DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04091

长期施用不同剂量氮肥对高粱产量、氮素利用特性和土壤硝态氮含量的影响

王媛^{1,2} 王劲松¹ 董二伟¹ 武爱莲¹ 焦晓燕^{1,*}

¹ 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西太原 030031; ² 高粱遗传与种质创新山西省重点实验室, 山西晋中 030600

摘要: 本研究于 2015—2019 年以晋杂 34、辽杂 27、晋饲 2 号、晋糯 3 号和汾酒梁 1 号为研究对象, 设 0 (N0)、75 (N75)、150 (N150)、225 (N225)、300 (N300)、450 kg hm⁻² (N450) 6 个氮素水平, 调查其对产量性状、淀粉含量和土壤硝态氮以及氮素利用特性指标的影响, 以探讨高粱合理的氮素施用方案。结果表明, 高粱的产量、穗粒数及植株地上部氮素累积量, 随施氮水平的增加呈先增加后趋于稳定的趋势, 其中以 N75 处理增幅最大, 较 N0 处理最大增幅分别可达 23.68%、48.05% 和 51.86%; 籽粒淀粉含量、5 年叠加氮肥利用率、5 年叠加氮肥农学效率和氮素 5 年叠加表观回收率随施氮水平的增加都存在不同程度的降低, 其中 N75 处理下 5 年叠加氮肥利用率为 63.01%, 较 N150 处理提高了 76.91%; 籽粒淀粉产量则随施氮水平的增加呈先增加后降低的趋势。连续施氮 4~5 年后, 施氮量 225 kg hm⁻², 残留的硝态氮在 60~200 cm 土层逐年累积, 且在 0~200 cm 土层存在明显的累积峰, 硝态氮淋失风险加剧。施氮量 75~150 kg hm⁻² 之间, 在满足高粱植株基本生长需求的同时, 可以弥补了土壤氮库的消耗, 有效降低了土壤硝态氮的淋失, 亦有利于高粱产量和籽粒淀粉产量的形成。

关键词: 高粱; 施氮水平; 氮素利用特性; 土壤硝态氮

Effects of long-term nitrogen fertilization with different levels on sorghum grain yield, nitrogen use characteristics and soil nitrate distribution

WANG Yuan^{1,2}, WANG Jin-Song¹, DONG Er-Wei¹, WU Ai-Lian¹, and JIAO Xiao-Yan^{1,*}

¹ Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, Shanxi, China; ² Shanxi Province Key Laboratory of Sorghum Genetics & Germplasm Innovation, Jinzhong 030600, Shanxi, China

Abstract: To determine a suitable nitrogen fertilizer application rate, an experiment was conducted using Jinza 34, Liaozha 27, Jinsi 2, Jinnuo 3, and Fenjiuliang 1 with six nitrogen (N) fertilization levels, including 0 (N0), 75 (N75), 150 (N150), 225 (N225), 300 (N300), and 450 kg hm⁻² (N450). The effects of long-term nitrogen fertilization with different levels on sorghum grain yield, nitrogen use characteristics and soil nitrate nitrogen distribution were investigated. The grain yield, grain number and N accumulation of sorghum increased initially and then tended to be stable with the increase of nitrogen fertilizer application. Among them, the maximum increase of sorghum under N75 treatment compared with that under N0 treatment was 23.68%, 48.05%, and 51.86%, respectively. With the increase of nitrogen fertilizer application, the grain starch content decreased, while the grain starch yield increased firstly and then decreased. Nitrogen apparent recovery rate, nitrogen fertilizer agronomic efficiency and nitrogen use efficiency which were accumulated for five years were reduced significantly with the increase of nitrogen fertilizer application. Compared with the N150 treatment, nitrogen use efficiency accumulated for five years under N75 treatment, which was 63.01%, was increased by 76.91%. When nitrogen fertilizer application was beyond 225 kg hm⁻², after four to five years later, nitrate nitrogen residue was increased rapidly in the 60–200 cm soil layer year by year, NO₃⁻-N accumulation peaks distributed in the

本研究由国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-13.5-A20), 山西省应用基础青年科技研究基金项目(201901D211559)和高粱遗传与种质创新山西省重点实验室开放基金项目(2019K-2)资助。

This study was supported by the China Agriculture Research System (CARS-06-13.5-A20), the Science and Technology Research Project in Shanxi Province (201901D211559), and the Shanxi Province Key Laboratory of Sorghum Genetics & Germplasm Innovation (2019K-2).

* 通信作者(Corresponding author): 焦晓燕, E-mail: jiaoxiaoyan@sxagri.ac.cn

第一作者联系方式: E-mail: wangyuan1520@126.com

Received (收稿日期): 2020-04-13; Accepted (接受日期): 2020-08-19; Published online (网络出版日期): 2020-09-04.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200903.1702.004.html>

0–200 cm soil layer and the risk of nitrate nitrogen leaching was increased. In view of the yield, starch yield, nitrogen utilization and environmental benefit, the reasonable nitrogen fertilizer application for sorghum was between 75 kg hm⁻² and 150 kg hm⁻².
Keywords: sorghum; nitrogen fertilizer application; nitrogen utilization characteristics; soil nitrate nitrogen distribution

