

滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮累积的影响

井涛¹, 樊明寿^{1*}, 周登博², 秦永林¹, 石晓华¹

(1 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 2 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101)

摘要: 通过田间试验研究了高垄覆膜滴灌条件下施氮量(N 0、90、180、270、360 kg/hm²)对马铃薯产量、土壤硝态氮积累、氮素平衡及氮肥利用率的影响。结果表明, N180处理的马铃薯块茎产量最高。马铃薯收获期各处理硝态氮含量为表层土(0–20 cm)最高, 且在0–120 cm剖面呈现降低的趋势; 各处理0–40 cm土层硝态氮积累量占0–120 cm土层硝态氮积累总量的47.74%–53.17%。施氮量与马铃薯吸氮量、土壤硝态氮残留量、氮素表观损失量呈显著正相关, 马铃薯吸氮量、硝态氮残留量和氮素表观损失量分别占增加纯氮的37.93%、45.99%和16.08%。马铃薯块茎吸氮量和收获指数随着施氮量的增加有增加的趋势; 氮肥吸收利用率、氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率均以N90处理最高, 分别为67.97%、68.06 kg/kg和154.92 kg/kg。在内蒙古阴山北麓马铃薯主产区, 覆膜滴灌施氮量应控制在90–180 kg/hm²。

关键词: 马铃薯; 施氮量; 硝态氮积累; 氮素平衡; 氮素利用率

中图分类号: S632.60; S606

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)03-0654-08

Effects of nitrogen fertilization on potato tuber yield, N uptake and soil NO₃⁻-N accumulation under plastic mulching with drip irrigation

JING Tao¹, FAN Ming-shou^{1*}, ZHOU Deng-bo², QIN Yong-lin¹, SHI Xiao-hua¹

(1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China;

2 Institute of Tropical Bioscience & Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract: A field experiment was carried out to investigate the effects of different nitrogen levels(N 0, 90, 180, 270 and 360 kg/ha) on potato tuber yield, soil nitrate accumulation, nitrogen balance and nitrogen use efficiency in potato under plastic mulching with drip irrigation. The results show that the tuber yield of the N180 treatment is the highest, and the highest soil NO₃⁻-N contents are observed at 0–20 cm soil layers of each treatment at the harvest stage of potato, and the soil NO₃⁻-N contents are reduced with the increase of depth in soil profiles (0–120 cm). Soil NO₃⁻-N accumulation of each treatment(0–40 cm) accounts for 47.75%–53.17% of total accumulation (0–120 cm). Soil NO₃⁻-N accumulation and nitrogen apparent loss are positively correlated with the nitrogen application rates. Potato nitrogen uptakes, soil NO₃⁻-N accumulation and nitrogen apparent loss accounts for 37.93%, 45.99% and 16.08% of the total nitrogen input. Nitrogen absorption of potato tubers and nitrogen harvest index are increased with the increase of the nitrogen application rate. The highest N recover efficiency, N agronomic efficiency and N physiological efficiency are observed in the treatment of N90, about 67.97%, 68.06 kg/kg and 154.92 kg/kg, respectively. The nitrogen application rates should be controlled by 90–180 kg/ha under plastic cover with drip irrigation in potato production areas of northern Yinshan mountains in Inner Mongolia.

Key words: potato; nitrogen rate; nitrate accumulation; nitrogen balance; nitrogen use efficiency

收稿日期: 2011-09-16

接受日期: 2011-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(31160411); 农业部公益性行业计划(201103003); 内蒙古农业大学马铃薯创新团队(nndpy-5)支持研究项目资助。

作者简介: 井涛(1983—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: sjs1227@163.com

* 通讯作者 Tel: 0471-4307390, E-mail: fmswh@yahoo.com.cn

众所周知,过量施用氮肥会导致氮肥利用率低和一系列严重的环境污染问题,如地下水硝酸盐污染等^[1-3]。然而,如何合理施用氮肥在农业生产上是很难掌控的综合农业措施^[4]。通常认为氮肥的最好管理措施是根据作物需求时期分次施肥^[5]。通过滴灌施肥,可以有效调节施用氮肥的种类、比例、数量及时期;并将肥料施于根区,保证根区养分的供应,从而减少养分的淋失,大大地提高氮肥的利用效率,降低环境污染的风险。已有结果表明,在滴灌和漫灌两种灌溉模式下,滴灌施肥能显著提高氮肥利用率,增加马铃薯块茎产量^[6]。

