



doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24142

聚氨酯包膜尿素对马铃薯生理特性及根际土壤无机氮的影响

薛慧玲¹, 曹 兵², 高如霞¹, 王 东¹, 魏 红³, 樊明寿⁴, 张子义^{1*}

(1. 内蒙古农业大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010011; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097; 3. 武川县农牧技术推广中心, 内蒙古 呼和浩特 011700; 4. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要: 近年来, 随着农业发展方式从资源消耗型向绿色生态型的转变, 发展绿色新型肥料成为一种趋势。探究新型肥料聚氨酯包膜尿素对马铃薯生理特性及根际土壤无机氮含量的影响, 为新型控释氮肥在马铃薯种植的合理施用提供依据。采用盆栽试验, 设置 4 个处理, 分别为不施氮 (U0)、普通尿素常规施氮处理 (N 0.1 g/kg 土, U1)、普通尿素高氮处理 (N 0.3 g/kg 土, U2) 和聚氨酯包膜尿素处理 (N 0.1 g/kg 土, CRF)。结果表明, 施氮显著增加了马铃薯产量, 其中 CRF 处理增产优势明显。第 20 d 时, U1 和 CRF 处理增加了马铃薯根、茎、叶、块茎生物量; 第 40 d 时, 施氮处理比不施氮处理显著提高马铃薯的生物量, 但施氮处理间差异不显著; 第 60 d 时, CRF 处理不同程度增加了块茎生物量、叶片 SPAD 值、叶片的净光合速率和根系活力。与 U1 和 U2 处理相比, CRF 处理促进了马铃薯氮素积累, 增加了中后期根际土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量, 而显著降低前期硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量。相关分析发现: 马铃薯产量与 40 d 的根生物量和 60 d 的叶片和块茎生物量、SPAD 值、总根长和氮素积累量呈极显著正相关; 聚氨酯包膜尿素通过增加根际 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量而显著提高了 40 d 马铃薯根生物量和 60 d 茎生物量, 通过增加根际 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量提高了 60 d 的块茎生物量、氮素积累量和 SPAD 值。

关键词: 马铃薯; 聚氨酯包膜尿素; 生理特性; 根际土壤; 氮养分

马铃薯是非谷物作物中重要的粮食作物之一, 其生产对确保全球粮食安全至关重要, 将占未来食品增量的 50%, 同时也是我国重要的粮、菜、饲兼用作物。随着我国种植结构调整及加工业的兴起, 马铃薯的栽培面积逐年上升。但与发达国家相比, 我国马铃薯单产水平较低, 当前为了追求高产, 生产中常超量施用化肥, 尤其是氮肥^[1-3]。氮肥的高投入使得土壤中冗余的氮素以径流、淋溶、气态损失等途径进入环境, 造成地表水富营养化、地下水硝酸盐含量超标、雾霾和温室气体增多等环境污染问题, 也会造成作物氮肥利用率低和品质下降等一系列生产问题^[4-5], 导致我国部分地区农田当季作物的氮素吸收利用率为 30% ~ 35%, 远低于发达国家 50% ~ 60% 的氮肥利用率。另外, 氮肥长期过量施用还会导致土壤养分失衡、板结、酸化和盐渍

化, 影响土壤生态健康, 甚至会导致作物减产^[6-7]。因此, 合理氮肥管理是提高粮食产量、减少环境污染风险、节约氮肥的必要途径^[8]。

随着低碳生态农业的发展, 亟待解决提高氮肥利用率及减少氮肥对生态环境的负面影响等问题, 因此, 包膜缓控释肥等新型肥料得到研发和应用, 为了解决部分包膜材料的缺陷, 聚氨酯包膜控释肥料应运而生, 并显著改善了缓控释肥的产品质量^[9-10]。聚氨酯包膜尿素是一种新型环境友好型控释氮肥, 其包膜材料具有隔水性能较好、受土壤条件影响小、膜材可降解等优点^[11-12], 通过控制养分释放速度, 减缓肥料的有效养分释放速率, 使其供肥模式和供给速率可以与植物需肥规律相契合, 因此受到广泛推广和应用^[13-14]。大量研究表明, 聚氨酯包膜尿素在作物增产、提高氮素利用效率和减少氮素损失方面起到积极作用, 近年来, 在大田玉米、水稻种植得到广泛应用^[15]。在作物种植过程中, 也有学者进行了聚氨酯包膜尿素施用效果的评价研究, 它可通过改变土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量来增加冬小麦的产量^[16]; 梁红胜等^[17]研究发现, 聚氨酯包膜尿素通过调控光合

