.02
	植株 N 累积	kg·667 m ⁻²	619	4.49	2.49	0.31	2.55	4	6.01	16.25
	植株 P 累积	kg·667 m ⁻²	619	0.86	0.40	0	0.61	0.80	1.09	2.30
	植株 K 累积	kg·667 m ⁻²	619	4.27	2.42	0.32	2.26	3.80	5.84	12.01
	<i>N-HI</i>		619	0.58	0.17	0.09	0.47	0.61	0.70	0.88
	<i>P-HI</i>		619	0.69	0.14	0.07	0.62	0.72	0.78	0.94
	<i>K-HI</i>		619	0.26	0.08	0.10	0.20	0.24	0.31	0.60
	籽粒 <i>HI</i>		619	0.44	0.11	0.12	0.37	0.43	0.50	0.74

在效率分别为52.76 kg/kg、537.88 kg/kg和59.07 kg/kg，生产1 000 kg籽粒产量所需要的氮磷钾养分分别为21.64 kg/kg、5.18 kg/kg和19.40 kg/kg。缺氮处理（处理2），氮磷钾养分内在效率分别为52.97 kg/kg、514.70 kg/kg和52.04 kg/kg，生产1 000 kg籽粒产量所需要的氮磷钾养分分别为21.69 kg、5.34 kg和21.98 kg。缺磷处理（处理4），氮磷钾养分内在效率分别为50.10 kg、612.46 kg和55.57 kg/kg，生产1 000 kg籽粒产量所需要的氮磷钾养分分别为23.09 kg/kg、3.86 kg/kg和21.22 kg/kg。缺钾处理（处理8），氮磷钾养分内在效率分别为48.81 kg/kg、563.93 kg/kg和59.49 kg/kg，生产1 000 kg籽粒产量所需要氮磷钾养分分别为23.65 kg、4.34 kg和

19.96 kg。由处理1-14可知，青稞氮、磷和钾 *RIE* 均值分别为22 kg N/kg，4.47 kg P/kg和20.5 kg K/kg，磷素的需求量较低。

当收获指数 *HI*<0.40或*HI*>0.60时，N的养分内在效率相对较低（表7）。低的N养分内在效率表明作物受到了来自外界环境的胁迫，导致相对过多的N累积在作物体中，从而使生产1 000 kg籽粒产量所需的养分吸收偏高。磷养分的内在效率与氮不同，它是在*HI*<0.40和*HI*>0.60时相对高于*HI*=0.40-0.60时的养分内在效率，表明当青稞受到外界环境胁迫时，青稞对磷的吸收过程受阻，地上部P的累积量偏低，导致生产1 000 kg籽粒产量所需要的磷养分偏低。钾养分的内在效率随着收获指数的增加而增加。

表6 青稞氮、磷和钾养分内在效率和吨粮养分吸收

处理	参数	<i>IE-N</i>	<i>IE-P</i>	<i>IE-K</i>	<i>RIE-N</i>	<i>RIE-P</i>	<i>RIE-K</i>
处理1	个数	66	66	66	66	66	66
	均值	52.76	537.88	59.07	21.64	5.18	19.40
	标准差	23.23	1275.22	21.60	6.70	2.44	7.39
	最小值	27.11	81.90	24.86	7.56	0.14	8.26
	第25百分位数	39.01	143.37	39.66	17.72	4	13.63
	中位数	43.40	200.18	57.42	23.04	5	17.42
	第75百分位数	56.48	250.07	73.40	25.63	6.98	25.22
	最大值	132.22	6923.08	121.05	36.88	12.21	40.23
处理2	个数	62	62	62	62	62	62
	均值	52.97	514.70	52.04	21.69	5.34	21.98
	标准差	22.89	1163.90	19.79	7.40	2.44	8.14
	最小值	24.30	70.31	20.58	7.31	0.17	9.55
	第25百分位数	40.65	141.52	36.57	18.08	4.07	15.99
	中位数	45.60	178.69	48.21	21.93	5.60	20.74
	第75百分位数	55.31	245.63	62.55	24.60	7.07	27.35
	最大值	136.82	5744.95	104.75	41.16	14.22	48.58
处理4	个数	68	68	68	68	68	68
	均值	50.10	612.46	55.57	23.09	3.86	21.22

