

大白菜- 辣椒轮作中土壤养分限制因子 及平衡状况研究

廖文华, 刘建玲, 贾 可, 孟 娜

(河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘要: 采用肥料定位试验与土壤养分系统研究法相结合的方法, 探讨北方裸菜地主要种植方式大白菜- 辣椒轮作中土壤自然供氮、磷、钾、锌、硼能力, 土壤氮、磷、钾的收支平衡及相应土壤养分的消长状况。主要结果: 大白菜- 辣椒轮作中: 全肥处理(NPKZnB)大白菜和辣椒的年均产量分别为 111. 6, 23. 7 t/hm², - N、- P、- K 的相对产量分别为全肥的 56. 7%, 63. 6%, 84. 7%; 辣椒上 - N、- P、- K、- Zn、- B 的相对产量分别为全肥的 45. 8%, 45. 9%, 67. 7%, 88. 0%, 84. 9%, 差异均达到显著水平。大白菜限制产量的因子为: N > P > K, 辣椒为: N, P > K > Zn, B。P₂O₅ 用量 180 kg/hm², K₂O 用量 300 kg/hm² 的处理, 土壤磷和钾养分分别盈余 70. 3% 和 2. 0%, 土壤有效磷(Olsen-P)、有效钾分别年均增加 3. 3 和 37. 2 mg/kg, 积累的土壤有效磷和有效钾分别占土壤磷和钾积累量的 7. 1% 和 28. 3%。大白菜茬口 N, P₂O₅, K₂O 推荐用量为 225, 90, 150 kg/hm², 辣椒茬口分别为 337. 5, 213, 337. 5 kg/hm² 并配合施用一定的锌和硼肥。

关键词: 肥料定位; 大白菜- 辣椒轮作; 产量效应; 供应能力; 养分平衡

中图分类号: S147. 2 文献标识码: A 文章编号: 1000- 7091(2008) 03- 0213- 06

Investigation of Restrict Yield Nutrient and the Balance of Input and Output N, P, K in Rotation of Chinese Cabbage and Capsicum

LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling, JIA Ke, MENG Na

(College of Resource and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: In this study on the impacts of N, P, K, Zn and B fertilization on yields of Chinese Cabbage and Capsicum rotation in Aquie-cinnamon soils was carried out from 2001 to 2004. In contrast to the control with N, P, K, B and Zn fertilizer applied, - N, - P, - K treatments significantly reduced Chinese Cabbage yield, the ratio were 56. 7%, 63. 6%, 84. 7% respectively, but the ratio in the Capsicum were 45. 8%, 45. 9% and 67. 7%, additionally, significant impacts of B and Zn fertilization on Capsicum were found. Through this study, the order of impacts of N, P and K fertilization on Chinese Cabbage were N > P > K, and N, P > K > Zn, B on Capsicum. Phosphorus and Nitrogen surplus were 70. 3% and 2. 0% in the treatment with phosphate(180 kg/ha P₂O₅) and potassium(300 kg/ha K₂O) applied, but deficit in - N, - P and - K treatments. The concenction of Olsen-P and the available-K increased 3. 3 and 37. 2 mg/kg annually. The recommending of N, P₂O₅ and K₂O application rate for Chinese Cabbage are 225, 90, 150 kg/ha respectively, and 337. 5, 135, 337. 5 kg/ha for Capsicum.

Key words: Long-term experiment; Chinese cabbage and Capsicum rotation; Yield response; Capacity of nutrient; The balance of input and output

近年来, 蔬菜种植面积和产量不断增加, 氮、磷、钾肥料用量不断增加, 限制蔬菜产量养分因子从一个因子逐渐变为多个因子或从大量元素逐渐变为中量和微量元素^[1, 2]。因此, 研究蔬菜生产中土壤养

分自然供给能力对蔬菜生产中的合理施肥具有重要意义。

肥料定位试验是研究肥料的产量效应和施肥对土壤肥力影响的首选方式, 对提高耕地的综合生产

收稿日期: 2008- 02- 18

基金项目: 河北省自然科学基金项目(300310)