收稿日期: 2024-03-20; 录用日期: 2024-04-21

基金项目: 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目 (2021GG0079); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目 (2022YFHH0130)。

作者简介: 薛慧玲 (1996-), 硕士研究生, 主要从事植物逆境适应与遗传改良方面的研究。E-mail: 3246717383@qq.com。

通讯作者: 张子义, E-mail: zzybiology@126.com。



作用和氮代谢等来影响番茄的产量和品质；王小军等^[18]研究发现，聚氨酯包膜尿素通过提高油菜地上部角果皮、籽粒和茎秆中的氮素积累来提高油菜作物的产量和品质；聚氨酯包膜尿素施加促进了水稻根系生长，进而促进水稻增产^[19]；聚氨酯包膜尿素对马铃薯有较好的增产效果，并能较明显的改善其品质，提高氮肥利用效率^[20]。当前，有关包膜尿素对马铃薯的研究主要聚焦在其产量、品质和环境效应方面，但关于聚氨酯包膜尿素对不同生育期马铃薯生理特性等方面的影响研究较少，因此需要对其进行深入探究。

本研究以马铃薯为对象，研究合理施氮水平下，聚氨酯包膜尿素对马铃薯苗期生理特性及根际土壤无机氮含量的影响，以探索聚氨酯包膜尿素对马铃薯稳产、提升氮肥利用率的作用机理，为新型控释氮肥在马铃薯生产中的合理施用提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种：马铃薯品种“费乌瑞它”，购于内蒙古正丰马铃薯种业股份有限公司。

供试肥料：尿素（N 46%）、磷酸二氢钾（ P_2O_5 52%， K_2O 34%）、硫酸钾（ K_2O 52%），购自武川县城关农业生产资料有限责任公司；聚氨酯包膜尿素（N 44%）控释期是 60 d，由北京市农林科学院提供。

供试土壤：试验所用土壤取自内蒙古武川县农田，土壤类型为栗钙土，砂壤土质地，除去秸秆杂物、晾干、混匀后装盆备用。 NO_3^- -N 1.74 mg/kg、 NH_4^+ -N 0.32 mg/kg、有效磷 1.00 mg/kg、速效钾 70.00 mg/kg、pH 值 8.80。

1.2 试验设计

试验在内蒙古农业大学植物养分生理研究室温室进行。使用规格一致的塑料桶（口径 18.5 cm，底部直径 15.0 cm，高 16.5 cm），桶内装入 4.0 kg 土壤，桶外围用锡箔纸包裹遮光。

试验共设 4 个处理：不施氮对照（U0），普通尿素常规施氮处理（N 0.1 g/kg 土，U1），普通尿素高氮处理（N 0.3 g/kg 土，U2），聚氨酯包膜尿素处理（N 0.1 g/kg 土，CRF）。试验各处理统一都施磷肥（ P_2O_5 0.455 g/kg 土）、钾肥（ K_2O 0.443 g/kg 土）。各处理生长期间每隔 2 d 浇 1 次水，每次浇

水 200 mL。出苗前无补光，出苗后每天 14 h 光照（光照强度 9000 lx）/10 h 黑暗条件下培养。每个处理 64 盆植株，每盆定植 2 株，3 个重复，随机排列。分别于马铃薯出苗后 20 d（苗期）、40 d（块茎形成期）和 60 d（块茎膨大期）3 个时期测定马铃薯植株和根际土壤相应指标，随机将植株从土壤中取出，洗净后分成地上部和地下部。地下部用蒸馏水浸泡用于扫描根系和根系活力的测定，将扫描完的根系用吸水纸吸干水分与茎、叶、块茎一起测定植株鲜重和植株氮素积累量；土壤样品的采集方式为“抖落法”^[21]，全程均戴无菌手套进行。首先剥离距基质表层 5 cm 左右的疏松土壤，然后整株拔起马铃薯植株，对附着在根系的土壤取样。搅拌均匀充分后进行过筛处理，过筛后的土样平均分成 3 份，测定 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量。于第 80 d 收获。

1.3 测定方法

用美国 LI-6400 便携式光合仪于马铃薯全部出苗后于 20、40、60 d 上午 9:00—11:00 测定光合指标，选择完全展开的新叶片测定净光合速率、蒸腾速率、胞间二氧化碳和气孔导度；使用 SPAD-502（Konica Minolta）手持式叶绿素仪测定马铃薯 SPAD 值^[22]。马铃薯全部出苗后进行采样。