续表

处理	参数	<i>IE</i> -N	<i>IE</i> -P	<i>IE</i> -K	<i>RIE</i> -N	<i>RIE</i> -P	<i>RIE</i> -K
处理4	标准差	23.17	1321.77	24.44	7.64	1.59	8.15
	最小值	25.03	119.25	22.99	6.81	0.15	8.47
	第25百分位数	34.8	209.46	36.20	18.51	3.10	14.34
	中位数	42.41	250.57	49.16	23.58	3.99	20.34
	第75百分位数	54.02	322.14	69.75	28.74	4.77	27.63
	最大值	146.93	6624.84	118.02	39.96	8.39	43.50
	个数	68	68	68	68	68	68
处理6	均值	49.18	588.99	56.37	23.2	4.14	20.46
	标准差	20.88	1317.34	22.34	7.42	1.65	7.55
	最小值	26.28	148.42	26.82	7.62	0.14	7.77
	第25百分位数	35.22	192.39	39.09	17.75	3.22	14.08
	中位数	41.63	223.56	49.55	24.02	4.47	20.18
	第75百分位数	56.34	310.91	71.11	28.39	5.2	25.58
	最大值	131.18	7100.59	128.78	38.05	6.74	37.28
处理8	个数	68	68	68	68	68	68
	均值	48.81	563.93	59.49	23.65	4.34	19.96
	标准差	21.30	1245.09	25.43	8.27	2.11	8.40
	最小值	19.42	72.03	20.28	7.90	0.13	7.33
	第25百分位数	34.33	181	39.07	18.55	3.18	13.48
	中位数	42.84	235.63	54.9	23.34	4.24	18.21
	第75百分位数	53.89	314.67	74.19	29.13	5.53	25.60
处理1-14	最大值	126.55	7432.59	136.49	51.49	13.88	49.31
	个数	619	619	619	619	619	619
	均值	54.02	422.72	57.23	22	4.47	20.50
	标准差	24.77	936.44	23.30	8.78	2.25	8.53
	最小值	13.41	30.13	13.44	5.68	0.13	7.21
	第25百分位数	37.01	185.1	39.46	14.88	3.26	14.17
	中位数	44.61	240.03	52.19	22.42	4.17	19.16
	第75百分位数	67.22	306.75	70.60	27.02	5.40	25.34
	最大值	176.14	7432.59	138.63	74.57	33.19	74.43

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究中来自2008—2023年期间的多年多点青稞生产和养分吸收数据,统计结果显示最佳施肥处理(处理6),氮磷钾养分的内在效率分别为49.18 kg/kg、588.89 kg/kg 和 56.37 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量需要的氮磷钾养分分别为23.20 kg、4.14 kg 和 20.46 kg。缺氮处理(处理2),氮磷钾养分内在效率分别为52.97 kg/kg、514.70 kg/kg 和 52.04 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量需要的氮磷钾养分分别为21.69 kg、5.34 kg 和 21.98 kg。缺磷处理(处理4),氮磷钾养分内在效率分别为50.10 kg/kg、612.46 kg/kg 和 55.57 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量需要氮磷钾养分分别为

23.09 kg、3.86 kg 和 21.22 kg。缺钾处理(处理8),氮磷钾养分内在效率分别为48.81 kg/kg、563.93 kg/kg 和59.49 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量需要的氮磷钾养分分别为23.65 kg、4.34 kg 和 19.96 kg。14个处理氮磷钾养分内在效率平均值分别为54.02 kg 籽粒/kg N、422.72 kg 籽粒/kg P和57.23 kg 籽粒/kg K;生产1 000 kg 籽粒产量需要22 kg N、4.47 kg P 和 20.5 kg K。不施肥处理(处理1),氮磷钾养分内在效率分别为52.76 kg/kg、537.88 kg/kg 和 59.07 kg/kg,生产1 000 kg 籽粒产量需要氮磷钾养分分别为21.64 kg、5.18 kg 和 19.40 kg。

较高的养分内在效率数值或较低的吨粮养分吸收数值主要来自不施N、P或K肥的减素小区或完全不施化肥的空白小区。具体表现为氮的吨粮养分吸收(*RIE*-N):不施肥处理(21.64 kg)<缺氮处

