

不同肥料配比对蚕豆养分吸收分配规律 和肥料利用率的影响

韩 梅

(青海省农林科学院土壤肥料研究所, 青海 西宁 810016)

摘 要: 通过小区试验研究氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用对蚕豆产量、养分吸收量和肥料利用效率等指标的影响。试验表明, 氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用对蚕豆子粒产量、地上生物量均有明显影响, 按肥料增产率由高到低的次序依次是 $N > P > K > Mo > B$ 。氮、磷、钾、硼、钼肥配施比例为 $1:0.99:0.86:0.0043:0.0023$, 能够促进蚕豆地上部养分的累积 N 为 $358.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P 为 $42.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K 为 $206.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮、磷、钾肥的农学利用率分别为 11.19 、 $15.70 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 肥料表观利用率分别为 19.35% 、 18.49% 和 20.25% ; 生理利用率分别为 57.82 、 $84.91 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.63 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。氮、磷、钾、硼、钼肥合理配施下, 生产 100 kg 蚕豆所需 N 为 4.9 kg , P_2O_5 为 1.1 kg , K_2O 4.9 kg , 氮磷钾比例约为 $1:0.22:1.00$ 。

关键词: 蚕豆; 肥料配施; 养分利用效率; 地上生物量; 子粒产量

中图分类号: S147.34 **文献标志码:** A

Effect of different fertilizer application on the yield and fertilizer uptake and utilization of broad bean

HAN Mei

(Institute of Soil and Fertilizer, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate effect of nitrogen, phosphorous, potassium, boron and molybdenum fertilizer on the yield, nutrient uptake and utilization of broad bean. The results showed that nitrogen, phosphorous, potassium, boron and molybdenum fertilizer had significant influence on yield and biomass and the yield increase percentage ranked $N > P > K > Mo > B$. Under $N:P:K:Mo:B = 1:0.99:0.86:0.0043:0.0023$, the accumulation amount of N , P and K in shoot was 358.55 , $42.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $206.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Agronomic use efficiency of N , P and K was 11.19 , $15.70 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $7.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Fertilizer use rate of N , P and K was 19.35% , 18.49% and 19.35% , respectively. Physiological use efficiency of N , P and K was 57.82 , $84.91 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $14.63 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The nutrient requirement for the broad bean grain of one hundred kilogram was 4.9 kg N , $1.1 \text{ kg P}_2\text{O}_5$, $4.9 \text{ kg K}_2\text{O}$, and $N:P:K$ ratio was about $1:0.22:1.00$.

Keywords: broad bean; fertilizer application; fertilizer use efficiency; aboveground biomass; grain yield

青海省总耕地面积 68.74 万 hm^2 , 占全省国土面积的 0.95% 。其中东部农业区约占本省耕地面积的 80% ^[1-3]。青海省农村施肥结构和施肥方法极不合理, 在施肥结构上主要表现为重施化肥、轻施有机肥, 重施氮肥、轻施磷肥、少施或不施钾肥 (2005 年时氮:磷:钾的比例为 $1:0.52:0.09$), 重施大量元素、轻施中(微)量元素的“三重三轻”的现象较为突出; 在施肥方法上表施和撒施的现象较为普遍。肥

料利用率低, 浪费严重^[4-6]。此外, 国内外从农学角度应用肥料表观利用率(也称肥料养分回收利用率、肥料吸收利用率)、肥料偏生产力、肥料农学利用率、肥料生理利用率等重要参数分析和评价了在不同作物上的肥料利用效率, 目前国内应用以上指标进行评价的主要有小麦、玉米、冬油菜、水稻, 这些肥料利用效率定量评价指标对于准确分析不同作物对肥料的响应程度和指导施肥具有重要意义。因此,

收稿日期: 2016-04-12

修回日期: 2017-03-20

基金项目: 青海省蚕豆产业技术转化研发平台; 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201103005)

作者简介: 韩梅(1974—), 女, 青海湟中人, 副研究员, 主要从事耕作与绿肥等方面的研究与推广工作。E-mail: hanmei20061234@sina.com。

