

研究报告



位于Jamia Hamdard University大学的试验设计。照片拍摄: S. Umar。

施用钾肥调节硝酸盐在饲料高粱中的累积

Khanum Al Akbari, W.M.⁽¹⁾, and S. Umar^{(1)(a)}

摘要

氮肥施用量过多或干旱、寒冷、霜冻、冰雹等恶劣环境,都会导致饲料作物中硝酸盐的积累。这对动物健康是不利的,曾经有几次大规模的牲口死亡事件就是因为饲料中超量的硝酸盐引起的,因此饲料中不断升高的硝酸盐含量应该引起关注。在温室条件下安排一个盆栽试验,检验16个高粱品种叶片中的硝酸还原酶的活性(NRA)及潜在的硝酸盐累积,发现这些高粱品种间的硝酸还原酶的活性(NRA)和硝酸盐的累积差异显著,某些高粱品种叶片中硝酸盐的累积量已达到了较高的水平。从16个品种中筛选

出高硝酸还原酶(HNR)品种POP-52(V9)和低硝酸还原酶(LNR)品种EB-15(V7)来研究施用钾肥对硝酸还原酶的活性(NRA)和硝酸盐累积的影响。把这两个高粱品种分别种植在专门设计的PVC桶中,桶中土壤施氯化钾,不断增加施钾量,即每千克土施加0、30、60、120 mg K_2O 。于高粱播种30天和60天后分别测量叶片中硝酸还原酶的活性(NRA)及硝酸盐累积量。不考虑施用钾肥的因素,播

⁽¹⁾Jamia Hamdard University, Hamdard Nagar, 新德里, 印度

^(a)通讯作者: s_umar9@hotmail.com

种60天后叶片中硝酸还原酶的活性 (NRA) 高于播种30天的, 相应的硝酸盐的累积量却是播种后30天的高于播种后60天的。对于这两个高粱品种, 当土壤中的钾肥施用量逐渐增加到60 mg kg⁻¹, 叶片的硝酸还原酶的活性 (NRA) 随施钾量的增加而增加, 硝酸盐的累积量反而是随之减少。在施钾量为60 mg kg⁻¹, 即K₆₀处理, 发现两个品种的高粱叶片硝酸盐的累积量中均是播种60天后的比30天的下降了3倍。K₆₀处理中, 播种60天后POP-52(V9)高粱品种硝酸还原酶活性 (NRA) 较高, 为9.916 μmol NO₂⁻¹ h⁻¹ g⁻¹, 硝酸盐的累积量较低, 为816.6 mg kg⁻¹, 相反EB-15(V7)的硝酸还原酶活性 (NRA) 较低, 为5.018 μmol NO₂⁻¹ h⁻¹ g⁻¹, 而硝酸盐的累积量较高, 为2691.8 mg kg⁻¹。钾的施用实质上减少了渗滤液中的硝酸盐的含量, 这表明施用钾肥能有效的缓解植株及土壤中硝酸盐的污染。试验结果也强调了钾肥在增加氮肥利用率上的重要性, 平衡施肥能有效缓解硝酸盐对人类、动物及环境带来的危害。

引言

肥料生产和消费是农业生产发展的必需之路, 但是一味提高肥料的施用量并不能保证粮食产量也随之上升。矿质营养肥料的成分, 特别是氮和磷在土壤中易于淋失, 过多的肥料进入地表水以及错误的施肥方式(EPA, 2010)都会破坏环境, 引起富营养化。为了满足日益增长人口的食物需求, 保持可持续发展, 如果作物氮的利用率不提高, 那么氮的需求量要比当前的翻两番(Anjana *et al.*, 2011)。考虑到植株在吸收氮素、钾素时两者之间存在的密切关系, 施用氮肥时要配施充足的钾肥, 进行平衡施肥, 以提高作物的产量。