表7 收获指数对青稞氮磷钾养分内在效率和吨粮养分吸收的影响

HI 范围	参数	个数	均值	标准差	最小值	第25百分位数	中位数	第75百分位数	最大值
<0.40	IE-N	224	47.38	22.45	13.41	33.31	41.46	52.54	176.14
	IE-P	224	413.56	946.40	30.13	175.25	228.08	311.54	7100.59
	IE-K	224	50.10	22.47	13.44	32.29	43.57	64.94	104.84
	RIE-N	224	24.87	9.89	5.68	19.03	24.12	30.02	74.57
	RIE-P	224	4.91	3.01	0.14	3.21	4.38	5.71	33.19
	RIE-K	224	24.16	10.66	9.54	15.40	22.95	30.97	74.43
0.40-0.60	IE-N	352	59.40	26.05	24.70	39.67	48.99	79.28	146.93
	IE-P	352	392.46	839.12	81.90	190.75	241.80	301.17	7432.59
	IE-K	352	57.22	19.76	29.19	42.40	53.19	65.63	133.05
	RIE-N	352	19.98	7.77	6.81	12.61	20.41	25.21	40.49
	RIE-P	352	4.32	1.64	0.13	3.32	4.14	5.24	12.21
	RIE-K	352	19.34	5.87	7.52	15.24	18.80	23.59	34.26
>0.60	IE-N	43	44.58	10.32	26.86	37.95	41.73	52.49	66.00
	IE-P	43	718.09	1471.69	159.14	242.46	272.89	321.51	6923.08
	IE-K	43	94.50	18.77	59.96	80.22	93.42	103.76	138.63
	RIE-N	43	23.63	5.49	15.15	19.07	23.96	26.35	37.23
	RIE-P	43	3.38	1.38	0.14	3.11	3.66	4.12	6.28
	RIE-K	43	10.99	2.15	7.21	9.64	10.70	12.47	16.68

理(21.69 kg)<缺磷处理(23.09 kg)<最佳施肥处理(23.20 kg)<缺钾处理(23.65 kg);磷的吨粮养分吸收(RIE-P):缺磷处理(3.86 kg)<最佳施肥处理(4.14 kg)<缺钾处理(4.34 kg)<不施肥处理(5.18 kg)<缺氮处理(5.34 kg);钾的吨粮养分吸收(RIE-K):不施肥处理(19.40 kg)<缺钾处理(19.96 kg)<最佳施肥处理(20.46 kg)<缺磷处理(21.22 kg)<缺氮处理(21.98 kg)。

本研究收集的测土配方施肥“3414”田间肥效试验处理1-14共619条数据,由于前期只是对不施肥处理、缺氮处理、最佳施肥处理、缺磷处理、缺钾处理进行了茎叶和籽粒养分含量检测,其余处理数据样本量较少,因此数据存在不平衡问题。14个处理中最多有68条、最少有22条数据,不同处理间的样本量差异低于10倍,少数样本覆盖大部分或全部特征的可能性较大,但综合平均值的试验分析结果有待进一步论证。

3.2 结论

基于2008—2023年拉萨市测土配方施肥“3414”田间肥效试验数据,汇总得到的拉萨青稞产量与养分吸收特征如下:

1)2008—2023年拉萨平均产量为209 kg/667 m²,平均氮磷钾肥施用量分别为6.33 kg/667 m²、2.76 kg/667 m²和2.70 kg/667 m²。青稞收获指数范围处于0.12至0.74范围内,平均收获指数为0.44。

2)地上部平均N、P和K养分吸收量分别为161.2 kg/667 m²、40.5 kg/667 m²和136.1 kg/667 m²,籽粒部位的N、P和K养分累积量分别为2.60 kg/667 m²、0.60 kg/667 m²和1.00 kg/667 m²。氮磷钾养分的收获指数(N_{HI}、P_{HI}和K_{HI})分别为0.58、0.69和0.26,表明地上部累积的N和P约有58%和69%转移到籽粒中,而约有74%的K累积在茎叶中。因此,青稞籽粒是地上部N和P养分的主要储存器官,而茎叶是K养分主要储存器官。

3)最佳施肥处理氮磷钾养分的内在效率分别为49.18 kg/667 m²、588.89 kg/667 m²和56.37 kg/667 m²,生产1 000 kg籽粒产量所需要的氮磷钾养分分别为23.20 kg、4.14 kg和20.46 kg,其氮磷钾比例为5.60:1:4.94。

参考文献:

[1]西藏自治区统计局.2023年西藏自治区国民经济和社会发展统计公报[R].2024.
[2]张福春,朱志辉.中国作物的收获指数[J].中国农业科学,1990,23(2):83-87.
[3]许为钢,胡琳.小麦收获指数的改良[J].种子,1994(5):42-44.
[4]袁葵洲,官春云.作物收获指数的研究概况[J].作物研究,1994,8(4):45-48.
[5]串丽敏.基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥方法研究[D].北京:中国农业科学院,2013.