2013—2015年,在青海省蚕豆生产较为集中的互助县开展肥料养分效应研究,探讨氮、磷、钾、硼、钼肥对蚕豆产量和肥料利用效率等方面的影响,掌握其养分吸收和累积规律,以期为同类地区蚕豆生产和养分管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验安排在青海省互助县西山乡东山村。试验地海拔2 580 m,年平均气温为3.4℃,年平均日照时数2 521 h,年降水量约400 mm。属于温带大陆性气候,干旱少雨。

1.2 供试土壤理化性质

互助县西山乡东山村供试土壤为山地淡栗钙土,有机质含量16.45 g·kg⁻¹,全氮1.12 g·kg⁻¹,全磷1.70 g·kg⁻¹,全钾14.28 g·kg⁻¹,碱解氮52 mg·kg⁻¹,速效磷13.5 mg·kg⁻¹,速效钾38.7 mg·kg⁻¹。

1.3 试验方案

试验设7个施肥处理,即不施肥、NPKBMo、不施氮(PKBMo)、不施磷(NKBMo)、不施钾(NPBMo)、不施硼(NPKMo)和不施钼(NPKB)。共7个处理,4次重复,随机区组排列。各处理氮、磷、钾、硼、钼肥施用量分别为:N 105 kg·hm⁻², P₂O₅ 103.5 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻², B 0.45 kg·hm⁻², Mo 0.24 kg·hm⁻²,肥料在播种前作为基肥一次性施入土壤^[7-9]。田间密度为21万株·hm⁻²,行距30 cm,株距15 cm,小区面积3.6 m×5 m=18 m²。

1.4 样品采集与测定

采集蚕豆苗期、分枝期、现蕾期、开花期、结荚期和成熟期植株样。蚕豆成熟后,各小区随机取样5株,分成子粒、茎秆和角壳,剪碎混匀后60℃烘干,分别磨细、过0.5 mm筛,供分析测定用。子粒产量以各小区实收风干重计量,茎秆及角壳产量由取样植株茎秆、角壳与子粒的比例计算得出。

土壤养分含量采用常规农化分析方法测定,植株全氮采用蒸馏—滴定法测定,植株全磷采用高氯酸—浓硫酸消煮—钼锑抗比色法测定;植株全钾采用火焰光度法测定^[10]。

1.5 肥料利用率计算公式及统计方法

植株氮积累量(kg·hm⁻²) = 相应部位干物质重量×养分含量;

肥料农学利用率(kg·kg⁻¹) = (施肥区子粒产量 - 不施肥区子粒产量) ÷ 肥料施用量;

肥料偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施肥区子粒产量 ÷ 肥料施用量;

肥料表观利用率(%) = (收获期施肥区地上部总吸收量 - 收获期不施肥区地上部总吸收量) ÷ 肥料施用量 × 100%;

肥料生理利用率(kg·kg⁻¹) = (施肥区子粒产量 - 不施肥区子粒产量) ÷ (收获期施肥区地上部总吸收量 - 收获期不施肥区地上部总吸收量);

收获指数(kg·kg⁻¹) = 子粒产量 ÷ 地上部总生物量;

肥料利用率(%) = (施肥区产量 - 不施肥区产量) × 100 ÷ 不施肥区产量^[11-13]。

试验数据采用Excel 2003进行数据整理,用DPS软件进行统计分析。

2 结果分析

2.1 氮、磷、钾、硼、钼肥的合理配施对蚕豆产量的影响

通过对青海13号蚕豆收获期产量和地上生物量的分析,结果表明氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用对子粒产量、地上生物量和收获指数均有明显影响(表1)。与不施肥(CK)相比,各施肥处理产量均有增加,增产率在43.82%~88.34%之间,其中NPKBMo处理增产率最高,为88.34%,产量为6 875.23 kg·hm⁻²;不施肥处理产量最低,仅为3 650.46 kg·hm⁻²。最优组合为(N 105 kg·hm⁻², P₂O₅ 103.5 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻², B 0.45 kg·hm⁻², Mo 0.24 kg·hm⁻²)。NPKBMo处理与缺氮、缺磷、缺钾的处理(PKBMo、NKBMo、NPBMo)间差异显著(P < 0.5),说明氮、磷、钾三种养分都是影响蚕豆生长的重要营养元素,缺氮、缺磷、缺钾对蚕豆的产量影响较大,增产率分别为44.52%、32.17%、18.46%,说明对蚕豆产量影响最明显的是氮肥和磷肥,其次是钾肥。通过对NPKBMo、NPKMo、NPKB三个处理的比较,硼、钼肥对蚕豆的产量也有一定的影响,增产率分别为11.09%、11.64%。氮、磷、钾、硼、钼肥配合施肥对蚕豆产量提高有不同的效应,按肥料增产率由高到低的次序依次是N > P > K > Mo > B,减磷、氮、钾肥处理对产量影响较大,减硼、钼肥处理对产量影响较小。