我国的氮素用量占全球的 30%左右, 但作物吸收利用率普遍低于 50%^[1-2]。适宜的氮素营养通过促进作物的有效分蘖和颖花分化^[3], 增加了穗粒数, 从而提高籽粒和淀粉产量^[4]。但超出作物的需求将导致氮饱和, 在影响光合产物形成与转运的同时, 导致作物群体增大、病虫害及倒伏的风险增加^[5]。氮素奢侈吸收还通过叶片硝态氮水平调控碳水化合物的代谢, 使更多的糖发生酵解转化为有机酸^[6], 影响籽粒淀粉的合成。盈余的氮素大部分以硝态氮形式存在于土壤剖面^[7], 淋溶程度与施氮量显著相关^[8]。¹⁵N 试验表明, 施氮 250 kg hm⁻², 当季玉米收获后残留在土壤中的肥料氮占到 33%^[9]。长期施氮, 残留量累积可达 45%以上^[10]。并逐渐向深层淋失, 每 10 mm 降水可使壤土中硝态氮向下迁移 2~4 cm^[11], 易造成地下水硝酸盐污染。

高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]是世界第五大作物, 具有较强的耐瘠性^[12], 与玉米相比, 达到目标产量需氮量较低^[13]。低氮胁迫下, 高粱根际利用羧酸类和胺类的微生物种类增多^[14], 耐低氮能力较强, 且根系分泌的生物硝化抑制剂能较为高效的抑制亚硝化细菌^[15-16], 进而降低氮素通过反硝化作用和硝态氮淋失向“环境”施肥。因而低氮条件下, 高粱的氮素利用特性及土壤硝态氮的残留累积可能区别于其他作物。且高粱氮素吸收利用还受土壤氮素背景及高粱种间遗传基础和进化差异的影响^[17-18]。施氮还显著降低了高粱籽粒淀粉含量, 且随土壤肥力的提高, 影响效果更加明显^[17]。目前关于不同施氮水平下, 高粱氮素利用特性及土壤剖面硝态氮已有研究^[19-21], 鲜少涉及长期施用。还需在

土壤氮素消耗或累积下, 进一步综合考虑不同品种高粱氮素利用特性、籽粒淀粉含量及土壤硝态氮的残留累积, 以避免土壤氮素背景、品种及气候等因素的影响, 实现高粱氮素的高效利用。本研究连续 5 年以该区主推品种晋杂 34、辽杂 27、晋饲 2 号、晋糯 3 号和汾酒梁 1 号为研究对象, 通过测定其产量、淀粉含量和土壤硝态氮, 探究氮素对高粱生产及土壤环境的影响, 以期为高粱合理施用氮肥提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

山西省农业科学院东阳试验基地(37°33'21"N, 112°40'2"E)属北温带大陆性气候, 海拔 800 m, 年均气温 9.7℃, 年均降水量 440.7 mm, 连续 12 年生育期降水量均值为 351.7 mm, 均方差为 55.7 mm, 据此对高粱生育期降水年型划分^[22]。2015 年属枯水年, 6、7 月降水总量较均值共降低了 47.55%; 2016 年属丰水年, 7 月降水量较均值增加了 1.2 倍; 2017 年属平水年, 但 9 月籽粒灌浆期降水量较均值降低了 95.09%; 2018 年属丰水年, 5 月降水量较均值增加了 74.82%; 2019 年属枯水年 5 月、7 月和 8 月降水量明显低于均值, 分别降低了 97.84%、61.71%和 41.35% (表 1)。该区土壤类型为石灰性褐土, 土壤质地为壤质沙土(各粒级体积百分比分别为: 小于 0.002 mm 黏粒占 1.63%; 0.020~0.002 mm 粉粒占 11.29%; 2~0.02 mm 沙粒占 87.09%)。2015 年播前土壤含有机质 16.51 g kg⁻¹、全氮 0.75 g kg⁻¹、速效磷 6.31 mg kg⁻¹、速效钾 126.08 mg kg⁻¹。

表 1 生育期降水量(2015–2019)
Table 1 Monthly precipitation during five growing seasons from 2015 to 2019 (mm)

时期 Period	降水量 Precipitation					
	2015	2016	2017	2018	2019	平均 Average
5 月 May	32.0	20.2	15.0	48.6	0.6	27.8
6 月 June	15.5	61.9	70.8	54.3	45.8	52.3
7 月 July	74.4	256.6	143.1	143.5	45.6	119.1
8 月 August	67.6	137.5	124.2	77.2	48.8	83.2
9 月 September	68.1	19.8	3.4	56.8	73.4	69.3
生育期 Total growth period	257.6	496.0	356.5	380.4	214.2	351.7

试验采用随机区组设计, 设 0 (N0)、75 (N75)、150 (N150)、225 (N225)、300 (N300)、450 kg hm⁻² (N450) 6 个氮素水平。磷、钾肥为常规处理, 即施磷 (P₂O₅) 75 kg hm⁻²、钾(K₂O) 30 kg hm⁻², 作为基肥施入, 不再追肥。小区面积 30 m², 每个施氮水平设置重复 3 个小区, 间隔 1 m。2015—2019 年均在 5 月 1 日播种, 6 月 8 日定苗, 10 月 3 日收获。并于播前和拔节期分别灌溉 100 mm, 其他田间管理按各品种高产田进行。供试品种, 种植密度见表 2。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 产量测定 于成熟期, 将试验小区各边去掉 0.6 m, 其余部分作为收获区(秸秆一并收获, 未还田), 面积为 30 m²。记录测产面积内的穗数和穗总鲜重, 按平均单穗重取代表性 10 穗, 称取鲜重带回

实验室, 烤种后烘干至恒重, 计算含水量, 折算测产区域产量, 最后得出每公顷产量。

1.2.2 植株氮素测定 每个小区选取代表性植株 10 株, 分为茎、叶、穗轴和籽粒 4 个部分, 分别称其干重, 粉碎, 四分法取样后, 采用凯氏定氮法, 并根据其干重计算高粱地上部氮素累积量^[23]。