每处理取 10 盆马铃薯进行产量测定。

马铃薯根、茎、叶和块茎生物量的测定采用烘干法^[23]。样品烘干后粉碎，采用凯氏定氮法测定根、茎、叶和块茎的含氮量^[24]，计算氮素积累量。

各器官氮素积累量（g/株）= 含氮量 × 干物质质量。

马铃薯根系利用 HP Scanjet 8200 扫描仪扫描，根系分析软件（XLRhizo Manual 2015 22 june）进行分析，测定指标为马铃薯总根长、总根表面积、平均直径、总根体积和根尖数；采用 TTC 法测定马铃薯根系活力^[25]。

用 AA3 型连续流动分析仪（FIAstax5000）测定土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的含量^[26]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理，基于 SPSS 22.0，运用单因素方差分析，对不同处理的土壤无机氮含量、马铃薯产量、生物量、叶绿素、光合作用等指标进行方差分析。数据均为平均数 ± 标准差；采用 Origin 8.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对马铃薯生物量的影响

随着生长时间的增加,各处理的马铃薯根、茎、叶、块茎生物量均呈逐渐上升的趋势(图1)。在第20 d时,CRF和U1处理的根、块茎生物量显著高于U0和U2处理,U2处理的块茎生物量显著高于U0处理;U1处理的茎生物量显著高于U0和U2处理;CRF处理的叶生物量显著高于U0和U2处理;U1和CRF处理的块茎显著高于U0和U2处理,U2处理的块茎生物量显著高于U0处理。在第40 d时,U1、U2、CRF处理的根、茎、叶、块茎生物量均显著高于U0处理,施氮处理间差异不显著。在第60 d时,U2处理的根生物量显著高于U1、U0和CRF处理;U1处理显著高于U0和CRF

处理;U1处理的茎、叶生物量显著高于U0处理;CRF处理的块茎生物量显著高于U0、U1和U2处理;U1、U2处理块茎生物量显著高于U0处理。

综上所述,马铃薯根、茎、叶、块茎生物量受马铃薯生育期和施氮的影响。在马铃薯苗期(20 d)的前期施用适量氮肥(U1和CRF)可以增加马铃薯生物量,而在苗期的后期,CRF增加了块茎生物量,U2处理增加了根生物量。

2.2 不同处理对马铃薯叶片 SPAD 值的影响

各处理马铃薯叶片 SPAD 值随着生育期的推进整体呈下降趋势(图2)。在第20 d时,U2处理 SPAD 值显著高于U0、U1处理,表明较高浓度的氮肥有利于苗期叶绿素的积累。在第40 d时,各施氮肥处理均显著高于U0,而施氮肥处理间无显著性差异,表明施氮有利于马铃薯幼苗叶绿素的积