2.2 氮、磷、钾、硼、钼肥施用对蚕豆养分累积量的影响^[14]

氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用显著促进了收获期青海13号蚕豆不同部位的N素累积量,其中子粒中N素累积量最多,其次为叶片,茎秆中最少。与不施肥处理相比,施肥后青海13号蚕豆地上部不同器官中的N素累积量均有增加,其中NPKBMo处理增加最高,N素累积量比对照高出90.83%(表2)。

表 1 施肥对青海 13 号地上生物量及产量的影响

Table 1 Effect of fertilizer application on the aboveground biomass and yield in Qinghai 13

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	增产率 Yield increase /%	地上生物量 Aboveground biomass (kg·hm ⁻²)	增产率 Biomass increase /%	收获指数 Harvest index/(kg·kg ⁻¹)
NPKBMo	6875.23a	88.34	17875.6a	119.98	0.38
PKBMo	5250.16bc	43.82	13125.4c	61.52	0.40
NKBMo	5700.76bc	56.17	14536.94c	78.89	0.39
NPBMo	6200.54b	69.86	15501.35b	90.76	0.40
NPKM ₀	6470.32b	77.25	16175.8b	99.06	0.40
NPKB	6450.23b	76.70	16125.58b	98.44	0.40
CK	3650.46d	—	8126.15d	—	0.41

表 2 施肥对青海 13 号蚕豆 N 素累积量和分配比例的影响

Table 2 Effect of fertilizer application on N accumulation and its distribution in Qinghai 13

处理 Treatment	N/(kg·hm ⁻²)					分配比例 Distribution percentage/%			
	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf	合计 Total	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf
NPKBMo	292.88	28.63	30.08	6.96	358.55	81.69	7.98	8.39	1.94
PKBMo	242.68	53.91	35.70	5.95	338.23	71.75	15.94	10.55	1.76
NPKM ₀	233.05	20.89	24.05	6.59	284.58	81.89	7.34	8.45	2.32
NKBMo	261.10	27.64	26.58	5.93	321.26	81.28	8.60	8.28	1.85
NPBMo	263.53	40.41	35.89	6.24	346.08	77.45	11.04	9.80	1.71
NPKB	267.88	26.39	35.83	7.82	337.92	79.27	7.81	10.60	2.31
CK	154.67	15.13	14.08	4.00	187.89	82.32	8.06	7.49	2.13

氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用显著促进了收获期青海 13 号蚕豆不同部位的 P 素累积量, P 素累积量子粒中含量最多, 依次是子粒 > 叶片 > 角壳 > 茎秆。与不施肥处理相比, 施肥后青海 13 号蚕豆地上部不同器官中的 P 素累积量均有增加, 其中 NPKBMo 处理增加为最高, P 素累积量比对照高出 92.89% (表 3)。

氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用显著促进了青海 13 号蚕豆收获期不同部位的 K 素累积量。与不施肥处理相比, 施肥后青海 13 号蚕豆地上部不同器官

中的 K 素累积量均有增加, 其中 NPKBMo 处理增加为最高, K 素累积量比对照高出 82.55% (表 4)。

2.3 氮、磷、钾、硼、钼肥配施对蚕豆肥料利用效率的影响

通过计算 (表 5), 本试验蚕豆氮、磷、钾肥的农学利用率分别为 11.19、15.70 kg·kg⁻¹ 和 7.5 kg·kg⁻¹。由此可知, 蚕豆施用每千克磷肥具有较高的增产产量, 氮肥次之, 钾肥相对较低。肥料偏生产力反映的是蚕豆吸收肥料养分和土壤养分后所产生的边