1.2.3 籽粒淀粉测定 将 2016—2019 年粉碎的籽粒用氯化钙溶液分散, 采用旋光法测定总淀粉含量^[24]。

1.2.4 土壤硝态氮测定 于 2018—2019 年 10 月 10 日按每 20 cm 采集 0~200 cm 土层的土壤样品。称取风干土样 10 g, 加入 50 mL 2 mol L⁻¹ 的 KCl 浸提, 振荡 60 min, 采用流动连续分析仪(Auto Analyzer 3-AA3)测定土壤硝态氮含量。

表 2 供试高粱品种及种植模式

Table 2 Sorghum varieties and planting density

年份 Year	品种名称 Variety	生育期 Growth period (d)	来源 Origin	种植密度 Planting density (×10 ⁴ plant hm ⁻²)
2015	晋杂 34 号 Jinza 34	132	山西省农业科学院高粱研究所 Sorghum Research Institute, Shanxi Academy of Agriculture Sciences	18.0
2016	辽杂 27 号 Liaoza 27	110	辽宁省农业科学院 Liaoning Academy of Agriculture Sciences	13.5
2017	晋饲 2 号 Jinsi 2	125	山西省农业科学院高粱研究所 Sorghum Research Institute, Shanxi Academy of Agriculture Sciences	16.5
2018	晋糯 3 号 Jinnuo 3	120	山西省农业科学院高粱研究所 Sorghum Research Institute, Shanxi Academy of Agriculture Sciences	12.0
2019	汾酒梁 1 号 Fenjiuliang 1	127	山西省农业科学院高粱研究所 Sorghum Research Institute, Shanxi Academy of Agriculture Sciences	18.0

1.3 数据处理

淀粉产量反映施用氮肥对整株籽粒淀粉的影响, 根据淀粉含量和单株籽粒产量即可计算^[4]:

淀粉产量(grain starch yield, g plant⁻¹) = 淀粉含量×单株籽粒产量/100

就氮素利用特性指标而言, 本文采用 5 年氮素累积表观回收率、5 年氮肥叠加利用率以及 5 年氮肥农学叠加效率(后均以氮肥利用率、氮肥农学效率和氮素表观回收率表示), 以充分考虑氮肥对土壤氮的消耗和补偿效应^[25-26]。相关参数计算采用以下公式:

氮肥利用率(nitrogen fertilizer use efficiency, NFUE, %) = (5 年施氮区单位面积植株地上部分吸氮量 - 5 年不施氮区单位面积植株地上部分吸氮量)/5 年单位面积累积施氮量 × 100

氮肥农学效率(nitrogen fertilizer agronomic efficiency, NAE, kg kg⁻¹) = (5 年施氮区单位面积产量 -

5 年不施氮区单位面积产量)/5 年单位面积累积施氮量
氮素表观回收率(nitrogen apparent recovery rate, NARR, %) = 5 年单位面积植株地上部氮素累积总量 /5 年单位面积累积施氮量 × 100

采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, Microsoft Excel 2010 和 SigmaPlot 12.5 制作图表。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对高粱产量和植株吸氮量的影响

氮肥显著改变了高粱的籽粒产量、穗粒数和植株地上部氮素吸收量(表 3)。施氮 75 kg hm⁻² 显著提高了 2015—2018 年籽粒产量, 分别较不施氮增加了 7.32%、22.58%、23.68%和 17.01%, 随着施氮水平的继续增加, 产量基本不变。2019 年籽粒产量在不施氮下变异性较大, 标准差为 1112.36 kg hm⁻², 各施氮水

平不存在显著差异。施氮 75 kg hm^{-2} 较不施氮处理显著增加了 2016—2019 年的单穗粒数, 分别增加了 19.98%、48.05%、30.06%和 23.64%, 且随施氮水平继续增加穗粒数无显著的变化。2015 年不同施氮水平间穗粒数虽无显著差异, 但亦存在随施氮量的增加呈先升高后趋于稳定的趋势。说明施氮 75 kg hm^{-2} 就可达到大幅增加高粱籽粒产量和穗粒数的目的。

保证作物植株体内充足的氮素营养是其生长和籽粒形成的基础, 施氮提高了 2015—2019 年地上部植株氮素累积量, 其中施氮 75 kg hm^{-2} 处理增幅最大, 分别较不施氮提高了 28.35%、48.69%、39.30%、51.86%和 33.18%。说明施氮 75 kg hm^{-2} 就可达到增加植株地上部氮素累积的目的, 且超过该水平增幅不大。

表 3 不同施氮水平下高粱产量和植株地上部氮素累积量

Table 3 Sorghum yield and nitrogen accumulation of above-ground plant at different nitrogen application rates