作者简介: 廖文华(1974-), 女, 河北故城人, 讲师, 博士, 主要从事蔬菜合理施肥与环境保护工作。

通讯作者: 刘建玲(1962-), 女, 河北滦南人, 教授, 博士, 主要从事施肥与环境保护研究工作。

能力、提高粮食产量、保护环境均具有极大的理论指导意义^[3-5]。然而,目前已有的长期肥料定位试验多为研究氮、磷、钾及有机肥在作物上的产量效应^[6-8],一般试验设计中含 2~3 个养分因素、每个因素为 2~3 个水平,此类试验如果肥料因素过多,试验处理很多,采用田间肥料定位试验的方式难于实施^[9]。1980 年 Hunter 提出用土壤养分状况系统进行土壤养分限制因子研究以评价土壤的供肥能力,从而解决了长期肥料定位试验中一般只能研究 2~3 种养分因子产量效应的问题^[10]。金继运等^[11]对于土壤养分系统研究法在我国的应用及合理施肥量确定等方面做了许多的研究工作,也促进此方法在我国肥料试验中的推广应用^[12,13]。目前已有的长期肥料定位试验多为研究氮、磷、钾及有机肥在大田作物上的产量效应以及对土壤肥力的影响^[6,14-16]。关于蔬菜生产中的土壤养分限制因子及各养分因子对产量的限制程度等资料尚少。

本研究采用土壤养分系统研究法和肥料定位试验相结合的方法,以北方裸地蔬菜常见种植方式大白菜-辣椒轮作为供试作物,系统研究连续 4 年施用氮、磷、钾、锌、硼在叶菜类蔬菜(大白菜)和茄果类蔬菜(辣椒)上的产量效应和土壤肥力的演变,从而阐明裸菜地土壤自然供氮、磷、钾、锌、硼的能力,为蔬菜生产中合理施肥提供依据。

1 材料和方法

试验地的基本状况:试验地设在保定市河北农业大学标本园,该地属暖温带大陆性季风气候,年均温度 12℃,无霜期 165~210 d,年均降雨量 575.4 mm。

土壤为潮褐土,土壤的基本理化性质为: pH 7.8、有机质 10.40 g/kg、全氮 1.012 g/kg、全磷 4.9 g/kg、碱解氮 68.0 mg/kg、Olsen-P 13.0 mg/kg、全钾 33.6 g/kg、有效钾 106.7 mg/kg、缓效钾 655.9 mg/kg、有效锌、硼分别为 0.8、0.2 mg/kg。

试验设计:试验设置 9 个处理:全肥(NPKZnB)、-N(PKZnB,下同)、-P、-K、-Zn、-B、1/2N、1/2P、1/2K,其中 N、P、K 分别代表氮、磷、钾肥,-N 为全肥(NPKZnB)不施氮肥,-P、-K、-Zn、-B 分别为不施磷、钾、锌、硼,1/2N 为全肥中氮用量减半,1/2P、1/2K 相同。每个处理重复 3 次,随机区组排列,小区面积为 21 m²(3.5 m×6 m)。

肥料用量:2001-2003 年白菜茬口为 N 300 kg/hm², P₂O₅ 180 kg/hm², K₂O 300 kg/hm²; 2002-2004 年辣椒茬口和 2004 年白菜茬口: N 450 kg/hm², P₂O₅ 225 kg/hm², K₂O 450 kg/hm²。每年各茬口硫酸锌、硼

砂用量分别为 30、7.5 kg/hm²。磷、钾、硫酸锌、硼砂均作基肥一次施入,氮肥一半做底施,一半做追肥。氮、磷、钾肥料分别为尿素、二铵、硫酸钾。

试验植物:大白菜品种为秋绿 75。辣椒品种,2002 年为中椒 4 号,2003-2004 年为牛角王。

种植情况:2001-2004 年 8-11 月种植 4 茬大白菜,2002-2004 年 4-7 月种植 3 茬辣椒。

大白菜的管理:每年在立秋前后 3 d 播种,直播,每小区种 5 垄,定植后每垄均匀留 12 株白菜,田间管理同大白菜常规管理方式。11 月 15 日左右(小雪前 1 周)全部收获称鲜质量,每区选取 3 棵有代表性白菜收获,称鲜质量后,烘干并称干质量,粉碎后用于植物养分的测定。