一年生作物从透气性相对较好的土壤中摄取和吸收氮主要以硝酸盐(NO₃⁻)的形式。世界上许多地区, 地下水中硝酸盐的浓度已经超过了50 mg L⁻¹的最大限度, 相当于2011年世界卫生组织推荐的11.3 mg L⁻¹的硝态氮限度。水中硝酸盐污染物主要来源于集约农业生产、家庭及工业废弃物、污水和大气氮污染。当氮素的供应超过了植株生长的需求, 就容易在土壤中累积, 主要以硝酸盐的形式, 再淋失到地下水中(Gairola *et al.*, 2009)。施用超量氮肥就会引起硝酸盐淋失, 易于造成淡水及海洋生态系统的富营养化。任何使植株生长速度减缓的因素都可能导致喜肥植株体内硝酸盐的累积, 这就是为什么一般在干旱、寡照或阴冷天气、施用大量的氮肥及除草剂的情况下, 发现植株体内有大量硝酸盐累积的原因(Tuncay *et al.*, 2011)。现在已经得知, 如果植株体内含有累积的硝酸盐, 那么牲口食用该植物后会出现中毒现象。本质上硝酸盐对动物无毒, 但是一旦进入动物体内, 硝酸盐转化成亚硝酸盐, 进而转化成

亚硝胺, 亚硝胺一般容易引起胃癌及其他并发症, 譬如高铁血红蛋白症(影响红细胞携带氧的能力)(Fahmy *et al.*, 2010)。

高粱是世界上第五大重要的粮食作物, 也用来做饲料及干草。高粱易于吸收硝酸盐, 并在植株体内累积, 即使在中等含氮量的土壤上也能达到毒性级别。印度种植的高粱大约有260万ha, 主要分布在西部的北方邦、哈里亚那邦、旁遮普、拉贾斯坦邦、德里等, 这些地区在雨季收获的高粱饲料占全国产量的2/3。

钾素是植物生长发育最基本的必需矿质元素之一, 钾素不仅在硝酸盐的摄取方面, 而且在氮的吸收和新陈代谢各过程中都扮演重要角色, 同样钾素也参与影响了许多其他的生理生化过程(Marschner, 2012), 因此钾素对农业生



种植在试验桶中的高粱作物。照片拍摄: S. Umar.

态系统产生了重要影响。根据Shrotriya (1998)研究发现,在印度氮、磷、钾肥的平衡施用能增加高粱产量,最高可增产122%。因此“增氮减钾”的非平衡施肥最终会对氮肥施用带来不利影响。

通过平衡施肥的方式来提高作物品质,前提条件是施用钾肥,因为氮损失减少,不仅能降低环境污染的风险,而且还会减少反刍动物中毒的几率。该论文研究了温室里增施钾肥对两个品种的高粱叶片中硝酸还原酶活性及硝酸盐累积量的影响,同时也研究了增施钾肥对硝酸盐淋失的影响。

材料与方法

试验安排

于2010~2011年雨季在新德里佳米雅的草药园安排了温室盆栽试验,目的是检验16个品种的高粱叶片中硝酸还原酶活性及硝酸盐浓度,这16个品种分别为: CSV 15、CSV 21F、CSV 23、E-68-1、E73、E77、EB-15 (V7)、HC-308、POP-52 (V9)、SPSSV 5、SPSSV 6、SPSSV 7、SPSSV 20、SPSS422、SPV 462、SPV 913。这16个高粱品种由印度海德拉巴的高粱研究所提供。高粱全部种植在直径大约25cm的陶盆中,每盆种4株,各品种重复3次,共48盆。播种前盆上套好聚乙烯袋,每盆装8kg土,试验土壤取自草药园,每盆土壤中施入底肥,各盆所施肥料及数量一致,土肥混合均匀。具体所施肥料及数量如下:氮120 mg kg⁻¹,肥料为尿素;磷30 mg kg⁻¹,肥料为单过磷酸钙;钾80 mg kg⁻¹,肥料为氯化钾;锌25 mg kg⁻¹,肥料为ZnSO₄·7H₂O。草药园的土壤(Lukhi soil series of Gurgaon),是砂壤土,含83.6%砂质,6.8%粉泥,9.6%粘土。pH为7.1,中性,速效氮、有效磷、速效钾含量较低,分别为30 mg kg⁻¹,4 mg kg⁻¹,40 mg kg⁻¹。播种30天后,在完全伸展的叶片同一位置上同时分析硝酸还原酶的活性及硝酸盐的浓度。筛选出硝酸还原酶活性最高的POP-52品种和硝酸还原酶活性最低的EB-15品种,这两个高粱品种用作第二个试验的继续研究品种。