表 3 施肥对青海 13 号蚕豆 P 素累积量和分配比例的影响

Table 3 Effect of fertilizer application on P accumulation and its distribution in Qinghai 13

处理 Treatment	P/(kg·hm ⁻²)					分配比例 Distribution percentage/%			
	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf	合计 Total	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf
NPKBMo	37.61	2.39	1.52	0.54	42.07	88.89	5.97	3.78	1.36
PKBMo	28.10	1.30	0.82	0.58	30.80	91.25	4.22	2.66	1.87
NKBMo	18.69	0.50	1.38	0.36	20.93	89.30	2.41	6.58	1.71
NPBMo	32.24	2.94	2.67	0.38	38.23	84.35	7.69	6.98	0.98
NPKM ₀	31.90	2.99	2.92	0.29	38.10	83.72	7.85	7.67	0.76
NPKB	35.61	2.98	2.80	0.53	41.92	84.94	7.11	6.68	1.27
CK	18.65	2.02	0.79	0.35	21.81	85.54	9.24	3.63	1.59

际效应^[15]。从总体来看,氮肥偏生产力随氮肥用量水平的提高明显降低,随磷肥用量水平的提高明显提高,受钾肥用量水平的影响作用相对较小,其变化趋势与氮肥农学利用率基本一致。磷肥偏生产力随磷肥用量水平的提高而明显降低,随氮、钾肥用量水平的提高有一定程度的提高^[16-17]。钾肥偏生产力

同样随钾肥用量水平的提高而降低,随氮、磷肥用量水平的提高相应提高。在考虑土壤基础地力和施肥效应的前提下,每千克氮、磷、钾肥可生产的蚕豆产量都较高,其中钾肥的偏生产力为 76.39 kg·kg⁻¹,氮肥次之,磷肥较低。

表4 施肥对青海13号蚕豆K素累积量和分配比例的影响

Table 4 Effect of fertilizer application on K accumulation and its distribution in Qinghai 13

处理 Treatment	K/(kg·hm ⁻²)					分配比例 Distribution percentage/%			
	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf	合计 Total	子粒 Grain	茎秆 Straw	角壳 Pod shell	叶片 Leaf
NPKBMo	78.38	59.24	64.80	3.92	206.34	37.99	28.71	31.41	1.90
PKBMo	60.71	61.84	59.78	4.08	186.41	32.57	33.17	32.07	2.19
NKBMo	60.17	49.13	49.50	3.19	161.99	37.14	30.32	30.56	1.97
NPBMo	70.69	56.18	57.03	4.22	188.11	37.58	29.86	30.32	2.24
NPKM ₀	68.65	49.81	54.26	3.44	176.16	38.97	28.27	30.80	1.95
NPKB	78.50	61.92	59.19	5.12	204.73	38.34	30.25	28.91	2.50
CK	41.65	33.03	36.26	2.08	113.03	36.85	29.22	32.08	1.84

表5 氮、磷、钾、硼、钼配肥对青海13号蚕豆氮、磷、钾肥料利用效率的影响

Table 5 Effect of fertilizer application on the use efficiency of N, P and K in Qinghai 13

养分 Nutrient	农学利用率 Agronomic use efficiency /(kg·kg ⁻¹)	偏生产力 Partial factor productivity /(kg·kg ⁻¹)	肥料表观利用率 Fertilizer use rate /%	生理利用率 Physiological use efficiency /(kg·kg ⁻¹)
N	11.19	65.48	19.35	57.82
P	15.70	66.43	18.49	84.91
K	7.50	76.39	20.25	14.63

肥料表观利用率是用来描述蚕豆对养分吸收利用特性的主要指标^[18-19]。氮、磷、钾肥表观利用率在很大程度上受肥料用量水平的影响。比较氮、磷、钾肥的肥料表观利用率,钾肥表观利用率最高,达20.25%,氮肥表观利用率19.35%,磷肥表观利用率最低,仅为18.49%。