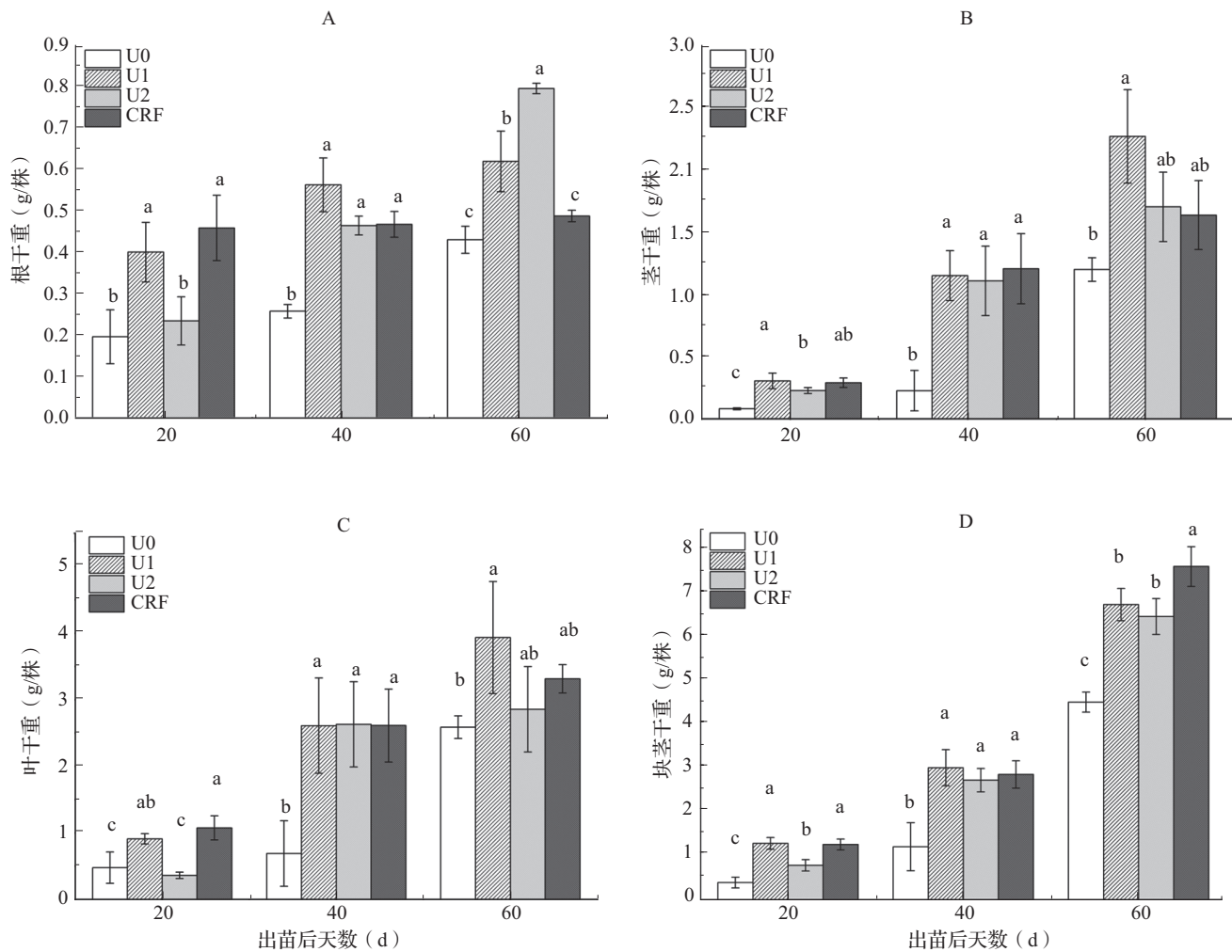


图1 不同处理的马铃薯生物量

注: 马铃薯出苗后 20、40、60 d 分别对应苗期、块茎形成期、块茎膨大期。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。



累。在第 60 d 时, CRF 处理的 SPAD 值显著高于 U1 处理。表明在施氮量相同的条件下, 施用控释氮肥可显著提高马铃薯生长中后期叶片 SPAD 值, 说明控释氮肥有利于马铃薯生育氮素的持续供应。

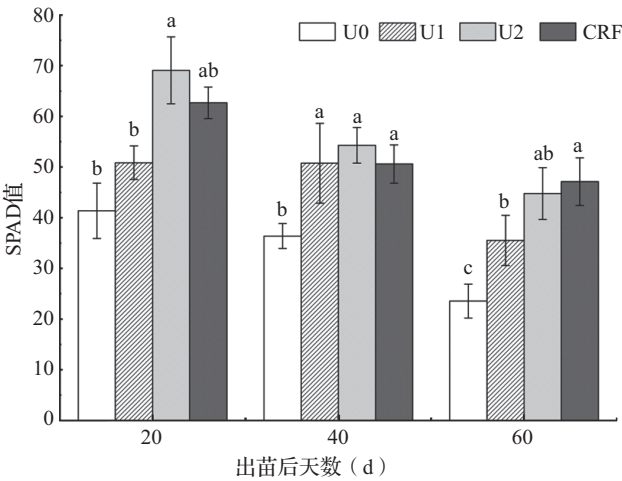


图 2 不同处理的马铃薯叶片 SPAD 值

2.3 不同处理对马铃薯叶片光合特性的影响

不同处理间的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度呈先上升后下降的趋势, 而胞间二氧化碳浓度则呈先下降后上升的趋势 (表 1)。在第 20 d 时, 施肥增加了马铃薯叶片净光合速率、蒸腾速率和气

孔导度, 其中 U2、CRF 处理的气孔导度显著高于 U0 和 U1 处理, CRF 处理的蒸腾速率和气孔导度均高于 U1 处理; 在第 40 d 时, CRF 处理的净光合速率、胞间二氧化碳浓度显著高于 U1 处理; 在第 60 d 时, CRF 处理的净光合速率显著高于 U2 处理, 胞间二氧化碳浓度显著高于 U1 和 U0 处理, U1 处理的胞间二氧化碳浓度最低, 而气孔导度最高。对比 U1 和 CRF 处理发现, 在施氮量相同的条件下, 控释氮肥可显著提高第 40 和 60 d 时马铃薯叶片的胞间二氧化碳浓度。

2.4 不同氮肥处理对马铃薯植株根系生理特征的影响

2.4.1 不同氮肥处理对马铃薯植株根系活力的影响

在第 20 d, U1 处理的马铃薯根系活力显著高于 CRF 处理; 在第 40 d 时, 马铃薯根系活力整体呈现 CRF>U2>U0>U1 的趋势, 其中 U2 和 CRF 处理显著高于 U1 处理; 在第 60 d 时, U1 处理的植株根系活力显著小于 U0、U2 和 CRF 处理。CRF 处理下, 植株根系活力呈先上升后下降的趋势, 且在马铃薯苗期的中后期根系活力均高于等氮量的 U1 处理 (图 3)。说明控释氮肥能够更好地促进马铃薯植株在生育中后期的根系活力, 促进植株的氮素吸收和利用。