第二个试验的目的是验证增施钾肥对两个硝酸还原酶活性不同的高粱品种叶片中硝酸还原酶活性及硝酸盐的累积量的影响,同时也验证这两个高粱品种在增施钾肥后对硝酸盐淋失的影响。本试验高粱种植在相对较大的容器中,由直径25 cm,高120 cm的PVC管做成,该管总容量有60L,同样装入草药园的土壤,除了钾的施用量不同外,其他肥料施用与第一个试验相同。钾肥还是选择氯化钾,施用量分别为0、30、60、120 mg K₂O kg⁻¹,即K₀, K₃₀, K₆₀, K₁₂₀处理。各处理重复3次,试验总共有24个管子,每个管子中播10粒种子,高粱长出后间苗,最后保留4棵高粱苗。试验用

的PVC管子设计了3处排水系统,即分别在土柱的30、60、100 cm处。在PVC管子的开口处填充高度10 cm用玻璃棉包裹的已洗干净的细砾石,直径10 cm的塑料漏斗配有5 mm的PVC管子安装在每个排水系统处收集渗滤液。种植前,土壤灌足水分促使种子发芽,每周进行一次除草,松土。播种30天和60天后在完全舒展叶片的同一位置上测试硝酸盐含量,重复3次。试验示意图如下。

化学分析

从磨碎的干叶中提取硝酸盐用Grover *et al.* (1978)的方法,随后按照Downes (1978)的方法测定生成的酰胍量。依据是硝态氮通过重氮化作用转化成亚硝态氮,亚硝态氮在对甲苯磺酰胺和萘乙二胺盐酸盐的作用下生成粉红色的偶氮化合物,用分光光度计在波长540nm处比色,颜色的深浅反映了亚硝态氮的含量。硝酸盐的浓度用每克叶片鲜重含的毫克表示(mg kg⁻¹)。叶片中硝酸还原酶的活性选用离体法测定,根据Jaworski(1971)的方法进行完整组织分析,确定亚硝酸盐含量与上面测定方法一致,通过亚硝酸含量计算出硝酸还原酶的活性,表示单位为每克鲜叶每小时生产亚硝态氮的微摩尔数($\mu\text{molNO}_2^- \text{h}^{-1}\text{g}^{-1}$)。单位氮的利用率用以下公式计算: $\text{NutE} = \text{生物量(干物重)} (\text{g 株}^{-1}) / \text{总氮含量} (\text{g 株}^{-1})$ 。收集每次灌溉后的渗滤液进行硝酸盐的分析,测定原理方法与测定植物叶片中硝酸盐的一致。草药园土壤中速效氮、有效磷、速效钾的测定分别用Kalra and Maynard (1994), Oslen *et al.* (1954) and Hanway & Heidal (1952)的方法。