辣椒的管理:4 月 10 日定植,株距×穴距为 60 cm×45 cm,每穴 2 株,定植后浇透底水,田间管理采用常规管理方式。6 月中下旬至 7 月中旬,分 3 次进行果实采收,采收时选取果长>15 cm 的果实为可采收的成熟果并进行称量。同时,取有代表性果实 20~30 个称鲜质量(每小区 3 次重复)、烘干并称干质量,粉碎后用于植物养分的测定。7 月 29 日全部收获,采收果后,收获植株,称质量,从中选取 3 株有代表性植株,每小区 3 次重复,称鲜质量后,烘干并称干质量,粉碎后用于植物养分的测定。

土壤取样:收获白菜后分别采集 0~20、20~40 cm 土壤样品,按“S”形在每小区选 6 点(垄和沟各 3 个点),6 个点组成一个混合样品,每小区重复 3 次。土壤样品风干后过筛供土壤分析用。

土壤和植物样品的测定:土壤全氮 H₂SO₄ 消煮-开氏法,碱解氮用碱解扩散法、Olsen-P 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法、速效钾用 1 mol/L NH₄AC 浸提-火焰光度法、速效锌用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法、有效硼用热水浸提-甲亚胺比色法。

植物养分的测定:植物样品经 H₂SO₄+H₂O₂ 消化,全氮用开氏定氮、全磷用钒钼黄比色法,全钾用火焰光度计测定^[17]。

数据分析:采用 DPS v3.01 统计软件。

2 结果与分析

2.1 土壤自然供氮、磷、钾的能力

土壤自然供氮、磷、钾能力如表 1 所示。大白菜的产量结果表明:与全肥处理比较,-N,-P,-K 处理的产量相当于全肥处理 48.8%~68.3%,50.3%~77.3%,80.6%~92.3%,平均为 56.7%,63.6%,84.7%,差异均达到显著、极显著水平。随

着种植年限的延长,土壤自然供氮、磷、钾能力逐渐下降。分别从开始种植时的 68.3%,77.3%,90.9% 下降到 48.8%,50.3% 和 84.9%。1/2N 处理的相对产量为 79.0%~86.4%,差异达到显著水平;1/2P,1/2K 处理的相对产量分别为 92.8%~96.9% 和 95.2%~97.8%,差异均不显著。-B,-Zn 处理,大白菜的产量无显著变化。可见,大白菜的土壤养分限制因子为: N>P>K,大白菜种植中可不施锌肥和硼肥。

各肥料养分在辣椒上的产量效应,与全肥处理

比较,-N,-P,-K 处理的产量相当于全肥处理 44.6%~47.0%,44.3%~47.6%,58.8%~82.0%,平均为 45.8%,45.9%,67.7%,差异均达到显著水平;1/2N,1/2P,1/2K 处理的相对产量为 76.5%~86.0%,74.0%~78.2%,76.7%~86.9%,平均为 79.8%,75.9%,82.8%,差异达到显著水平。-B,-Zn 处理的平均相对产量 84.9%,88.0%,差异达到显著水平。可见,对于辣椒:土壤养分限制因子为: N,P>K>Zn,B,辣椒种植中应适量施用锌和硼肥。