表 1 不同处理的马铃薯光合特性

出苗后天数 (d)	处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间二氧化碳浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	气孔导度 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
20	U0	0.29b	0.38b	199.67a	0.02b
	U1	0.73ab	0.45b	231.25a	0.02b
	U2	1.64a	0.77ab	206.33a	0.05a
	CRF	0.82ab	1.06a	226.00a	0.06a
40	U0	9.95b	2.42a	170.50b	0.19a
	U1	7.48b	1.86b	175.00b	0.07b
	U2	8.38b	2.47a	187.75b	0.15ab
	CRF	12.59a	2.18ab	254.25a	0.12ab
60	U0	6.06ab	0.96b	238.75b	0.06b
	U1	5.33ab	1.36a	226.75b	0.10a
	U2	4.83b	1.04ab	268.00a	0.06b
	CRF	7.16a	1.34a	277.25a	0.07b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

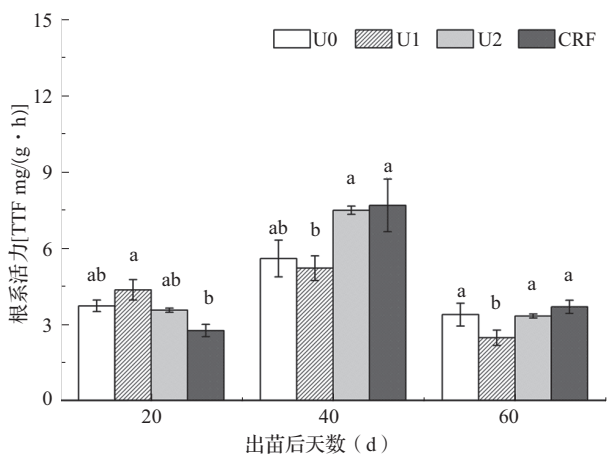


图3 不同处理的马铃薯植株根系活力

2.4.2 不同处理对马铃薯植株根系形态变化的影响

在第20 d时, CRF处理的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数均显著低于U2处理。在第40 d时, U0和CRF处理的平均直径均显著低于U2处理, CRF处理马铃薯根尖数显著高于U0处理。在第60 d时, U1、U2、CRF处理总根表面积、总根体积和根尖数均显著高于U0处理, U2处理马铃薯根系平均直径显著高于U1、CRF处理, CRF处理马铃薯总根长显著高于U0、U2处理(表2)。上述结果说明, 施氮可以促进马铃薯植株的根系生长, 不同施氮处理间根系形态变化规律不明显。

表2 不同处理的马铃薯植株根系形态变化

出苗后天数 (d)	处理	总根长 (cm)	总根表面积 (cm ²)	平均直径 (mm)	总根体积 (cm ³)	根尖数 (条)
20	U0	1216.73a	171.45ab	0.44a	1.93ab	2954.33ab
	U1	1116.71a	165.63ab	0.47a	1.95ab	3092.00ab
	U2	1435.19a	224.29a	0.49a	2.80a	4092.75a
	CRF	571.05b	88.86b	0.51a	1.11b	2144.00b
40	U0	1220.26a	159.46a	0.42bc	1.67a	1589.66b
	U1	1809.79a	278.35a	0.47ab	3.42a	1873.00ab
	U2	2874.37a	304.41a	0.51a	3.95a	2269.33ab
	CRF	2126.50a	246.08a	0.36c	2.22a	2662.00a
60	U0	862.45c	125.71b	0.46ab	1.46b	2107.33b
	U1	1989.51ab	261.34a	0.41b	2.73a	3479.33a
	U2	1435.96bc	226.40a	0.50a	2.84a	3247.66a
	CRF	2094.14a	275.75a	0.42b	2.89a	3548.33a

2.5 不同处理对根际土壤中硝态氮、铵态氮含量的影响

土壤中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量随马铃薯生长发育呈下降趋势。在第20和40 d时, CRF处理根际土壤NO₃⁻-N含量分别较U0处理提高24.62%和显著提高34.07%; CRF处理NO₃⁻-N含量较U1和U2处理分别显著低了73.98%和32.19%、92.85%和46.01%。在第60 d时, 4个处理间土壤NO₃⁻-N含量无显著差异变化(图4)。