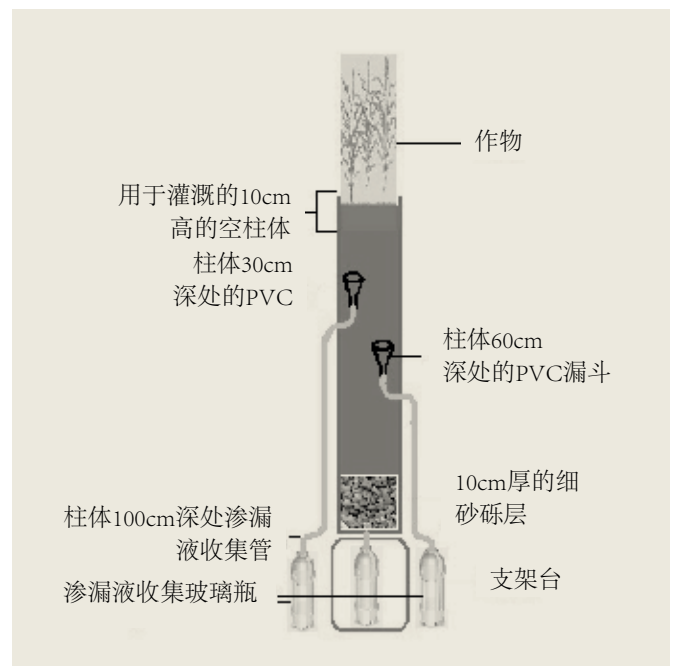


图1.显示土壤不同深度的渗滤液收集情况的试验柱体示意图。

结果与讨论

表1可见,16个高粱品种播种30天后叶片中硝酸还原酶的活性显著不同,POP-52(V9)品种的硝酸还原酶的活性最高,测定数值中最高可达 $7.024 \mu\text{mol NO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$,同时测定的硝酸盐浓度最低,硝酸还原酶的活性最低的品种为EB-12(V7),测定的最低数值为 $1.813 \mu\text{mol NO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$,同时硝酸盐浓度最高。16个高粱品种播种30天后叶片硝酸盐的浓度也存在显著不同。试验得出的结果与以前报道的很多品种间和品种内的粮食作物叶片中硝态氮的含量一致(Anjana *et al.*, 2007)。由图2可见这16个高粱品种叶片中硝酸还原酶的活性与硝酸盐的浓度呈负相关, $r = -0.913$ 。

施用钾肥对叶片中硝酸盐浓度的影响

相关的研究表明,钾素能促进氮素的吸收,因此可推断出增施钾肥能减少硝酸盐的累积,如Nurzynska-Wierdak *et al.*, (2012)进行了相关剑叶研究和验证。我们的研究结果也证明了施用钾肥能显著降低硝酸盐的浓度, ($p < 0.05$)水平下差异显著,并且2个品种的下降低比明显。在钾肥处理为 K_{60} 时,对比不施钾肥处理 K_0 ,V9和V7两个高粱品种播种30天后叶片中硝态氮的浓度分别下降35.24%和26.0%。播种30天和60天后叶片中硝酸盐的浓度相差大约3倍,在钾肥处理为 K_{60} 时V9品种的硝酸盐浓度最低,为 816.6 mg kg^{-1} (表2)。

施用钾肥对叶片中硝酸还原酶活性(NRA)的影响

要想找到促进氮吸收的方法必须先理解氮吸收的途径。NRA,能使硝酸盐转化成亚硝酸盐,被认为是植物体内硝酸盐吸收速度的限制因素。当钾肥施用量由 K_0 增加到 K_{60} 时,两个高粱品种播种30天和60天后的叶片中NRA与钾肥施用量之间呈线性正相关,但当钾肥施用量继续增加到 K_{120} 时,两个高粱品种的叶片中的NRA反而下降。随钾肥施用量的增加,叶片中NRA在($p < 0.05$)水平下差异显著。由表2可见播种后30天和60天的叶片中NRA最高出现在钾肥处理为 K_0 的V9品种,钾肥的施用量为0时,NRA最低。

播种60天后叶片中的单位氮的利用率(NUE)

提高氮肥的效率最有效的方法就是充分且平衡的利用肥料养分。两个高粱品种叶片中单位生物量的氮肥利用率随施钾量从 K_0 到 K_{60} 的增加在

($p < 0.05$)水平下差异显著,由表2可见,在钾肥施用量为 K_{60} 时,V9高粱品种的单位生物量氮肥利用率高于V7品种的,分别为45.93, 39.09。两个品种的单位生物量氮肥利用率最小的均出现在钾肥施用量为0时,V9高粱品种的为37.1,V7品种的为31.05。Brar *et al.* (2012)也报道过在玉米上施用钾肥能有效增加氮肥利用率。相对较高的氮肥利用率意味着氮素的更有效利用,通过钾素来提高氮肥利用率意味着氮肥的施用量可降低,但是不会影响到产量,同时可以预防土地和水的污染。