马铃薯高垄覆膜滴灌栽培是近年来北方一些地区开始推广的新型栽培模式,虽然关于灌水和施氮对马铃薯产量、肥料利用率影响的研究已较多^[7-11],而在这种新型栽培模式下,滴施氮肥对土壤硝态氮积累分布、马铃薯氮素吸收以及氮肥利用率的综合研究鲜有报道。因此,研究高垄覆膜滴灌栽培中土壤硝态氮的积累运移、氮素平衡和氮素利

用规律,即可了解氮素在土壤-马铃薯体系中的循环,也可优化滴灌施肥的氮肥管理,对保护农田生态平衡有重要意义。本试验拟通过内蒙古自治区阴山北麓马铃薯主产区的高垄覆膜滴灌施肥试验,研究不同滴灌施氮量对马铃薯土壤硝态氮积累变化规律、土壤-马铃薯体系的氮素平衡以及氮肥利用率的影响,以期为该区域马铃薯水肥管理制度的优化、氮肥利用率的提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及试验材料

试验于2010年4月~10月在内蒙古武川县旱作试验站中心农场(N41°08',E111°17')进行。该站地属中温带大陆性季风气候,历年平均降水量为354 mm左右,无霜期124 d左右。供试土壤为壤土,0—120 cm土壤养分含量见表1,试验地前茬作物为燕麦。供试材料为脱毒马铃薯夏坡蒂原种。

表1 供试土壤基本理化性质(0—120 cm)

Table 1 Basal physical and chemical characteristics of the soil

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density (g/cm ³)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N	速效钾 Available K	速效磷 Olsen-P	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	pH
0—20	1.48	13.06	1.48	118.01	9.42	19.03	8.16
20—40	1.41	8.00	1.18	73.45	4.84	12.53	8.35
40—60	1.34	8.65	0.72	67.25	3.97	6.48	8.35
60—80	1.46	8.21	0.86	50.36	1.77	4.36	8.27
80—100	1.36	6.70	0.60	59.12	1.60	5.00	8.57
100—120	1.45	6.85	0.66	68.71	2.78	4.57	8.64

1.2 试验设计

试验设5个施氮处理,分别为0(N0)、90(N90)、180(N180)、270(N270)、360(N360) kg/hm²。各处理随机排列,重复5次。小区面积为6 m×5 m,为消除小区间的氮素移动,小区间设1 m人行道。马铃薯生育期有效降水量为234 mm,灌水量为1350 m³/hm²。滴管带内径16 mm,滴头间距30 cm,滴头流量2.0 L/h。氮肥随灌水施入,具体灌水施肥时间、用量见表2。

试验采用高垄覆膜滴灌栽培方式,即起垄高40 cm,上垄宽30 cm,下垄宽70 cm,两垄中心相距90 cm的“梯”型垄;垄中心表面铺设滴灌带,用1.2 m宽地膜覆盖垄背(图1)。2010年5月17日播种马铃薯,采取点播方式,种植密度为5×10⁴株/hm²。试验用氮肥为尿素(含N 46%);磷、钾肥为重过磷酸钙(含P₂O₅ 43%)、硫酸钾(含K₂O 50%),播前基施。

表 2 高垄覆膜滴灌马铃薯灌水、施肥量和时期
Table 2 Time and amount of irrigation and N fertilizer for topdressing in potato under plastic cover with drip irrigation

施氮量 N rate (kg/hm ²)	灌水量(m ³ /hm ²)/追肥量(kg/hm ²) Irrigation amount/Top-dressing N							
	6-21	6-30	7-10	7-18	7-27	8-7	8-15	8-23
0	90/0	150/0	225/0	225/0	225/0	210/0	150/0	75/0
90	90/6.75	150/29.25	225/22.5	225/15.75	225/15.75	210/0	150/0	75/0
180	90/13.5	150/58.5	225/45	225/31.5	225/31.5	210/0	150/0	75/0
270	90/20.25	150/87.75	225/67.5	225/47.25	225/47.25	210/0	150/0	75/0
360	90/27	150/117	225/90	225/63	225/63	210/0	150/0	75/0