年份 Year	处理 Treatment	产量 Grain yield (kg hm^{-2})	千粒重 1000-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per ear	氮素吸收量 N accumulation (kg hm^{-2})
2015	N0	8828.00±425.81 a	23.58±0.82 a	1954.49±84.55 a	176.03±3.35 a
	N75	9474.50±223.62 b	24.01±2.31 a	1925.23±229.71 a	225.93±7.43 b
	N150	9398.50±263.27 ab	22.13±1.25 a	2200.79±158.03 a	227.53±9.59 b
	N225	9373.00±408.22 ab	22.17±0.40 a	2044.42±114.56 a	220.93±13.63 b
	N300	9157.50±231.13 ab	23.28±0.97 a	1992.32±185.57 a	250.97±9.57 c
	N450	9178.00±107.92 ab	23.39±1.04 a	2019.53±93.40 a	264.37±5.75 c
2016	N0	6558.45±867.17 a	25.38±1.08 a	1785.01±96.17 a	126.20±23.91 a
	N75	8039.30±783.39 b	26.67±0.95 ab	2141.66±223.08 b	195.45±38.84 b
	N150	8609.20±699.18 b	27.81±0.44 b	1969.83±118.01 ab	191.70±1.08 b
	N225	8523.85±785.79 b	27.08±0.45 ab	2120.00±168.73 b	191.70±17.16 b
	N300	7720.10±358.35 ab	27.09±2.26 ab	2133.19±203.92 b	187.65±33.45 b
	N450	8016.70±636.33 b	27.32±0.78 ab	2005.44±40.11 ab	193.65±6.94 b
2017	N0	6049.05±302.83 a	20.25±2.02 a	1752.42±231.41 a	100.90±8.71 a
	N75	7481.25±860.12 b	18.76±1.45 a	2594.47±251.06 b	140.55±8.55 b
	N150	6815.10±352.25 ab	19.04±3.58 a	2360.97±460.97 b	142.00±9.05 b
	N225	7014.95±300.14 ab	20.64±1.70 a	2277.21±312.13 ab	145.35±1.73 bc
	N300	7099.55±756.17 ab	18.45±0.39 a	2298.74±200.92 ab	150.50±9.80 bc
	N450	7131.00±773.23 ab	19.65±2.82 a	2218.02±282.58 ab	163.95±18.09 c
2018	N0	6431.75±264.32 a	27.49±1.09 a	2167.46±37.54 a	87.25±6.78 a
	N75	7525.70±533.25 b	26.09±1.32 a	2818.92±312.25 b	132.50±9.62 b
	N150	7550.20±628.92 b	25.19±0.60 a	2776.43±61.98 b	145.30±7.60 b
	N225	7166.90±729.93 b	26.01±2.01 a	2682.47±71.18 b	140.10±13.08 b
	N300	6803.75±840.38 ab	26.93±2.51 a	2598.97±396.42 b	135.60±16.37 b
	N450	6829.75±442.84 ab	26.74±3.72 a	2641.43±263.05 b	140.40±10.78 b
2019	N0	7248.78±1112.36 a	20.90±1.04 b	1960.07±445.54 a	97.10±17.91 a
	N75	7915.81±664.66 a	19.47±1.63 ab	2423.49±316.84 ab	129.32±17.69 ab
	N150	7715.23±585.36 a	18.33±1.10 a	2545.77±126.49 b	148.10±13.08 b
	N225	7466.09±750.31 a	18.20±0.44 a	2455.83±112.38 ab	142.19±19.16 b
	N300	8358.97±872.92 a	19.57±0.72 ab	2593.18±350.69 b	159.20±29.95 b
	N450	7485.30±746.40 a	19.83±1.40 ab	2336.11±224.37 ab	149.83±20.74 b

N0: 施氮量为 0 kg hm^{-2} ; N75: 施氮量为 75 kg hm^{-2} ; N150: 施氮量为 150 kg hm^{-2} ; N225: 施氮量为 225 kg hm^{-2} ; N300: 施氮量为 300 kg hm^{-2} ; N450: 施氮量为 450 kg hm^{-2} 。同列不同字母表示同一年度不同处理间差异达 0.05 显著水平。

N0: 0 kg hm^{-2} ; N75: 75 kg hm^{-2} ; N150: 150 kg hm^{-2} ; N225: 225 kg hm^{-2} ; N300: 300 kg hm^{-2} ; N450: 450 kg hm^{-2} . Values within a column followed by different letters mean significant differences among treatments in a year at the 0.05 probability level.

2.2 不同施氮水平对高粱籽粒淀粉的影响

淀粉含量在籽粒的出米率、适口性及酿造等方面都有重要影响^[27-28]。由图 1 可看出, 淀粉含量随施氮量的增加逐步降低。2016—2019 年施氮 75 kg hm⁻² 较不施氮分别降低了 4.95%、1.35%、2.83% 和 2.38%; 而施氮 450 kg hm⁻² 则分别降低了 12.01%、1.87%、3.92% 和 4.44%。但 2017 年籽粒淀粉含量在施氮 225 kg hm⁻² 和 300 kg hm⁻² 略有上升。淀粉产量反映了单株籽粒生产淀粉的能力, 2016 年施氮

225 kg hm⁻² 籽粒淀粉产量达到最大, 较不施氮和施氮 450 kg hm⁻² 分别增加了 23.46% 和 16.22%, 且与施氮 75 kg hm⁻²、150 kg hm⁻² 和 300 kg hm⁻² 无显著性差异; 2017 年施氮 75 kg hm⁻² 籽粒淀粉产量达到最大, 较不施氮和施氮 450 kg hm⁻² 分别增加了 35.85% 和 13.10%。2018—2019 年虽不存在显著性差异, 但亦存在施氮提高了籽粒淀粉产量的趋势。这表明施用氮素使高粱籽粒淀粉含量逐步降低, 但低水平氮素更有利于单株籽粒淀粉产量的形成。

图 1 不同施氮量下高粱淀粉含量和淀粉产量

Fig. 1 Content of total starch and starch yield at different nitrogen application rates (mean±SD)

不同字母表示同一年度不同处理间差异达 0.05 显著水平。处理同表 3。

Values followed by different letters mean significant differences among treatments in a year at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 3.