表1. 表1.16个高粱品种播种30天后叶片中硝酸还原酶的活性(NRA) ($\mu\text{mol NO}_2^{-1} \text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$)和硝酸盐含量(mg kg^{-1} 叶片鲜重)

高粱品种	编号	NRA	Nitrate
1	V1	3.536±0.097	3726.67±29.72
2	V2	5.063±0.079	2406±27.18
3	V3	4.448±0.096	2870.33±36.11
4	V4	2.905±0.092	4508.67±36.42
5	V5	2.582±0.12	5397±46.01
6	V6	2.152±0.095	6492±40.19
7	V7	1.813±0.031	7121.33±22.63
8	V8	3.573±0.049	3466.67±32.8
9	V9	5.989±0.096	2308.67±24.25
10	V10	2.380±0.067	6107.67±44.4
11	V11	4.360±0.039	2643.33±25.3
12	V12	2.449±0.046	5731.67±36.4
13	V13	4.288±0.087	2476±12.5
14	V14	4.039±0.046	3218.67±33
15	V15	2.635±0.05	5147.67±26.74
16	V16	2.778±0.057	4880±27.60

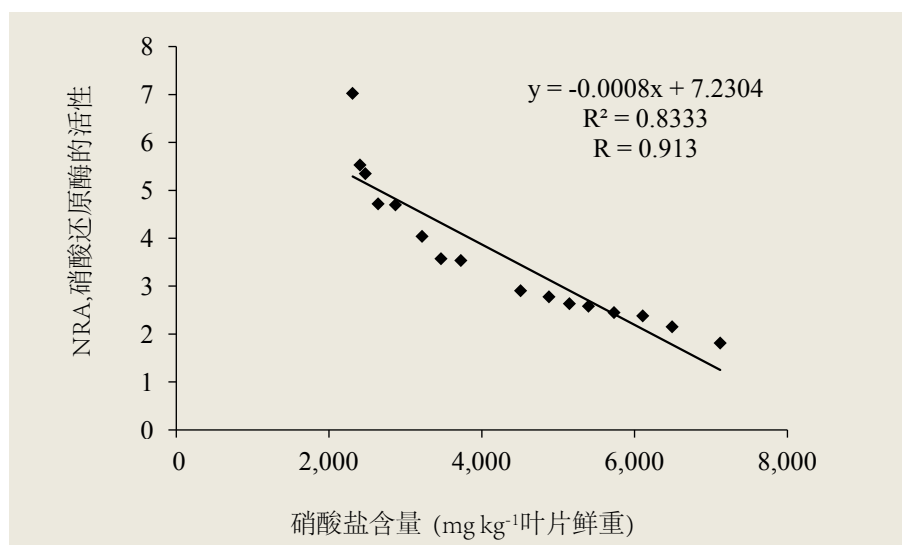


图2. 16个高粱品种播种30天后叶片中硝酸还原酶的活性和硝酸盐浓度的关系。

表2 施钾对高粱播种30天和60天后叶片中硝酸还原酶活性 (NRA) (在完整活体内) ($\mu\text{mol NO}_2^- \text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$ 鲜叶重) 和硝酸盐含量 (mg kg^{-1} 鲜叶重), 以及对30cm、60cm和100cm处渗滤液的硝酸盐含量 (mg L^{-1}) 和氮素利用率 (g 株^{-1}) 的影响。