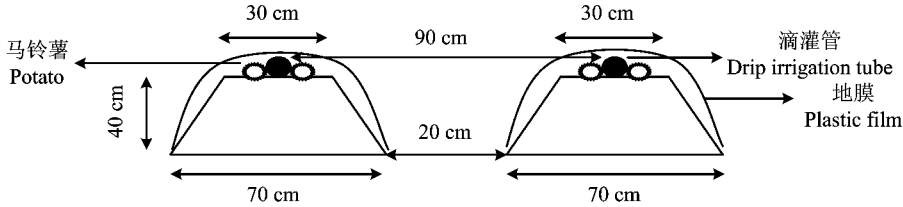


图 1 覆膜滴灌剖面示意图
Fig. 1 Profile of drip irrigation under plastic cover

1.3 测定项目及方法

播种前(2010 年 5 月 17 日)、收获后(9 月 26 日)远离小区边缘,分别在各小区滴头正下方用土钻采集 0—120 cm 深度的土样,苗期(7 月 4 日)、块茎形成期(7 月 17 日)、块茎膨大期(8 月 5 日)、淀粉积累期(8 月 23 日)用同样方法采集 0—80 cm 深度土样。每小区 3 钻,每 20 cm 分为 1 层,同层土壤充分混匀留样,放于 -4℃ 冰箱保存。称取土壤鲜样 5 g,加入 2 mol/L 的 KCl 溶液 25 mL 浸提,振荡 30 min,过滤后用 Skalar San ++ 型流动分析仪(荷兰公司)测定土壤硝态氮含量。

在马铃薯成熟收获期每小区随机抽取 2 m² 的植株,分根、茎、叶、叶柄、块茎分别于 80℃ 烘干至恒重,计算干物质重。样品粉碎过筛后,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏法测定植株和块茎全氮^[12]。

土壤有机质用外加热法;土壤全氮用半微量凯氏法;速效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法;速效钾用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法;土壤容重用环刀法;土壤 pH 用酸度计法测定^[13]。

1.4 统计与计算

土壤硝态氮积累量(kg/hm²) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm³) × 土壤硝态氮含量(mg/kg)/10;

氮表观矿化量(kg/hm²) = 不施氮区地上部分吸氮量 + 收获后土壤残留矿质氮量 - 播前土壤起始矿质氮量;

氮的表观损失量(kg/hm²) = (施氮量 + 播前土壤起始矿质氮量 + 氮表观矿化量) - (施氮区地上部分吸氮量 + 收获后土壤残留矿质氮量);

氮素土壤剖面损失量(kg/hm²) = 播前土壤起始矿质氮量 - 收获后土壤残留矿质氮量;

氮收获指数(NHI,%) = (块茎吸氮量/植株总吸氮量) × 100;

氮素吸收利用率(NRE,%) = (施氮区地上部吸氮量 - 空白区地上部吸氮量)/施氮量 × 100;

氮素偏生产力(NPFP, kg/kg) = 施氮区块茎产量/施氮量;

氮素农学利用率(NAE, kg/kg) = (施氮区块茎产量 - 空白区块茎产量)/施氮量;

氮素生理利用率(NPE, kg/kg) = (施氮区块茎产量 - 不施氮区块茎产量)/(施氮区地上部分吸氮量 - 不施氮区地上部分吸氮量)。

试验数据用 Excel 2003 和 SPSS 15.0 软件进行处理和统计分析,LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对马铃薯块茎产量及氮素吸收利用的影响

由表 3 可知,随着施氮量的增加马铃薯块茎产量呈现先增加后降低的趋势,施氮处理的块茎产量显著高于不施氮处理,施氮量为 180 kg/hm² 时块茎产量最高。此外,收获期施氮处理的马铃薯块茎的

吸氮量显著高于不施氮处理,且随着施氮量的增加呈增加趋势,但当施氮量超过 180 kg/hm² 时,处理间块茎吸氮量无显著差异。

氮收获指数(NHI)表示氮素向块茎转移的效率,从表 3 看出,滴灌条件下的马铃薯 NHI 变化范围在 48.47%~52.98%,且随着施氮量的增加而增加;N270、N360 与 N0 处理存在显著差异,当施氮量超过 180 kg/hm² 时,施氮处理 NHI 差异不显著。

表 3 施氮量对马铃薯块茎产量及氮素利用效率的影响
Table 3 Effects of nitrogen supply levels on tuber yield and nitrogen use efficiencies of potato