CRF处理NH₄⁺-N含量总体呈逐步下降的趋势, 在第40和60 d时, CRF处理根际土壤NH₄⁺-N含量较U1、U2处理分别显著增加了56.91%和28.65%、67.17%和49.44%(图4)。这是由于CRF处理在一定程度上延缓了NH₄⁺-N向NO₃⁻-N的转化, 可以提

高中期马铃薯土壤耕层NH₄⁺-N含量。在第60 d时, CRF处理土壤中NH₄⁺-N含量显著高于U1和U2处理(图4), 由此, 控释氮肥通过调控氮素高效释放, 为马铃薯中后期生长提供充足的NH₄⁺-N。

2.6 不同处理对马铃薯植株氮素积累量的影响

各处理的马铃薯植株氮素积累量均随着生育期的推进而逐渐增加, 且施氮显著增加了马铃薯植株氮素的积累(图5)。第20 d时, U1和CRF处理氮素积累显著高于U0和U2处理; 第40 d时, U1和CRF处理氮素积累显著高于U0和U2处理, U2处理显著高于U0处理, 第60 d时, U1、U2和CRF处理显著高于U0处理, 在整个生育期内, CRF处理下的植株氮素积累量最高, 在等氮条件下, 施用CRF比施用普通尿素更能提高马铃薯氮素积累量。