2.3 不同施氮水平下高粱的氮素利用特性

由表 4 可知, 施氮 150 kg hm⁻² 较 75 kg hm⁻², 氮肥利用率降低了 43.47%, 氮肥农学效率降低了 53.28%。施氮 75 kg hm⁻² 时, 氮素表观回收率和氮肥利用率的差值为 156.65%。当施氮量达到 150 kg hm⁻² 时, 差值为 78.33%。

2.4 不同施氮水平对土壤硝态氮含量的影响

硝态氮是旱作农田氮肥残留的主要盈余项, 将其控制在一定范围内, 则可兼顾产量与环境效益^[29]。由图 2 可知, 施氮 75 kg hm⁻² 与不施氮处理在 0~200 cm 土层硝态氮含量基本一致, 且几乎未见累积峰; 施氮 150 kg hm⁻² 在 2018 年 60~80 cm 和 2019 年

表 4 不同氮素用量下高粱 5 年累积氮肥利用特性

Table 4 Nitrogen utilization characteristics which were accumulated for five years at different nitrogen application rates

处理 Treatment	氮肥施入量 N fertilization (kg hm ⁻²)	氮素积累 N accumulation (kg hm ⁻²)	氮肥利用率 NFUE (%)	氮肥农学效率 NAE (kg kg ⁻¹)	氮素表观回收率 NARR (%)
N0	0	587.45 a	—	—	—
N75	375	823.72 b	63.01 d	14.19 d	219.66 e
N150	750	854.60 bc	35.62 c	6.63 c	113.95 d
N225	1125	840.24 bc	22.47 b	3.94 b	74.69 c
N300	1500	883.90 cd	19.76 ab	2.68 ab	58.92 b
N450	2250	912.18 d	14.43 a	1.57 a	40.54 a

同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。处理同表 3。

NFUE: nitrogen fertilizer use efficiency; NAE: nitrogen fertilizer agronomic efficiency; NARR: nitrogen apparent recovery rate. Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among treatments at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 3.

100~120 cm 土层处硝态氮略有累积, 但含量仅为 9.92 mg kg^{-1} 和 14.47 mg kg^{-1} , 淋溶所带来的环境风险较低。其他施氮处理均存在明显的累积峰, 2019 年施氮 450 kg hm^{-2} 在 80~100 cm 和 180~200 cm 土层处, 峰值达到 72.76 mg kg^{-1} 和 49.33 mg kg^{-1} , 较不施氮处理分别增加了 18.40 倍和 11.52 倍, 淋溶所造成的环境风险加剧。

2019 年施氮 225、300 和 450 kg hm^{-2} 收获后硝态氮含量在 0~200 cm 土层与 2018 年存在明显

的差异(图 2), 分别在 140~160 cm、120~140 cm 和 100~120 cm 土层处较 2018 年增加了 2.66 倍、7.68 倍和 2.02 倍, 硝态氮在 60~200 cm 明显存在逐年累积的现象。2018—2019 年, 不施氮和施氮 75 kg hm^{-2} 在 0~200 cm 土层中硝态氮含量基本一致。施氮 150 kg hm^{-2} 在 100~200 cm 土层中, 2019 年较 2018 年略有增加, 在 160~180 cm 土层处 2 年差值达到最大, 差值仅为 11.78 mg kg^{-1} , 残留累积效果并不明显。

图 2 2018 年和 2019 年高粱收获后 0~200 cm 土层土壤硝态氮

Fig. 2 Nitrate nitrogen in the 0~200 cm soil layer after sorghum harvest stage in 2018 and 2019

处理同表 3。Treatments are the same as those given in Table 3.

3 讨论

3.1 不同施氮水平对高粱籽粒产量和淀粉形成的影响

根部氮素营养通过对细胞分裂素这一信号物质的调控^[30-31], 促进作物颖花分化^[3], 进而增加了穗粒数, 有助于提高籽粒产量和淀粉产量^[4]。本研究中施用氮肥显著增加了高粱籽粒产量和穗粒数, 且 N75 处理增幅最大, 并随施氮量的增加保持基本不变, 这与高杰等^[32]研究基本一致。2019 年籽粒产量在各施氮处理下不存在显著性差异, 这可能与枯水年下该品种的耐旱表现及不施氮下变异性较大有关。

淀粉含量随施氮量的增加而降低, 这与王劲松等^[17]研究结果相似。这一方面可能与根际氮素营养通过对植株体内硝酸盐的调节有关, 叶片硝酸盐在与硝酸还原酶的共同参与下, 对光合产物进行调节, 使更多的糖发生酵解转化为有机酸^[6]; 另一方面可能是由于硝酸还原酶的调节影响了 ADP-葡萄糖焦磷酸酶的调节亚基, 进而抑制其活性^[33], 影响籽粒淀粉的合成。此外, 2017 年施氮 225 kg hm^{-2} 和 300 kg hm^{-2} 籽粒淀粉含量略有上升, 这可能由于 2017 年籽粒灌浆期受水分胁迫, 导致施氮提高了籽粒淀粉含量^[34]。2016 年和 2017 年单株淀粉产量随着施氮量的增加基本呈现先增加后降低的趋势, 不施氮和高

氮处理皆不利于淀粉产量的形成,这与穗粒数和淀粉含量的变化有关。2018 年和 2019 年各施氮处理下虽淀粉产量不存在显著性差异,但亦存在施氮提高了籽粒淀粉产量的趋势,这可能与本试验在田间进行,部分品种变异性较大有关。综上所述,本研究认为高粱在籽粒产量和淀粉方面最适宜的施氮量为 75 kg hm^{-2} 。