处理 Treatment	块茎产量 Tuber yield (kg/hm ²)	块茎吸氮量 Tuber N absorption (kg/hm ²)	氮收获 指数 NHI (%)	氮素吸收 利用率 NRE (%)	氮素偏 生产力 NPFP (kg/kg)	氮素农学 利用率 NAE (kg/kg)	氮素生理 利用率 NPE (kg/kg)
N0	36410 c	126.66 c	48.47 b				
N90	42535 ab	166.76 b	49.16 b	67.97 a	472.61 a	68.06 a	154.92 a
N180	44416 a	202.00 a	50.54 ab	51.06 ab	246.76 b	44.48 b	96.59 b
N270	41678 b	209.28 a	52.98 a	49.77 ab	154.36 c	23.51 c	43.19 c
N360	41132 b	218.97 a	52.65 a	40.30 b	114.26 d	15.12 d	36.00 c

注(Note): NHI—Nitrogen harvest index; NRE—Nitrogen recovery efficiency; NPFP—Nitrogen partial factor productivity; NAE—Nitrogen agronomic efficiency; NPE—Nitrogen physiological efficiency. 同一列数值后的不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters within each column are significant between different treatments at $P < 0.05$ level.

马铃薯的氮素吸收利用效率(NRE)随着施氮量的增加呈现降低的趋势。N90 处理的 NRE 值最大,为 67.97%,其与 N360 处理差异显著,表明在低施氮量条件下,肥料氮能被马铃薯充分吸收利用,而在高施氮量的条件下,供应的氮肥超出马铃薯生长所需,不能被充分吸收利用,造成马铃薯 NRE 降低。

由表 3 还可以看出,马铃薯的氮肥偏生产力(NPEP)和氮素农学利用效率(NAE)均随着施氮量的增加而显著降低,且均以 N90 处理最大,分别为 472.61 kg/kg 和 68.06 kg/kg。

马铃薯的氮素生理利用效率(NPE)指因施氮增加的吸氮量转化为产量的效率。表 3 显示,马铃薯 NPE 以 N90 处理最高,为 154.92 kg/kg,且随着施氮量的增加呈现显著降低的趋势,但当施氮量超过 270 kg/hm² 时,马铃薯 NPE 差异不显著。

2.2 马铃薯生育期施氮量对不同土层硝态氮含量和积累量的影响

由图 2 可以看出,各处理 0—20、20—40、40—60、60—80 cm 土层中的 NO₃⁻-N 含量基本呈现随着

施氮量的增加而增加的趋势,且随着生育进程的推进,均表现为先降低后趋于稳定的趋势。生育期前期,各处理不同土层中 NO₃⁻-N 含量差异表现为 0—20 cm > 20—40 cm > 40—60 cm > 60—80 cm。随着生育进程的推进,不同土层中各处理 NO₃⁻-N 含量差异逐渐减小,0—20 cm、20—40 cm 土层在播后 100 天左右,40—60 cm、60—80 cm 土层在播后 80 d 左右趋于稳定。此外,当施氮量超过 270 kg/hm² 时,从播种到播后 60 d 左右,40—60 cm 土层中的 NO₃⁻-N 含量上升,之后迅速下降;播后 60—80 d 左右,0—20 cm 土壤 NO₃⁻-N 含量稳定,之后迅速降低。

由图 3 可知,在马铃薯收获期,不同土层深度硝态氮积累量均为 N0 处理最低。在 0—40 cm 土层中,各处理的土壤硝态氮积累量存在显著差异,处理 N90、N180、N270、N360 比 N0 处理增加了 42.37%、87.74%、121.93% 和 175.72%。在 40—80 cm 和 80—120 cm 土层中,N90 处理的硝态氮积累量与 N0 处理均无显著差异,处理 N180、N270、N360 的土壤