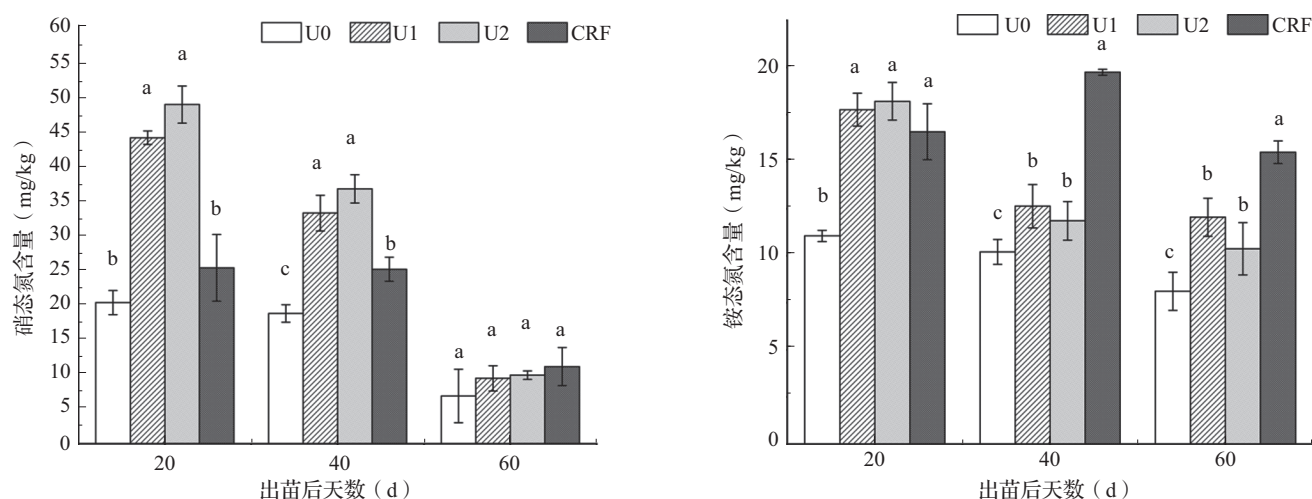


图4 不同处理对土壤中硝态氮、铵态氮含量的影响

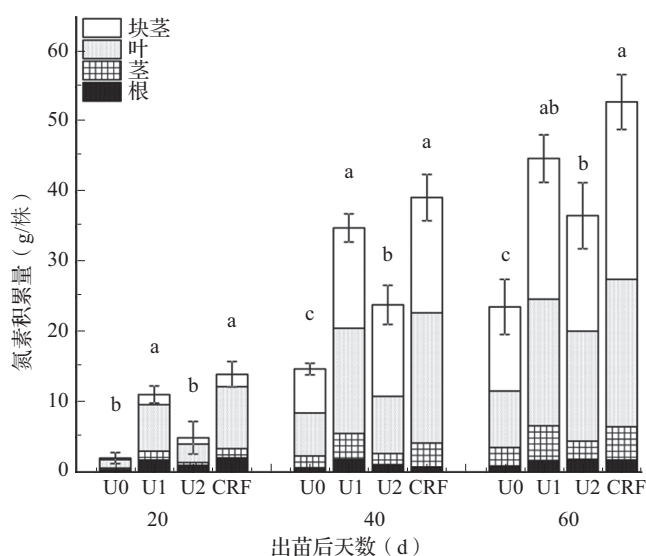


图5 不同处理的马铃薯氮素积累量

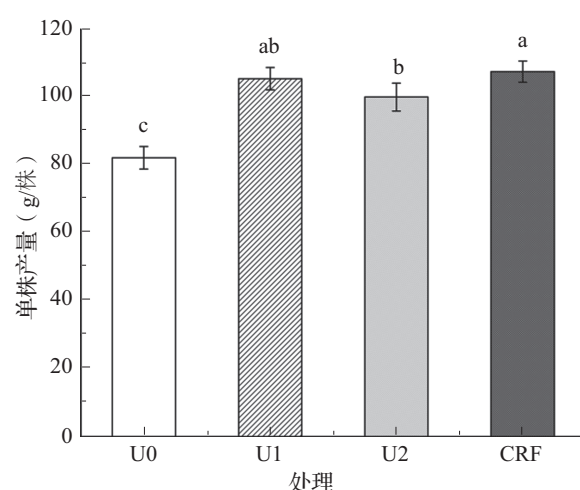


图6 不同处理的马铃薯产量

2.7 不同处理对马铃薯产量的影响

与U0处理相比,施氮显著增加了马铃薯产量(图6),U1、U2和CRF处理比U0处理分别增产28.36%、21.78%、30.91%;与U2处理相比,U1和CRF处理马铃薯产量分别增加5.40%和7.50%,其中CRF处理达显著水平,且高氮处理不利于马铃薯增产。

2.8 影响马铃薯产量的相关性分析

马铃薯产量与根生物量、叶生物量、块茎生物量、SPAD值、总根长和氮素积累量呈极显著正相关($P < 0.01$),马铃薯产量与茎生物量、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量呈显著正相关。根生物量与茎生物量、叶生物量、块茎生物量、氮素积累量和 NO_3^- -N含量呈极显著正相关($P < 0.01$);根生物量与茎生物

量呈显著正相关;茎生物量与叶生物量、块茎生物量、总根长和 NO_3^- -N含量呈显著正相关;叶生物量与总根长呈极显著正相关($P < 0.01$);叶生物量与块茎生物量和氮素积累量呈显著正相关;块茎生物量与SPAD值、总根长、氮素积累量和 NH_4^+ -N含量呈极显著正相关($P < 0.01$);SPAD值与根系活力、总根长、氮素积累量和 NH_4^+ -N含量呈显著正相关;总根长与 NH_4^+ -N含量呈显著正相关;氮素积累量与 NH_4^+ -N含量呈极显著正相关($P < 0.01$)(图7)。这表明40 d根生物量、60 d茎、叶、块茎生物量、SPAD值、总根长、氮素积累量和 NH_4^+ -N含量的相互关联共同参与马铃薯产量的调控作用。CRF通过增加根际 NH_4^+ -N含量而提高了40 d的根生物量和60 d的茎生物量,增加根际 NO_3^- -N含量提高了60 d的块茎生物量、氮素积累量和SPAD值。

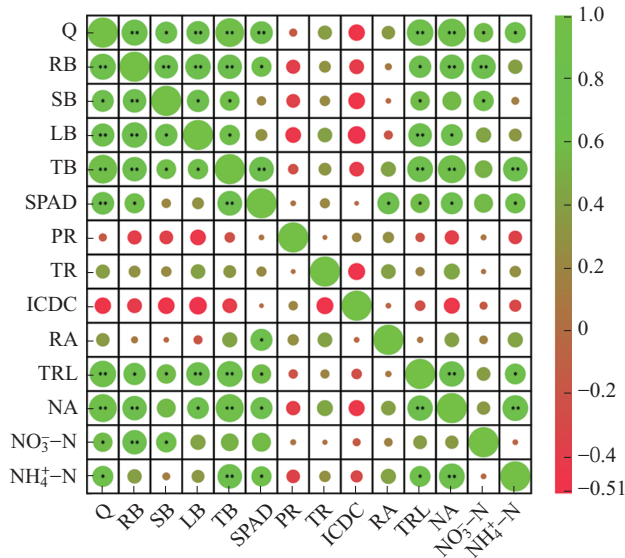


图7 马铃薯产量等生理特性和根际无机氮的相关性

注: * 和 ** 分别代表在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下显著相关; Q 代表产量, RB 代表根生物量, SB 代表茎生物量, LB 代表叶生物量, TB 代表块茎生物量, SPAD 代表 SPAD 值, PR 代表光合速率, TR 代表蒸腾速率, ICDC 代表胞间二氧化碳浓度, RA 代表根系活力, TRL 代表总根长, NA 代表氮素积累量, NO_3^- -N 代表硝态氮含量, NH_4^+ -N 代表铵态氮含量。根生物量和根系活力是 40 d 时的, 其他指标是 60 d 时的。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对马铃薯幼苗生长发育的影响