表 1 氮、磷、钾、锌、硼在大白菜和辣椒上的产量效应

处理 Treatments		产量/(t/ hm ²) Yield				相对产量% Relative yield			
		2001	2002	2003	2004	2001	2002	2003	2004
白菜 Chinese cabbage	全肥	130.9	114.1	89.7	120.9	100.0	100.0	100.0	100.0
	-N	89.4 [*]	68.6 [*]	44.3 [*]	59.0 [*]	68.3	60.3	49.4	48.8
	-P	101.2 [*]	78.7 [*]	51.9 [*]	60.8 [*]	77.3	69.1	57.8	50.3
	-K	119.0	105.3 [*]	72.3 [*]	102.7 [*]	90.9	92.3	80.6	84.9
	1/2N	103.4 [*]	98.5 [*]	76.1 [*]	102.3 [*]	79.0	86.4	84.8	84.6
	1/2P	123.4	110.5	79.9	112.2	94.3	96.9	92.8	92.8
	1/2K	128.0	108.6	85.4	117.6	97.8	95.2	95.2	97.2
	-Zn	127.6	109.3	89.3	115.5	97.5	95.8	99.6	95.5
	-B	125.6	112.0	88.9	118.0	95.5	98.2	99.1	97.6
辣椒 Capsicum	全肥	-	6.1	44.9	20.2	-	100.0	100.0	100.0
	-N	-	2.8 [*]	21.1 [*]	9.0 [*]	-	45.9	47.0	44.6
	-P	-	2.7 [*]	20.5 [*]	9.6 [*]	-	44.3	45.7	47.6
	-K	-	5.0	26.4 [*]	12.6 [*]	-	82.0	58.8	62.4
	1/2N	-	4.7	38.6	15.5	-	77.0	86.0	76.5
	1/2P	-	4.6 [*]	35.1 [*]	14.4 [*]	-	75.4	78.2	74.0
	1/2K	-	5.3	38.1	15.5	-	86.9	84.9	76.7
	-Zn	-	5.3 [*]	38.0 [*]	18.7	-	86.9	84.7	92.6
	-B	-	5.4	39.9	15.6 [*]	-	88.6	88.9	77.2

2.2 土壤氮、磷、钾养分收支平衡

各施肥处理土壤氮、磷、钾收支平衡状况列于表 2。结果表明:全肥(NPK)处理土壤氮、磷、钾养分均处于积累状况。土壤氮、磷、钾的表观平衡为氮匮乏,磷、钾盈余。考虑土壤氮、磷、钾的供给量后,每一茬口全肥处理土壤氮、磷、钾盈余量分别为 69.6,

59.7,168.9 kg/hm²。1/2N,1/2P,1/2K 处理的土壤 N,P,K 收支基本平衡,且略有盈余,每个茬口的盈余量分别为 29.2,26.0,70.0 kg/hm²。-N,-P,-K 处理土壤 N,P,K 的亏缺量分别为 114.7,22.6,178.2 kg/hm²。

表 2 土壤 N,P,K 收支平衡

处理 Treatments		总输入量 Input			总输出量 Output			总盈(或缺) Surplus(minus)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
NPK		1 620	628.8	2 240.7	1 936.0	369.2	2 305.6	487.1	417.6	1 182.2
-N		0	628.8	2 240.7	803.1	-	-	-803.1	-	-
-P		1 620	0	2 240.7	-	158.0	-	-	-158.0	-
-K		1 620	628.8	0	-	-	1 247.1	-	-	-1 247.4
1/2N		810	628.8	2 240.7	1 409.0	-	-	204.1	-	-
1/2P		1 620	314.4	2 240.7	-	290.2	-	-	182.2	-
1/2K		1 620	628.8	1 120.3	-	-	1 884.8	-	-	482.7

注: N 挥发损失 40% 计。总盈(或缺)(kg/hm²)= 养分输入量- 养分输出量+ 土壤供给养分。
Note: The percent of losing N was 40%. Total surplus(minus)N(P,K) (kg/ hm²) = inputting N(P, K) - outputting N(P, K) + providing N(P, K) .

2.3 土壤氮、磷、钾养分含量的变化

土壤氮素变化状况如表 3 所示。结果表明: 4 年间不施氮肥处理与未种植前的土壤比较, 土壤全氮均显著降低。施用氮肥(全肥、1/2N)处理土壤全氮含量无显著变化。

不同氮肥处理土壤碱解氮的变化为: 不施氮肥处理(−N)与未种植前的土壤比较, 土壤碱解氮均显著降低; 施用氮肥处理和 1/2N 处理土壤碱解氮各有增减, 并不规律。这是由于土壤测试氮受土壤有机质、矿物组成、土壤类型等多种因素的影响, 含量变化较大^[18, 19]。与未种植前的原始土壤比较, 施氮处理土壤碱解氮无显著增加。