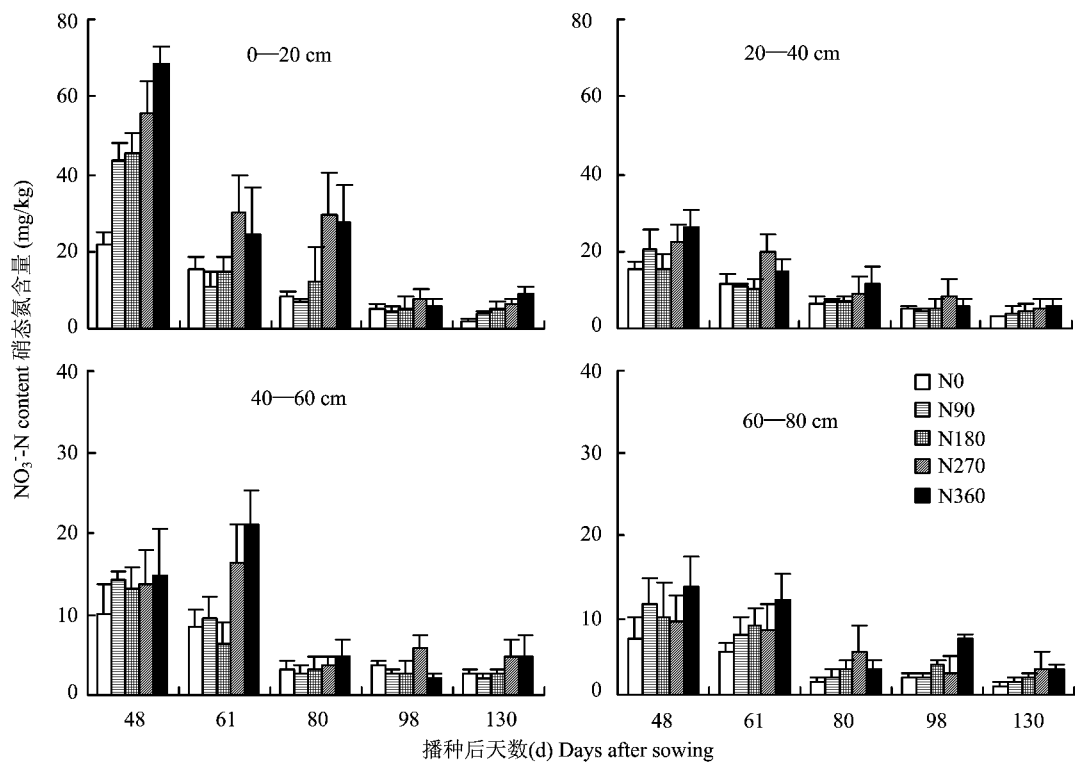
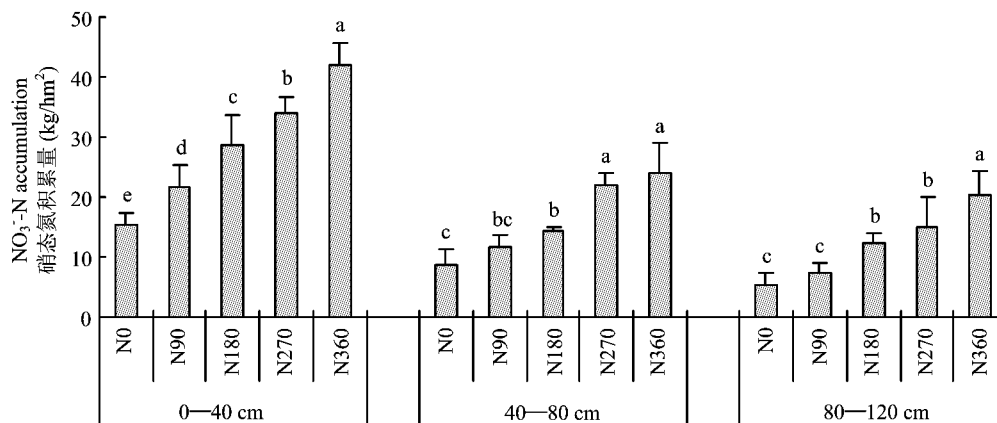


图2 马铃薯生育期间不同土层深度土壤硝态氮含量的变化

Fig. 2 Dynamics of NO_3^- -N contents in different soil depths during the growing season of potato图3 不同施氮水平下不同土层 NO_3^- -N 积累量Fig. 3 NO_3^- -N accumulation in different soil depths under different nitrogen fertilizer application rates

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一土层深度下不同施氮处理差异显著性 ($P < 0.05$) Different letters above the bars of different soil depth groups mean significant between different N application rates at the $P < 0.05$ level.]