3.2 施氮水平对高粱氮素吸收及利用的影响

适量的氮肥可以提高作物的物质生产能力,一定程度上促进植株氮素积累总量的提升^[35]。本研究中施氮逐步增加了高粱植株地上部氮素吸收量,且以 N75 处理增幅最大。2015 年和 2016 年植株氮素吸收量高于 2017—2019 年, N0 处理差异更明显(表 3)。这一方面可能与 2015 年播前全氮含量为 0.75 g kg^{-1} 有关,根据黄土高原地区土壤养分含量分级标准^[36],属中等级。加之,高粱植株具有较高的吸收氮素的能力^[13],土壤氮素背景显著影响了高粱植株氮素的吸收^[17]。另一方面,还可能与不同高粱品种的氮素利用效率存在差异有关^[18]。不施氮和施氮 75 kg hm^{-2} 下,植株 5 年氮素累积量远高于氮素投入量(表 4),这可能与土壤氮素的残留,以及大气氮沉降对农田氮素的输入有关。河北辛集的调查显示,麦田收获后 0~90 cm 土层中的残留无机氮为 $75\sim 510 \text{ kg hm}^{-2}$,超过 200 kg hm^{-2} 的田块占到 40%^[37]。刘平等^[38]在山西北部的监测试验表明,该区氮素干湿沉降总量达到每年 $47.86 \text{ kg N hm}^{-2}$ 。且氮素沉降总量超过每年 30 kg N hm^{-2} ,会对农田生态系统养分循环产生影响,不容忽视^[39]。

氮肥利用率(NFUE)反映了植株对氮肥的利用情况,而氮肥农学效率(NAE)可以用来评价氮肥的增产效果。过量的施氮使作物物质生产能力增幅变小,氮肥利用率和氮肥农学效率降低^[40]。因此,适当提高氮肥利用率,不仅是提高实际生产中产出投入比的需要,亦是降低氮素过量施用风险的需要。本研究中氮肥利用率和氮肥农学效率随施氮量的增加逐渐降低(表 4)。施氮量达到 150 kg hm^{-2} 时,氮肥利用率和氮肥农学效率较施氮 75 kg hm^{-2} 分别降低了 43.47%和 53.28%,表明施氮 150 kg hm^{-2} 时,施用氮素已不能大幅提高高粱的物质生产能力。朱兆良等^[1]在总结 782 个田间试验数据的基础上,得出主要粮食作物的氮肥利用率为 28%~41%,平均为 35%。与本研究中,施氮量为 150 kg hm^{-2} 的氮肥利用率基本一致。因此,就实现高粱植株对土壤氮素高效利用

的目标而言,氮素供应水平应小于 150 kg hm^{-2} 。

然而氮肥利用率并不是越高越好,而是在维持较高目标产量、维持土壤氮肥力、实现体系氮输入和输出的基本平衡的条件下才有意义^[40]。氮素表观回收率(NARR)反映了植株氮素吸收和氮肥施用量之间的平衡状况。本研究中,施氮量为 75 kg hm^{-2} 时,氮素表观回收率为 219.66%。此时可能由于高粱对氮素的需求,以及土壤中不可避免的氮素损失,而增加了土壤氮库的消耗。当施氮量达到 150 kg hm^{-2} 时,氮素表观回收率为 113.95%,接近平衡状态。但还需考虑土壤氮素的残留以及大气氮沉降的输入。因此,施氮 150 kg hm^{-2} 时,造成氮素残留的风险较高。故本研究认为施氮量应介于 $75\sim 150 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间,可能更有利于在维持土壤氮素输入和输出平衡的同时,降低土壤氮素的残留。

氮素对作物营养生长的作用要大于对生殖生长,过量施氮会影响植株碳、氮代谢^[5]。本研究中,施氮 75 kg hm^{-2} 时,氮素表观回收率和氮肥利用率的差值为 156.65%,此时高粱亦存在缺氮的风险。当施氮量达到 150 kg hm^{-2} 时,差值为 78.33%,已能满足高粱的生长需求,且存在氮素过量施用的风险。故本研究认为综合氮肥利用效率、氮肥农学效率、土壤氮素输入输出的平衡以及高粱生长对氮素吸收的基本要求,施氮量应介于 $75\sim 150 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。

3.3 不同施氮水平对土壤硝态氮含量的影响

硝态氮是氮素在土壤中存在和作物吸收利用的主要形式,北方旱作条件下,施入的铵态氮肥和酰胺态氮肥在土壤中 1~2 周会转化为硝态氮,且作物收获后残留氮素大部分以硝态氮的形态存在^[7]。本研究表明,连续施氮 4~5 年后,施氮 150 kg hm^{-2} 与不施氮处理在 0~200 cm 且几乎未见累积峰,随着施氮量继续的增加,出现明显的累积峰,存在明显的淋失风险(图 2)。

硝态氮在土壤剖面的残留累积量与施氮量显著相关^[8],由土壤硝态氮含量、土层厚度和土壤容重决定。一般认为土壤表层容重易受耕作方式的影响,但本研究在同一试验地连续施氮,并采取了相同的耕作措施,保证了不同年际间土壤容重基本一致。故相同土层内,硝态氮含量可以间接反映连续施氮状况下硝态氮在土壤剖面的残留累积。2019 年(连续施氮第 5 年)施氮 225 kg hm^{-2} 高粱收获后硝态氮含量在 0~200 cm 土层与 2018 年存在明显的差异,残留氮素累积逐年增加。施氮 150 kg hm^{-2} 在 100~200 cm