处理	播种30天后NRA		播种60天后NRA			
	HNR	LNR	HNR	LNR		
K ₀	3.21±0.035d	1.646±0.022d	7.203±0.203c	3.154±0.065d		
K ₃₀	3.416±0.032c	1.814±0.028c	7.462±0.104c	3.738±0.059c		
K ₆₀	5.978±0.042a	2.174±0.039a	9.916±0.212a	5.018±0.053a		
K ₁₂₀	4.918±0.026b	1.984±0.037b	8.142±0.078b	4.178±0.059b		
处理	播种30天后NRA		播种60天后NRA			
	HNR	LNR	HNR	LNR		
K ₀	3,272.04±215.169a	9,600.97±313.494a	1,726.8±46.067a	5,179±49.79a		
K ₃₀	2,533.96±116.899b	8,073.31±405.298b	1,507.4±41.966b	3,627.8±43.22b		
K ₆₀	2,118.89±114.216c	7,104.06±235.615c	816.6±45.181d	1,969.4±38.47d		
K ₁₂₀	2,112.80±147.157c	7,096.18±346.563c	1,050.8±40.59c	2,199.4±39.20		
处理	30cm深处土壤渗滤液硝酸盐含量		60cm深处土壤渗滤液硝酸盐含量		100cm深处土壤渗滤液硝酸盐含量	
	HNR	LNR	HNR	LNR	HNR	LNR
K ₀	20.49±0.38a	23.11±0.19a	26.65±0.23a	28.75±0.25a	20.45±0.31a	21.67±0.15a
K ₃₀	18.11±0.22b	21.56±0.16b	23.38±0.27b	25.36±0.39b	16.54±0.33b	20.04±0.34b
K ₆₀	14.17±0.18c	17.69±0.23c	20.46±0.26c	23.12±0.46c	14.1±0.25c	17.80±0.20c
K ₁₂₀	13.90±0.25d	14.76±0.14d	20.12±0.22d	22.00±0.27d	12.52±0.21d	14.86±0.15d
处理	氮素利用率					
	HNR		LNR			
K ₀	37.1±0.55d		31.05±0.24d			
K ₃₀	41.43±0.43c		33.86±0.24c			
K ₆₀	45.93±0.36a		39.09±0.37a			
K ₁₂₀	44.68±0.25b		38.18±0.28b			

注: 数值为平均数±SE。同列数字后英文字母 (a-d) 不同表示根据Duncan检验在 $p<0.05$ 水平下差异显著。

渗滤液中硝酸盐的含量

氮肥施用不平衡会导致硝酸盐的淋失, 因为不易被大多数带阴电荷基质的表土层所固定, 尤其是砂壤土固肥能力很弱。由表2可见, 随钾肥施用量的增加, 3个土柱高度 (30、60、100 cm) 下的渗滤液中硝酸盐的含量下降, 各钾肥处理在 ($p<0.05$) 水平下差异显著。两个高粱品种在3个土柱高度下渗滤液中硝酸盐浓度最低的都出现在钾肥施用量为K₆₀时, 然而对比这两个高粱品种, V9的渗滤液中硝酸盐的浓度相对低。渗滤液中硝酸盐含量的下降可归因于钾肥的施用提高了硝酸盐的利用率。

结论

叶片中最高的硝酸盐的浓度出现在播种30天后的叶片中, 然而随钾肥的施用, 尤其是在钾肥的施用量为K₆₀时, 2个高粱品种叶片中硝酸盐的含量下降明显, 同时叶片中的硝酸还原酶的活性达到最高。在播种30天和60天后两个阶段, V9品种比V7品种显示了更好的生长状态, 叶片中硝酸还原酶的活性高, 叶片和渗滤液中硝酸盐浓度低。钾

肥施用对播种60天后植株影响最大, 同时对于平衡养分管理, 当钾肥的施用量为60 $\text{mg K}_2\text{O kg}^{-1}$ 时, 硝酸盐的累积量较低, 并能维持高粱正常的生长, 产量不受影响。减少的硝酸盐不仅可使动物免受毒害, 还可降低地下水中硝酸盐含量的负荷。此外, 农民通过有效地施肥管理, 可以通过减少化肥的支出而受益。以上试验结果尚需在不同地点及气候条件下大田条件下对不同农作物做进一步验证。

感谢

非常感谢佳米娅综合大学植物学院的M. Iqbal教授, 以及Patricia Imas博士对本文的构思提出的指导, 同时要感谢海德拉巴高粱研究所慷慨提供了试验所用的所有高粱种子, 本研究得到瑞士国际钾肥研究所 (IPI) 的资金资助。