表 3 土壤全氮、碱解氮的变化

Tab. 3 The change of total N and NaOH-hydrolyzable N in difference treatments					
处理 Treatments	碱解氮/(mg/kg) NaOH-hydrolyzable N				全氮/(g/kg) Total N 2004
	2001	2002	2003	2004	
全肥	68.4a	66.6a	66.3a	66.4a	1.020a
−N	60.3b	53.7b	55.7c	55.6b	0.932b
1/2N	63.6ab	62.3a	61.6b	61.2a	1.013a

不同施肥处理土壤 Olsen-P 变化如表 4 所示。结果表明: 全肥、1/2P 处理土壤磷素均处于积累状态, 随着种植时间的延长, 全肥、1/2P 处理 0~20 cm 土层土壤 Olsen-P 含量逐渐增加, Olsen-P 年均增加量分别为 3.3 和 1.0 mg/kg。−P 处理土壤 Olsen-P 含量逐年降低, 年均降低 1.7 mg/kg。全肥处理土壤 4 年磷的积累量为 417.6 kg/hm², 如果 0~20 cm 土壤质量按 2.25×10⁶ kg 计算, 0~20 cm 土壤积累的 Olsen-P 占土壤磷积累总量的 7.1%; 同样的计算, −P 处理土壤 Olsen-P 减少量占土壤磷匮乏量的 9.5%。

20~40 cm 土壤 Olsen-P 的变化: 施肥 4 年全肥处理 20~40 cm 土壤 Olsen-P 含量显著高于不施磷的处理, 说明全肥处理土壤 Olsen-P 在 0~40 cm 已明显增加。以上结论与黄绍敏等在大田作物上得到的施用磷肥使土壤磷素增加, 磷素积累主要发生在 0~40 cm, 40 cm 以下没有变化的研究结论基本一致^[20, 21]。

表 4 土壤 Olsen-P 的变化

Tab. 4 The change of Olsen-P in difference treatments					
					mg/ kg
处理 Treatments	0~ 20 cm				20~ 40 cm
	2001	2002	2003	2004	2004
全肥	16. 8 a	20. 2 a	22. 9 a	26. 1 a	6. 3 a
– P	8. 4 b	6. 6 b	6. 9 d	6. 3 c	3. 2 b
1/ 2P	14a	14. 4ab	15. 5b	16. 9b	3. 7b

不同施肥处理土壤有效钾和缓效钾的消减如表

5 所示。结果表明: 全肥处理土壤有效钾呈积累状况, 4 年土壤钾的总积累量为 1 182.2 kg/hm², 土壤有效钾显著增加, 年均增加为 37.2 mg/kg, 积累的土壤有效钾量占土壤钾积累总量 28.3%。1/2K 处理土壤有效钾显著增加。−K 处理土壤有效钾降 12.5 mg/kg, 土壤有效钾降低量占土壤钾匮乏量的 2.2%。可见, 土壤单位量积累钾所增加的土壤速效钾明显高于单位量耗竭钾所减少的土壤速效钾的量, 其原因可能由于土壤钾处于耗竭状态时, 土壤缓效钾补充土壤速效钾^[22], 使土壤速效钾降低值低于相同积累钾所增加的土壤速效钾。

表 5 土壤有效钾和缓效钾的变化

Tab. 5 The change of avail-K and slow avail-K in difference treatments

处理 Treatments	有效钾/(mg/kg) Avail-K				缓效钾 /(mg/kg) Slow Avail-K
					2004 年
	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	
+ K	120. 8a	130. 8a	210. 1a	255. 3a	848. 4a
− K	105. 2b	101. 5b	104. 0b	94. 2b	627. 7b
1/2K	120. 8a	123. 1c	154. 1c	169. 6c	670. 1b

3 结论与讨论

3.1 土壤养分因子

大白菜辣椒轮作中, 大白菜上: 与全肥处理比较, −N, −P, −K 处理的产量相当于全肥处理 48.8%~68.3%, 50.3%~77.3%, 80.6%~92.3%, 平均为 56.7%, 63.6%, 84.7%, 差异均达到显著、极显著水平。即 N, P, K 在白菜上的增产效应分别为: 43.3%, 36.4%, 15.3%。可见, 对于大白菜: 土壤养分限制因子为: N>P>K, 在大白菜上锌肥和硼肥没有显著增产效果。