硝态氮积累量显著高于 N0 处理, 分别增加了 66.02%、155.33%、179.01% 和 124.76%、179.34%、276.98%。此外, 马铃薯收获期, 相同施氮水平下 0—40 cm 土层硝态氮积累量占 0—120 cm 土层硝态氮积累总量的比例最大, 处理 N0、N90、N180、N270、N360 所占比例分别为 52.14%、

53.17%、52.01%、47.74% 和 48.67%。

2.3 不同施氮量对土壤氮素平衡的影响

由于半干旱石灰性土壤中的无机氮主要以 NO_3^- -N 形式存在^[14], 根据氮输入、输出平衡原理^[15], 在氮素平衡计算过程中, 土壤残留无机氮以 NO_3^- -N 含量作为计算依据。考虑到马铃薯根系对

土壤氮的有效利用范围,将土壤无机氮测定的土层定为 0—120 cm 深度。

从马铃薯整个生育季总的氮素平衡结果(表 4)可以看出,在氮素的总输入项中,施氮量、播前 NO₃⁻-N 积累量和生育期内的氮素矿化量都起到很重要的作用,总输入量随施氮量的增加而显著增加。虽然播前 NO₃⁻-N 积累量和生育期内的氮素矿化量占总输入量的比例随施氮量的增加而下降,但在不施氮区,二者之和超过了马铃薯的吸氮量。

在氮素的输出项中,马铃薯吸氮量、土壤 NO₃⁻-N 残留量、表观损失氮量均随总氮输入量的增加而显著增加。将马铃薯吸氮量(y_1)、NO₃⁻-N 残留量(y_2)、氮素表观损失量(y_3)与总氮输入量(x)进

行回归分析,得到的回归方程分别为: $y_1 = 0.3793x + 94.557 (R^2 = 0.9741^{**})$ 、 $y_2 = 0.4599x - 92.238 (R^2 = 0.9862^{**})$ 、 $y_3 = 0.1608x - 2.3226 (R^2 = 0.9964^{**})$,即在每增加 1 kg 的纯氮中,马铃薯吸氮量占 37.93%,NO₃⁻-N 残留量占 45.99%,氮素表观损失量占 16.08%。

方差分析结果表明,各处理间的马铃薯吸氮量、NO₃⁻-N 残留量、氮素表观损失量差异显著,但当施氮量超过 270 kg/hm² 时,各处理间马铃薯吸氮量不再显著,说明过量施氮不能继续增加马铃薯吸氮量,但土壤氮的损失却显著增加。此外,不施氮(N0)处理土壤剖面中硝态氮的损失量最大,随着施氮量的增加,土壤剖面中硝态氮的损失量逐渐减少。

表 4 不同处理马铃薯 0—120 cm 剖面土壤氮素平衡(kg/hm²)
Table 4 Soil N balance of potato under different treatments in 0–120 cm layers

处理 Treat.	氮输入量 N input				氮输出 N output			剖面损失 Profile loss
	施氮量 N rate	起始 NO ₃ ⁻ -N Initial NO ₃ ⁻ -N	矿化氮 Mineral N	总输入 Total input	作物带出 Potato uptake	NO ₃ ⁻ -N 残留 Residual NO ₃ ⁻ -N	表观损失 Apparent loss	
N0	0	148.50	37.76	186.26	156.95 d	29.3 d		119.20
N90	90	148.50	37.76	276.26	199.25 c	40.82 cd	36.18 d	107.68
N180	180	148.50	37.76	366.26	239.65 b	55.15 bc	71.45 c	93.35
N270	270	148.50	37.76	456.26	280.26 a	71.02 ab	104.98 b	77.48
N360	360	148.50	37.76	546.26	291.15 a	86.57 a	168.54 a	61.93

注(Note): 同一列数值后的不同小写字母分别表示处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different small letters within each column are significant between different treatments at $P < 0.05$.

3 讨论

膜下滴灌是内蒙古西部地区马铃薯的增产节水措施^[16]。本研究中,在马铃薯高垄覆膜滴灌栽培下,马铃薯块茎产量随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,且以 N180 处理最高,当施氮量超过 270 kg/hm² 时,马铃薯块茎产量均低于 N90 处理,可见在本试验条件下,施氮量在 90 ~ 180 kg/hm² 时,即可实现较高产量,继续增施氮肥不再提高马铃薯块茎产量。马铃薯施氮处理的块茎吸氮量显著高于不施氮处理,且随着施氮量的增加而增加;当施氮量超过 270 kg/hm² 时,块茎吸氮量不再显著增加,表明施氮能增加块茎的吸氮量,但块茎对氮素的吸收利用也有一定的范围。氮素收获指数(NHI)主要受作物生育后期干物质和氮素转移的影响。本研究