参考文献

- Anjana, S. Umar, and M. Iqbal. 2007. Nitrate Accumulation in Plants, Factors Affecting the Process, and Human Health Implications, A Review. *Agron. Sustain. Dev.* 27:45-57.
- Anjana, S. Umar, Y.P. Abrol, and M. Iqbal. 2011. Modulation of Nitrogen Utilization Efficiency in Wheat Genotypes Differing in Nitrate Reductase Activity. *J. Plant Nutr.* 34(6):920-933.
- Brar, M.S., Preeti Sharma, Amandeep Singh, and S.S. Saandhu. Nitrogen Use Efficiency (NUE), Growth, Yield Parameters and Yield of Maize (*Zea mays* L.) as affected by K Application e-*ifc* No. 30 March 2012 DOI: <http://www.ipipotash.org/eifc/2012/30/2>
- Downes, M.T. 1978. An Improved Hydrazine Reduction Method for the Automated Determination of Low Nitrate Levels in Freshwater. *Water Res.* 12:673-675.
- EPA. 2010. Managing Agricultural Fertilizer Application to Prevent Contamination of Drinking Water. *Sources Water Protection Practices Bulletin*. URL; http://www.epa.gov/safewater/sourcewater/pubs/fs_swpp_fertilizer.pdf.
- Fahmy, A.A, K.M. Youssef, and H.M. El Shaer. 2010. Intake and Nutritive Value of Some Salt-Tolerant Fodder Grasses for Sheep Under Saline Conditions of South Sinai, Egypt. *Small Rumin. Res.*, 91:110-115.

- Gairola, S., S. Umar, and S. Suryapani. 2009. Nitrate Accumulation Growth and Leaf Quality of Spinach Beet (*Beta vulgaris* Linn.) as Affected by NPK Fertilization with Special Reference to Potassium. *Indian J. of Sci. and Technol.* 2:35-40.
- Grover, H.L., T.V.R. Nair, and Y.P. Abrol. 1978. Nitrogen Metabolism of the Upper Three Leaf Blades of Wheat at Different Soil Nitrogen Levels. *Physiol. Plant* 42:287-292.
- Hanway, J.J., and H. Heidel. 1952. Soil Analysis Methods as Used in Iowa State College, Soil Testing Lab., Iowa State College Bulletin 57:1-31.
- Jaworski, E.G. 1971. Nitrate Reductase Assay in Intact Plant Tissues. *Biochem Biophys. Res. Comm.* 43:1274-1279.
- Kalra, Y.P., and D.G. Maynard. 1994. Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, Inf. Rep. NOR-X-319.
- Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third edition. Academic Press, London. 651 p.
- Nurzyńska-Wierdak, R., K. Dzida, E. Rożek, and Z. Jarosz. 2012. Effects of Nitrogen and Potassium Fertilization on Growth, Yield and Chemical Composition of Garden Rocket. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus.* 11(2):289-300.
- Olsen, R.A., M.B. Rhodes, and A.F. Dreier. 1954. Available Phosphorus Status of Nebraska Soils in Relation to Series Classification, Time of Sampling and Method of Measurement. *Agron. J.* 46:175-180.
- Shrotriya, G.C. 1998. Balanced Fertilization - Indian Experience. Proc. Symp. Plant Nutrition Management for Sustainable Agriculture Growth. NFDC, Islamabad.
- Tuncay, O., D. Esiyok, B. Yagmur, and B. Okur. 2011. Yield and Quality of Garden Cress Affected by Different Nitrogen Sources and Growing Period. *African Journal of Agricultural Research* 6:608-617.
- WHO. 2011. Nitrate and Nitrite in Drinking-Water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality.
- Zhang, F., J. Niu, W. Zhang, X. Chen, C. Li, L. Yuan, and J. Xie. 2010. Potassium Nutrition of Crops Under Varied Regimes of Nitrogen Supply. *Plant Soil.* 335:21-34.

“施用钾肥调节硝酸盐在饲料高粱中的累积”一文还可以在国际钾肥研究所官方网站浏览下载：[区域活动/印度](#)