从试验整体结果来看,氮肥表观利用率随氮肥用量水平的提高明显降低,随磷、钾肥用量水平的提高逐步提高。磷肥表观利用率受磷肥用量的影响作用相对较小,反而随氮、钾肥用量水平的提高有先增加后下降趋势出现。钾肥表观利用率同样随钾肥用量水平的提高而降低,随氮、磷肥用量的提高有先增加后降趋势出现^[20-21]。

2.4 氮、磷、钾、硼、钼肥施用对蚕豆氮、磷、钾肥料收获指数的影响

由表6可得出,氮和磷的收获指数均明显高于钾收获指数,说明蚕豆地上部吸收的氮素和磷素绝大部分转移到了子粒中,而转运到子粒中的钾素相

对较少,其量只占氮素和磷素的1/3左右。即子粒中累积量的氮素和磷素分别占地上部总累积量的81.69%、88.89%,而钾素累积量仅为37.99%,说明收获期蚕豆体内大部分钾素储存在茎秆、角壳和叶片中。

表6 施肥对青海13号蚕豆氮、磷、钾肥料收获指数的影响

Table 6 Effect of fertilizer application on the fertilizer harvest index of N, P and K in Qinghai 13

处理 Treatment	氮收获指数 N harvest index	磷收获指数 P harvest index	钾收获指数 K harvest index
NPKBMo	0.82	0.89	0.38
PKBMo	0.72	0.91	0.33
NKBMo	0.82	0.89	0.40
NPBMo	0.81	0.84	0.38
NPKM ₀	0.77	0.84	0.39
NPKB	0.79	0.85	0.38
CK	0.82	0.86	0.37

2.5 氮、磷、钾、硼、钼肥施用对蚕豆 100 kg 子粒吸肥量的影响

对于生产 100 kg 蚕豆子粒所需养分的数量,因受土壤条件、品种因素及栽培措施等多方面因素的

影响,所需养分结果有所差异。通过表 7 可看出,生产 100 kg 蚕豆所需氮素为 3.0 ~ 4.9 kg, P_2O_5 为 0.8 ~ 1.1 kg, K_2O 为 3.0 ~ 4.9 kg; 氮磷钾比例约为 1:(0.22 ~ 0.27):(0.89 ~ 1.00)。

表 7 施肥对青海 13 号蚕豆 100 kg 子粒吸肥量的影响

Table 7 Effect of fertilizer application on the nutrient uptake amount in Qinghai 13 grain of one hundred kilogram

处理 Treatment	100 kg 子粒吸 N 量 /kg	100 kg 子粒吸 P_2O_5 量 /kg	100 kg 子粒吸 K_2O 量 /kg	N: P_2O_5 : K_2O
NPKBMo	4.9	1.1	4.9	1:0.22:1.00
PKBMo	4.8	1.1	4.3	1:0.23:0.90
NKBMo	4.3	1.0	4.2	1:0.23:0.98
NPBMo	4.7	1.1	4.3	1:0.23:0.92
NPKMo	4.6	1.0	4.3	1:0.22:0.93
NPKB	4.7	1.1	4.2	1:0.23:0.89
CK	3.0	0.8	3.0	1:0.27:1.00

3 结 论

1) 氮、磷、钾、硼、钼肥配合施用对子粒产量、地上生物量均有明显影响。氮、磷、钾、硼、钼肥配合施肥对蚕豆产量提高有不同的效应,按肥料增产率由高到低的次序依次是 $N > P > K > Mo > B$ 。

2) 氮、磷、钾、硼、钼肥合理配施,能够促进蚕豆地上部养分的累积,增加 N、P、K 养分的含量。蚕豆不同部位的 N、P、K 素累积量不同,N、P 在子粒中分配比例高,K 素在茎秆和角壳中分配比例高。N、P、K 三因子的生理利用率是: $P > N > K$,原因可能与养分因子在蚕豆生物体构成上存在的生理差异有关,如氮、磷素主要参与蛋白质核酸、核蛋白等的形成,较多累积于子实,钾素主要参与植物机械组织的形成,需较多累积于茎秆等部位^[22-24]。