土层中, 2019 年较 2018 年略有增加。不施氮和施氮 75 kg hm^{-2} 在 0~200 cm 土层中硝态氮含量在基本一致。说明施氮量低于 150 kg hm^{-2} 残留氮素逐年累积效果不明显(图 2)。综上所述, 施氮量低于 150 kg hm^{-2} 几乎不存在潜在的环境风险。

4 结论

施用氮肥显著提高了高粱产量、籽粒淀粉产量和植株地上部氮素吸收量, 以施氮 75 kg hm^{-2} 增幅最大。施氮达到 150 kg hm^{-2} 时, 氮肥利用率大幅下降, 施入氮素已能满足高粱植株的基本生长需求。施氮量低于 150 kg hm^{-2} 时, 在 0~200 cm 土层几乎没有明显的硝态氮累积峰, 硝态氮残留逐年累积效果不明显。故施氮量应介于 $75\sim150 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间, 在满足高粱植株基本生长需求的同时, 弥补了土壤氮库的消耗, 有效降低了土壤硝态氮淋失, 亦有利于高粱产量和籽粒淀粉产量的形成。

References

- [1] 朱兆良, 王启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. pp 228–245.
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Soil of China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. pp 228–245 (in Chinese).
- [2] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陆新平, 江荣凤. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45: 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Lu X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 915–924 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王夏雯, 王绍华, 李刚华, 王强盛, 刘正辉, 余翔, 丁艳锋. 氮素穗肥对水稻幼穗细胞分裂素和生长素浓度的影响及其与颖花发育的关系. 作物学报, 2008, 34: 2184–2189.
Wang X W, Wang S H, Li G H, Wang Q S, Liu Z H, Yu X, Ding Y F. Effect of panicle nitrogen fertilizer on concentrations of cytokinin and auxin in young panicles of japonica rice and its relation with spikelet development. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 2184–2189 (in Chinese with English abstract).
- [4] 依兵. 高粱子粒淀粉积累与合成相关酶活性研究. 沈阳农业大学博士学位论文, 辽宁沈阳, 2014.
Yi B. Starch Accumulation and Enzymes Activities for Starch Synthesis in Sorghum Grains. PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [5] Osaki M, Iyoda M, Tadano T. Ontogenetic changes in the contents of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, phosphoenol pyruvate carboxylase, and chlorophyll in individual leaves of maize. *Soil Sci Plant Nutr*, 1995, 41: 285–293.
- [6] Stitt M, Müller C, Matt P, Gibon Y, Carillo P, Morcuende R, Scheible W, Krapp A. Steps towards an integrated view of nitrogen metabolism. *J Exp Bot*, 2002, 53: 959–970.
- [7] Wang H, McCaig T N, DePauw R M, Clarke F R, Clarck J M. Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield. *Can J Plant Sci*, 2003, 83: 699–707.
- [8] Wang G L, Chen X P, Cui Z L, Yue S C, Zhang F S. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China. *Agric Ecosyst Environ*, 2014, 197: 293–300.
- [9] Rimski-Korsakov H, Rubio G, Lavador R S. Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2012, 93: 253–263.
- [10] Liang B, Zhao W, Yang X Y, Zhou J B. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat-maize experiment. *Field Crops Res*, 2013, 144: 126–134.
- [11] 戴健, 王朝辉, 李强, 李孟华, 李富翠. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响. 土壤学报, 2013, 50: 956–965.
Dai J, Wang Z H, Li Q, Li M H, Li F C. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland. *Acta Pedol Sin*, 2013, 50: 956–965 (in Chinese with English abstract).
- [12] Assefa Y, Roozeboom K, Thompson C, Schlegel A, Stone L, Lingenfelter J. Corn and Sorghum Comparison: All Things Considered. Waltham: Academic Press, 2013. pp 71–86.
- [13] Muchow R C. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Res*, 1998, 56: 209–216.
- [14] 崔佩佩, 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 南江宽, 白文斌, 焦晓燕. 不同施肥处理对高粱根际土壤微生物功能多样性的影响. 华北农学报, 2018, 33(5): 195–202.
Cui P P, Wu A L, Wang J S, Dong E W, Nan J K, Bai W B, Jiao X Y. Effect of different fertilization treatments on soil microbial function diversity in rhizosphere of sorghum. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2018, 33(5): 195–202 (in Chinese with English abstract).
- [15] Hossain A K M, Zakir G V, Subbarao S J, Pearse S G, Osamu I, Takayuki S, Naoyoshi K, Nakahara K, Yoshihashi T, Ono H, Yoshida M. Detection isolation and characterization of a root-exuded compound, methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate, responsible for biological nitrification inhibition by sorghum (*Sorghum bicolor*). *New Phytol*, 2008, 180: 442–451.
- [16] Subbarao G V, Nakahara K, Ishikawa T, Ono H, Yoshida M, Zhu Y Y. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization. *Plant Soil*, 2012, 366: 243–259.
- [17] 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 白文斌, 王媛, 焦晓燕. 不同肥力条件下施肥对粒用高粱产量、品质及养分吸收利用的影响. 中国农业科学, 2019, 52: 4166–4176.
Wang J S, Dong E W, Wu A L, Bai W B, Wang Y, Jiao X Y. Responses of fertilization on sorghum grain yield, quality and nutrient utilization to soil fertility. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 4166–4176 (in Chinese with English abstract).
- [18] Gardner J C, Maranville J W, Paparozzi E T. Nitrogen use efficiency among diverse sorghum cultivars. *Crop Sci*, 1994, 34: 728–733.
- [19] Marsalis M A, Angadi S V, Contrerasgovea F E. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crops Res*, 2010, 116: 52–57.