中,马铃薯的 NHI 以 N270 处理最大,为 52.98%,说明在该施肥量下,马铃薯吸收的氮素更多的转移到块茎中。马铃薯的氮素吸收利用率(NRE)、氮素农学利用效率(NAE)、氮素生理利用效率(NPE)均以 N90 处理最高,分别为 67.97%、68.06 kg/kg 和 154.92 kg/kg。氮肥利用率不仅与施氮量、氮肥品种有关,还受到土壤条件、气候条件、作物品种等因素的影响,因此本试验结果只能代表当季高垄覆膜滴灌条件下马铃薯的氮肥利用的特征。

中国北方农田以碱性土壤为主,施入土壤的氮大部分经过硝化作用被氧化成硝态氮,这是作物主要吸收利用的氮素形态^[17-18],且土壤中硝态氮含量与施氮量呈显著的正相关,施氮后土壤残留硝态氮极易被淋洗出根层或通过硝化-反硝化途径损失掉^[19],但 Johnson 和 Raun 认为,只有当硝态氮的供应超过植

物的需求时,才会发生氮的损失和环境污染^[20],即某一地区土壤环境存在一个土壤硝态氮的安全容纳阈值,土壤硝态氮含量虽然随着施氮量的增加而增加,如果没有超过安全阈值应该是安全的^[21]。在作物的生长季节,硝态氮的淋洗损失是氮素损失的主要方式,其损失量主要取决于灌水量和降水量^[22]。本研究中,各土层土壤硝态氮积累量均随施氮量的增加而增加,马铃薯收获期各处理 0—40 cm 土层硝态氮积累量占总硝态氮积累量的比例在 47.74%—53.17% 之间,各处理 80—120 cm 土层硝态氮积累量比播前减少了 6.43—21.44 kg/hm²,说明在本试验条件下,收获期各处理的土壤 NO₃⁻-N 主要积累在 0—40 cm 土层,且 80—120 cm 土层的土壤 NO₃⁻-N 相对于播前同层土壤均有不同程度的减少。

许多研究表明,当施氮量超出一定范围时,氮素表观损失急剧增加^[23-24]。本研究中,氮素平衡计算结果表明,马铃薯生育期土壤供氮量为 186.26 kg/hm²,基本能满足马铃薯吸氮需要,施氮量与马铃薯吸氮量、0—120 cm 土层 NO₃⁻-N 残留量、表观损失氮量呈显著正相关 ($R^2 = 0.9741^{**}$ 、 $R^2 = 0.9862^{**}$ 、 $R^2 = 0.9964^{**}$),可见,增施氮肥能促进马铃薯的氮素吸收,但当施氮量超过 270 kg/hm² 后,马铃薯吸氮量不再增加,而土壤剖面硝态氮积累量、氮素表观损失量则继续增加。

4 结论

1) 施氮量为 180 kg/hm² 时马铃薯块茎产量最高,达 44416 kg/hm²,马铃薯块茎吸氮量和收获指数随着施氮量的增加有增加的趋势;氮素吸收利用率、氮素农学利用率和氮素生理利用率均以 N90 处理最高,分别为 67.97%、68.06 kg/kg 和 154.92 kg/kg。

2) 不同深度土层的 NO₃⁻-N 含量基本呈现随着施氮量的增加而增加的趋势,收获期各处理 0—40 cm 土层硝态氮积累量占 0—120 cm 土层硝态氮积累总量的 47.74%—53.17%。

3) 施氮量与马铃薯吸氮量、硝态氮残留量、表观损失氮量呈显著正相关,且马铃薯吸氮量、土壤 NO₃⁻-N 残留量和氮素表观损失量分别占增加纯氮的 37.93%、45.99% 和 16.08%。

综上所述,在内蒙古阴山北麓马铃薯主产区,采用高垄覆膜滴灌技术进行栽培,施氮量控制在 90—180 kg/hm²,可实现高产和提高氮肥利用率的目的,且减少环境污染的风险。

参考文献:

- [1] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
Chen X P, Zhang F S *et al.* The Theory at practice of integrated nutrient management in wheat-maize rotation system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [2] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater applied to maize grown on a calcareous fluvio-aquic soil in north China[J]. *Pedosphere*, 1996, 2: 171-178.
- [3] Keeney D R. Sources of nitrate to groundwater[A]. Follett R F. Nitrogen management and groundwater protection. Developments in agricultural and managed-forest ecology 21 [C]. New York: Elsevier, 1989. 23-34.
- [4] 黄明蔚, 刘敏, 陆敏, 等. 稻麦轮作农田系统中氮素渗漏流失的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 629-636.
Huang M W, Liu M, Lu M *et al.* Study on the nitrogen leaching in the paddy-wheat rotation agroecosystem [J]. *Acta Environ. Sci.*, 2007, 27(4): 629-636.
- [5] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 270-277.
Zhang S L, Tong Y A, Liang D L *et al.* Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2004, 41(2): 270-277.
- [6] Janat M. Efficiency of nitrogen fertilizer for potato under fertigation utilizing a nitrogen tracer technique[J]. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2007, 38(17): 2401-2422.
- [7] 张朝春, 江荣风, 张福锁, 王兴仁. 氮磷钾肥对马铃薯营养状况及块茎产量的影响[J]. 土壤肥料科学, 2005, 21(9): 279-283.
Zhang C C, Jiang R F, Zhang F S, Wang X R. Effect of different N, P₂O₅, K₂O fertilization rate and ratio on nutrient status and tuber yield of potato[J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2005, 21(9): 279-283.
- [8] 邓兰生, 林翠兰, 龚林, 等. 滴灌施用不同氮肥对马铃薯生长的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 142-144.
Deng L S, Lin C L, Gong L *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers on growth of potato under drip fertigation[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2011, 42(2): 142-144.
- [9] 段玉, 妥德宝, 赵沛义, 等. 马铃薯施肥肥效及养分利用率的研究[J]. 中国马铃薯, 2008, 22(4): 197-200.
Duan Y, Tuo D B, Zhao P Y *et al.* Effect of fertilizer and nutrient use efficiency on potato in Inner Mongolia[J]. *Chin. Pot. J.*, 2008, 22(4): 197-200.
- [10] 周娜娜, 张学军, 秦亚兵, 等. 不同滴灌量和施氮量对马铃薯产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2004, (6): 11-12, 16.
Zhou N N, Zhang X J, Qin Y B *et al.* Effect on different quantities of drip irrigation and nitrogen fertilization for yield and quality of potato[J]. *Soils Fert.*, 2004, (6): 11-12, 16.
- [11] 王凤新, 康跃虎, 刘士平. 滴灌与沟灌马铃薯覆膜效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 99-102.
Wang F X, Kang Y H, Liu S P. Plastic mulching effects on

- potato under drip irrigation and furrow irrigation[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2003, 11(4): 99-102.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Analyses for soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [13] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122-1128. Liu X J, Zhao Z J, Ju X T *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(7): 1122-1128.
- [14] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815-822. Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.
- [15] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458-462. Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(3): 458-462.
- [16] 王玉明, 张子义, 樊明寿. 马铃薯膜下滴灌节水及生产效率的初步研究[J]. 中国马铃薯, 2009, 23(3): 148-151. Wang Y M, Zhang Z Y, Fan M S. Water use efficiency and water production efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) with under-mulch drip irrigation[J]. Chin. Pot. J., 2009, 23(3): 148-151.
- [17] Harmsen K. Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture [J]. Fert. Res., 1984, 5: 371-382.
- [18] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2002, 63: 117-127.
- [19] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622-627. Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(5): 622-627.
- [20] Johnson G V, Raun W R. Nitrate leaching in continuous winter wheat: use of a soil-plant buffering concept to account to fertilizer nitrogen[J]. J. Prod. Agric., 1995, 8: 486-491.
- [21] 丁伟民, 杜熊, 刘梦星, 等. 氮素运筹对夏玉米产量形成与氮素利用效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1100-1107. Ding W M, Du X, Liu M X *et al.* Effects of nitrogen management modes on yield formation and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1100-1107.
- [22] Andraski T W, Bandy L G, Brye K B. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrogen leaching[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29(4): 1095-1103.
- [23] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报 2010, 16(6): 1358-1365. Li L, Hong J P, Wang H T *et al.* Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1358-1365.
- [24] 崔振岭, 石立委, 徐久飞, 等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的影响研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075. Cui Z L, Shi L W, Xu J F *et al.* Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2071-2075.