3) 氮、磷、钾、硼、钼肥合理配施下,肥料农学利用率分别为 11.19、15.70 $kg \cdot kg^{-1}$ 和 7.5 $kg \cdot kg^{-1}$;肥料表观利用率分别为 19.35%、18.49% 和 20.25%;肥料生理利用率分别为 57.82、84.91 $kg \cdot kg^{-1}$ 和 14.63 $kg \cdot kg^{-1}$ 。氮、磷、钾、硼、钼配肥后偏生产力较高,农学利用率反而降低。以钾素为例,其偏生产力高达 76.39 $kg \cdot kg^{-1}$,农学利用率为 7.5 $kg \cdot kg^{-1}$ 。说明地力状况对蚕豆产量影响较大。肥料生理利用率反映的是蚕豆对所吸收的肥料养分在体内的利用效率,在磷钾肥基础上增施氮肥,氮肥生理利用率呈下降趋势,在氮、磷肥基础上增施钾肥,蚕豆氮肥生理利用率出现先增后降趋势,而磷肥用量水平对氮肥生理利用率的影响作用相对较小。磷肥生理利用率则随磷肥用量的增加而下降,随氮、钾肥用量水平的

提高有先增加后降低趋势出现。钾肥生理利用率的变化趋势则表现为随氮、磷、钾肥用量的增加先增加后降低。说明适量施用氮、磷、钾肥能促进蚕豆对肥料的生理利用效率,过量施用反而会起负作用。试验中磷肥生理利用率高达 84.91 $kg \cdot kg^{-1}$,而磷肥表观利用率仅为 18.49%,说明在青海省蚕豆生产中磷肥利用率偏低,但吸收每千克磷转化为蚕豆子粒产量的能力却是最强的。因此蚕豆生产中既要重视地力培肥,又要重视平衡施肥,才能达到高产。

参 考 文 献:

- [1] 青海省统计局. 2009 青海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [2] 刘玉皎. 青海蚕豆生产育种现状及综合潜势分析与预测[J]. 青海农林科技, 2008, (2): 37-40.
- [3] 韩 梅. 氮磷钾、密度最优组合对蚕豆蛋白质和总黄酮及产量的影响[J]. 作物杂志, 2010, (5): 74-75.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [5] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3997-4007.
- [6] 鲁明星, 贺立源, 吴礼树. 我国耕地地力评价研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 866-871.
- [7] 强中发, 陈占全. 农业现代试验设计[J]. 青海农林科技, 1989, (1): 53-59.
- [8] 朱效达. 田间试验与统计方法[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2000.
- [9] 赵仁镛, 翟婉莹, 徐 锦. 田间试验与统计方法[J]. 山西农业科学, 1981, (9): 26-28.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-110.
- [11] 李月梅. 氮磷钾肥施用对甘蓝型春油菜产量及肥料利用效率

- 的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(2):174-280.
- [12] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J].中国油料作物学报,2011,33(1):52-56.
- [13] 李银水,鲁剑巍,邹娟,等.湖北省油菜氮肥效应及推荐用量研究[J].中国油料作物学报,2008,30(2):218-223.
- [14] 韩梅.氮、磷、钾及微量元素肥料配施对蚕豆养分吸收利用的影响[J].湖北农业科学,2015,54(4):814-817.
- [15] 党红凯,李瑞奇,李雁鸣,等.超高产栽培条件下冬小麦对磷的吸收、积累和分配[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):531-541.
- [16] 谢亚萍,李爱荣,闫志利,等.不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响[J].草业学报,2014,23(1):158-166.
- [17] 王荣辉,王朝辉,李生秀,等.施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):115-121.
- [18] 徐国伟,李帅,赵永芳,等.秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J].草业学报,2014,(2):140-146.
- [19] 薛泽民,要娟娟,赵萍萍,等.氮肥分配对冬小麦/夏玉米轮作产量和氮肥效率的影响[J].中国土壤与肥料,2012,(1):36-40.
- [20] 张荣,孙小凤,等.青海东部地区春油菜需肥规律的研究[J].安徽农业科学,2010,38(27):14980-14982.
- [21] 张满堂,古汉虎.湘北红壤性旱瘠田有机、无机肥配合施用效果研究[J].农业现代化研究,1996,17(1):41-44.
- [22] 刘恩才,陈永祥,肖祖荫.玉米根茬、秸秆还田的增产效应研究[J].土壤通报,1998,29(1):11-13.
- [23] 汪惠芳,朱丹华,郑连光.有机肥与无机肥配施对新垦红壤春大豆生长及产量的影响[J].土壤肥料,1997,(6):35-36.
- [24] 李春明,熊淑萍,赵巧梅,等.有机无机肥配施对小麦冠层结构、产量和蛋白质含量的影响[J].中国农业科学,2008,41(12):4287-4293.