- [20] Almodares A, Taheri R, Hadi M R, Fathi M. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on the growth parameters and the yield components of two sweet sorghum cultivars. *Pak J Biol Sci*, 2006, 9: 2350–2353.
- [21] Tang C C, Yang X L, Chen X, Ameen A, Xie G H. Sorghum biomass and quality and soil nitrogen balance response to nitrogen rate on semiarid marginal land. *Field Crops Res*, 2018, 2: 12–22.
- [22] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 陈天林. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态. 应用生态学报, 2008, 19: 1234–1240.
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z, Chen T L. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19: 1234–1240 (in Chinese with English abstract).
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. pp 264–268.
Lu R K. Analytical Methods for Soil and Agro-Chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. pp 264–268 (in Chinese).
- [24] 谷物籽粒粗淀粉测定方法(GB 5006-1985), 中华人民共和国国家标准.
Determination of Crude Starch in Cereals Seeds (GB 5006-1985), State Standard of the People's Republic of China (in Chinese).
- [25] 刘巽浩, 陈阜. 对氮肥利用率若干传统观念的质疑. 农业现代化研究, 1990, 11(4): 28–34.
Liu X H, Chen F. Queries on the traditional concepts of nitrogen use efficiency. *Res Agric Modern*, 1990, 11(4): 28–34 (in Chinese).
- [26] 宇万太, 周桦, 马强, 沈善敏. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响—兼论作物氮肥利用率. 土壤学报, 2010, 47: 90–96.
Yu W T, Zhou H, Ma Q, Shen S M. Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate. *Acta Pedol Sin*, 2010, 47: 90–96 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张桂香, 史红梅, 李爱军. 高粱高淀粉基础材料的筛选及评价. 作物杂志, 2009, (1): 97–98.
Zhang G X, Shi H M, Li A J. Screening and evaluation of sorghum varieties with high starch content. *Crops*, 2009, (1): 97–98 (in Chinese with English abstract).
- [28] Ebadi M R, Sedghi M, Kakahkai R M. Accurate prediction of nutritional value of sorghum grain using image analysis. *Brit Poultry Sci*, 2019, 60: 154–160.
- [29] Jemison J M, Fox R H. Nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manured corn measured with zero-tension pan lysimeters. *J Environ Qual*, 1994, 23: 337–343.
- [30] Takei K. Nitrogen-dependent accumulation of cytokinins in root and the translocation to leaf: Implication of cytokinin species that induces gene expression of maize response regulator. *Plant Cell Physiol*, 2001, 42: 85–93.
- [31] Samuelson M E, Larsson C M. Nitrate regulation of zeatin riboside levels in barley roots: effects of inhibitors of N assimilation and comparison with ammonium. *Plant Sci*, 1993, 93: 77–84.
- [32] 高杰, 李青凤, 汪灿, 张国斌, 彭秋. 不同氮素水平对糯高粱物质生产及氮素利用特性的影响. 作物杂志, 2017, (6): 126–130.
Gao J, Li Q F, Wang C, Zhang G B, Peng Q. Effects of different nitrogen level on material production and nitrogen use characteristics in glutinous sorghum. *Crops*, 2017, (6): 126–130 (in Chinese with English abstract).
- [33] Scheible W R, Gonzalez-Fontes A, Lauerer M, Müller-Röber B, Caboche M, Stitt M. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco. *Plant Cell*, 1997, 5: 783–798.
- [34] 王劲松, 董二伟, 武爱莲, 南江宽, 韩雄, 王立革, 丁玉川, 焦晓燕. 灌溉时期与施氮量对矮秆高粱产量和品质的影响. 灌溉排水学报, 2017, 36(增刊 2): 1–8.
Wang J S, Dong E W, Wu A L, Nan J K, Han X, Wang L G, Ding Y C, Jiao X Y. Effects of irrigation period and nitrogen application rate on dwarf sorghum yield and quality. *J Irrig Drain*, 2017, 36(S2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [35] 刘璐, 王朝辉, 刁超朋, 王森, 李莎莎. 旱地不同小麦品种产量与干物质及氮磷钾养分需求的关系. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 599–608.
Liu L, Wang Z H, Diao C P, Wang S, Li S S. Grain yield of different wheat cultivars and their relations to dry matter and NPK requirement in dryland. *Plant Nutr Fert Sci*, 2018, 24: 599–608 (in Chinese with English abstract).
- [36] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992. pp 125–135.
Yang W Z, Yu C Z. The Management and Evaluation on the Loess Plateau Area. Beijing: Science Press, 1992. pp 125–135 (in Chinese).
- [37] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响. 生态环境, 2003, 12(1): 24–28.
Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China. *Ecol Environ*, 2003, 12(1): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- [38] 刘平, 刘学军, 骆晓声. 山西北部农村区域大气活性氮沉降特征. 生态学报, 2016, 36: 5353–5359.
Liu P, Liu X J, Luo X S. The atmospheric deposition characteristics of reactive nitrogen (Nr) species in Shuozhou area. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 5353–5359 (in Chinese with English abstract).
- [39] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1–42.
- [40] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的误解. 土壤学报, 2014, 51: 921–933.
Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency. *Acta Pedol Sin*, 2014, 51: 921–933 (in Chinese with English abstract).