在辣椒上: 与全肥处理比较, −N, −P, −K 处理的产量相当于全肥处理 44.6%~47.0%, 44.3%~47.6%, 58.8%~82.0%, 平均为 45.8%, 45.9%, 67.7%, 差异均达到显著水平。−B, −Zn 处理的平均相对产量 84.9%, 88.0%, 差异达到显著水平。即 N, P, K, B, Zn 在辣椒上的增产效应分别为 44.2%, 44.1%, 32.3%, 15.1%, 12.0%。可见, 对于辣椒: 土壤养分限制因子为: N>P>K>Zn, B, 辣椒种植中应适量施用锌和硼肥。上述结果可以看出, 由于大白菜和辣椒的营养特性不同, 叶菜类蔬菜对氮和钾需要量较大, 而茄果类蔬菜对磷和钾的需要量较大造成的。

3.2 土壤氮、磷、钾养分收支平衡和合理用量

土壤氮养分收支平衡和合理用量: 全肥处理大白菜和辣椒茬口 N 用量分别为: 300, 450 kg/hm², 考

考虑大白菜和辣椒土壤供氮 56.7%, 45.8%, 土壤氮素有盈余 69.6 kg/hm²。氮肥减少一半, 大白菜和辣椒 1/2N 处理的相对产量为 79.0%~86.4%, 76.5%~86.0%。因此, 从施肥的经济效益和环境风险等方面考虑, N 推荐用量约为 3/4N, 即大白菜和辣椒 N 用量分别为 225, 337.5 kg/hm²。

不同施肥处理土壤氮养分消长状况: 与基础土相比, 施用氮肥的处理、1/2N 处理碱解氮含量变化不规律, 这可能是由于氮肥主要损失途径是氮的挥发损失, 土壤氮素收支平衡状况略有积累, 土壤全氮和土壤碱解氮均无显著变化, 同时, 土壤氮素含量受较多因素的影响使其不能表征土壤氮素对作物的供应能力^[19, 23], 因此使用测试类方法进行氮肥适宜施用量也值得商榷^[24]。

土壤磷养分收支平衡和合理用量: 全肥处理大白菜和辣椒茬口 P₂O₅ 用量分别为: 180, 225 kg/hm², 考虑大白菜和辣椒土壤供磷 63.6%, 45.9%, 土壤磷素有盈余 59.7 kg/hm²。磷肥减少一半, 大白菜和辣椒 1/2P 处理的相对产量为 95.2%~97.8%, 74.0%~78.2%。因此, 从施肥的经济效益和环境风险等方面考虑, P₂O₅ 推荐用量: 大白菜上 1/2P 即 P₂O₅ 用量分别为 90 kg/hm², 辣椒上约为 3/4P 即 168.8 kg/hm²。

土壤磷收支平衡土壤 Olsen-P 的消长: 全肥处理土壤磷素表观平衡积累, 盈余 77.0%, 考虑土壤磷的供给量, 土壤磷素年积累量为 104.4 kg/hm², 土壤 Olsen-P 年增加量 3.3 mg/kg, 土壤 Olsen-P 年增加量占土壤磷素积累量的 7.1%。不施磷处理, 土壤磷匮乏, 土壤 Olsen-P 年降低量占土壤磷耗竭量的 9.5%。

土壤钾养分收支平衡和合理用量: 全肥处理大白菜和辣椒茬口 K₂O 用量分别为: 300, 450 kg/hm², 考虑大白菜和辣椒土壤供钾 84.7%, 67.7%, 土壤钾素盈余 168.9 kg/hm²。钾肥减少一半, 大白菜和辣椒 1/2K 处理的相对产量为 95.2%~97.8%, 76.7%~86.9%。因此, 从施肥的经济效益方面考虑, K₂O 推荐用量约大白菜为 1/2K 即 K₂O 用量为 150 kg/hm², 辣椒 3/4K 即 K₂O 用量为 337.5 kg/hm²。