(上接第93页)

渠系优化配水是水资源优化配置领域一个重要的研究方向,本文构建了下级渠道流量不等时的优化配水模型,采用双层粒子群算法,将渠系层和流量层分开,降低了下级渠系流量不等时建立模型的复杂性,采用向量的方式对粒子进行编码,符合人们的思维习惯,从而使算法设计变得方便。实例结果表明将盈四支一分支渠下属斗渠分成3个轮灌组,与实地调研盈科灌区灌溉配水时轮灌组划分情况相吻合,轮灌组划分的数目较少,减少了上级渠系流量突然变化与减少对下级渠系配水情况的影响,配水质量得到提高,以期灌区水管所水管站等管理部门制定配水计划提供决策。

参考文献:

- [1] Reddy J M, Wilamowski B, Cassel - Sharmasarkar F C. Optimal scheduling of irrigation for lateral canal [J]. ICID (S1531 - 0353), 1999,48(3):1-12.
- [2] 吕宏兴,熊运章,汪志农.灌溉渠道支、斗渠轮灌配水与引水时间优化模型[J].农业工程学报,2000,16(6):43-46.
- [3] Wardlaw R, Bhaktikulk. Comparison of genetic algorithm and linear programming approaches for lateral canal scheduling[J]. J Irrig and Drain Engng, 2004,130(4):311-317.
- [4] 宋松柏,吕宏兴.灌溉渠道轮灌配水优化模型与遗传算法求解[J].农业工程学报,2004,20(2):40-44.
- [5] Peng S Z, Wang Y, Khan S, et al. A simplified multi - objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling [J]. Irrig Drain, 2012,61(3):294-305.
- [6] 张智韬,李援农,陈俊英,等.基于3S技术和蚁群算法的灌区渠系优化配水[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):221-226.
- [7] 张国华,张展羽,邵光成,等.基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J].水利学报,2006,37(8):1004-1008,1014.
- [8] 高伟增,赵明富,汪志农,等.渠道轮灌配水优化模型与复合智能算法求解[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):38-42.
- [9] 马孝义,刘哲,甘学涛.下级渠道流量不等时渠系优化配水模型与算法研究[J].灌溉排水学报,2006,25(5):17-20.
- [10] 赵文举,马孝义,刘哲,等.基于自适应遗传算法的渠系优化配水模型研究[J].系统仿真实报,2007,19(22):5137-5140.
- [11] 赵文举,马孝义,张建兴,等.基于模拟退火遗传算法的渠系配水优化编程模型研究[J].水力发电学报,2009,28(5):210-214,113.
- [12] Pawde A W, Mathur Y P, Kumar R. Optimal water scheduling in irrigation canal network using particle swarm optimization [J]. Irrigation and Drainage, 2013,62:135-142.
- [13] 张国华,谢崇宝,皮晓宇,等.基于自由搜索算法的灌溉配水优化模型[J].农业工程学报,2012,28(10):86-90.
- [14] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Perth Australia, 1995:1942-1948.
- [15] Chen Chiachong. Two - layer particle swarm optimization for unconstrained optimization problems [J]. Applied Soft Computing, 2011,11(1):295-304.
- [16] 李昌兵,张斐敏.基于层次粒子群算法的配送中心双层规划选址策略[J].兰州理工大学学报,2013,39(4):105-109.
- [17] 赵志刚,王伟倩,黄树运.基于改进粒子群的双层规划求解算法[J].计算机科学,2013,40(11):115-119.
- [18] 盖迎春,庄金鑫,徐凤英,等.黑河生态水文遥感试验:黑河流域中游渠道流量测量数据集[G].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2012.