土壤钾的收支平衡和土壤速效钾、缓效钾的消长: 全肥处理土壤钾素表观平衡匮乏, 匮乏 2.8%, 考虑土壤钾的供给量, 土壤钾素年积累量为 295.6 kg/hm², 土壤速效钾年增加量 37.2 mg/kg, 土壤缓效钾年积累量 48.1 mg/kg, 占土壤钾素积累量 36.6%。-K 处理土壤速效钾含量 4 年内降低幅度较小, 土壤有效钾年降低量占土壤钾耗竭量 2.2%。原因可能是由于 -K 处理中可供的速效钾被作物

吸收降到最低值以后, 其钾素的消耗主要来自于非交换性钾的释放。而施钾处理中速效钾含量明显升高, 反映了潮褐土固钾能力不强, 从而使投入土壤中的钾仍以速效钾的形态存在, 从而增加了钾素向下移动的可能而降低了钾素的利用效率^[25-27]。

参考文献:

- [1] 黄锦法, 曹志洪, 李艾芬, 等. 稻麦轮作田改为保护地菜田土壤肥力质量的演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 19-25.
- [2] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128.
- [3] Richard B F, John A N, Roger A E, *et al.* Long-term effects of sustained beef feedlot manure application on soil nutrients, corn silage yield, and nutrient uptake [J]. Environ Qual, 2005, 34: 1672-1681.
- [4] Daniel de B R J, Michael H, Callahan M A, *et al.* Long-term soil experiments: keys to managing earth's rapidly changing ecosystems [J]. Soil Sci Soc Am, 2007, 71: 266-279.
- [5] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 885-891.
- [6] Tinglu Fan, Stewart B A, William A P, *et al.* Long-term fertilizer and water availability effects on cereal yield and soil chemical properties in Northwest China [J]. Soil Sci Soc Am, 2005, 69: 842-855.
- [7] 孙克刚, 张学斌, 吴政卿, 等. 长期施肥对不同类型土壤中作物产量及土壤剖面硝态氮累积的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(3): 105-109.
- [8] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-794.
- [9] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(1): 6-18.
- [10] Hunter A H. Laboratory and greenhouse techniques for nutrient survey to determine the soil amendments required for optimum plant growth[R]. Agro service international, Florida, USA, 1984.
- [11] 金继运. 土壤养分系统研究法及其应用初报[J]. 土壤学报, 1995, 32(1): 83-90.
- [12] 王建国, 刘鸿向. 黑土农田养分供应能力和变化[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 295-301.
- [13] 詹其厚, 陈杰. 基于长期肥料定位试验的变性土壤养分持续供给能力和作物响应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 124-132.
- [14] Galantini J, Rosell R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils [J]. Soil and Tillage

- Research, 2006, 87: 72– 79.
- [15] 张璐, 沈善敏, 廉鸿志, 等. 辽西褐土施肥及养分循环再利用中长期试验 I. 作物产量[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 239– 242.
- [16] 郭汝礼, 杨林章, 沈明星, 等. 太湖地区黄泥土水稻适宜施氮量研究- 长期定位试验[J]. 土壤, 2006, 38(4): 379– 383.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 施春健, 庄秋丽, 李琪, 等. 东北地区不同纬度农田土壤碱解氮的剖面分布[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 501– 504.
- [19] Stevens W B, Hoefl R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen- 15 in a long- tem nitrogen rate study : I. interactions with soil nitrogen[J]. Agron J, 2005, 97: 1037– 1045.
- [20] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 102– 108.
- [21] 陈磊, 郝明德, 戚龙海. 长期施肥对黄土旱塬区土壤– 植物系统中氮、磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1006– 1012.
- [22] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施钾下中国 3 种典型农田土壤钾素固定及其影响因素研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 749– 756.
- [23] 金发会, 李世清, 卢红玲, 等. 石灰性土壤供氮能力几种化学测定方法的评价研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1422– 1431.
- [24] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1– 4.
- [25] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133– 139.
- [26] 范钦桢, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. 土壤学报, 2005, 42(14): 591– 599.
- [27] Shaimukhametov M SH, Mamadaliev G H. The effect of long- tem fertilization on the potassium status and mineralogy of clay particles in typical Serozem [J]. Eurasian Soil Sciences, 2003, 36: 994– 1002.