植株叶绿素含量是衡量叶片衰老和光合功能的重要指标, 其含量与植株生长发育、光合能力以及氮素状况关系密切^[27]。本研究发现, 施氮显著增加马铃薯叶片 SPAD 值, 且在马铃薯生长前期随施氮量的增加而增加, 这与 Li 等^[28]的研究结果相似, 说明施氮能够促进马铃薯叶片叶绿素的合成。但当施氮量达到 U2 处理的量时, 马铃薯叶片 SPAD 值在各个时期并没有显著差异, 这与杨豫龙等^[29]的研究结果相似, 说明过量施氮将不能持续促进马铃薯叶绿素的合成与积累。本研究中, CRF 处理马铃薯生长前中期 SPAD 值与 U1 处理无显著差异, 但增加后期 (60 d) SPAD 值, 这与莫姣娇等^[30]的结果一致。可见, 在合理施氮下, 控释氮肥施用提高了马铃薯生长后期叶绿素含量。由此, 合理施氮肥尤其是施加控释氮肥能通过改善叶片叶绿素含量促进植株生长^[31]。

本研究证实, 随着施氮水平的提高, 马铃薯生长初期叶片的光合作用逐渐增强, 这与德木其格等^[32]的研究结果相似。本研究中, 马铃薯叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均随生育期的推

进呈先升高后降低的趋势, 而马铃薯叶片胞间二氧化碳浓度则随生育期呈先下降后上升的趋势, 这与刘建等^[33]的研究结果相似。控释氮肥作用下的马铃薯叶片净光合速率在第 40 和 60 d 时显著大于普通尿素处理, 说明控释氮肥可以提高马铃薯植株苗期中后期的光合作用, 促进马铃薯植株生长、提升产量。

根系的数量、活性与作物的生长状况和物质的运输等密切相关^[34]。根系发达、根系活力高是保证植株生长发育、氮素吸收利用的重要条件, 根系的作用程度取决于根系数量、生理特性及其空间分布^[35]。本研究关于根系形态的研究显示, 施用适量氮肥促进马铃薯前期的根系活力, 促进植物根系纵向伸长、根系横向伸展, 而过量氮素则促进马铃薯植株前中期根系形态的生长, 抑制后期根系的生长, 同时本研究还发现控释氮肥可以促进马铃薯植株生育后期根系的全面发展, 这与 Li 等^[36]的研究结果相同。结合对植物根系活力的研究, 进一步说明了控释氮肥可以促进后期马铃薯植株根系的生长发育, 从而保证植株充足的氮素吸收, 提高马铃薯的氮素吸收率, 促进马铃薯的生长。

3.2 不同施肥处理对马铃薯根际土壤无机氮的影响

NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 是植物从土壤中吸收氮素的主要形式。当 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 同时同浓度存在于土壤中时, 植物更容易吸收 NH_4^+ -N^[37]。有学者指出, 缓控释尿素可以显著提高玉米生育初中期耕层土壤 NH_4^+ -N 和收获期 NO_3^- -N 的含量^[38]。究其原因, 尿素施入土壤后与土壤中的脲酶直接接触, 迅速水解为 NH_4^+ -N, 而苗期前期, 马铃薯植物和根系需氮量少, 大量 NH_4^+ -N 在土壤中转化为 NO_3^- -N, 导致尿素处理前期 NH_4^+ -N 含量及前中期 NO_3^- -N 含量处于较高水平。而聚氨酯包膜材料具有疏水性, 可以控制膜内尿素缓慢持续释放, 维持土壤中 NH_4^+ -N 的含量在合理水平, 同时阻断包膜内尿素态氮与脲酶的直接接触, 减少了土壤中 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N; 同时控释氮肥前期累积释放率低, 导致土壤 NH_4^+ -N 含量低于尿素处理, 到中后期控释氮肥前期累积释放率高, 也是马铃薯快速生长期, 作物吸氮能力强, 也减少了土壤 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N, 保证土壤中较高的 NH_4^+ -N 含量, 提高了马铃薯中后期的吸氮量^[39]。

3.3 不同施肥处理对马铃薯产量及生物量的影响

适量的尿素可以增加马铃薯幼苗前期的干物质质量, 而过量的尿素则抑制马铃薯幼苗前期干物质质量



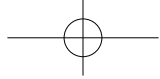
的增加^[40],这与在施氮量相同的情况下,施用控释氮肥与普通尿素对马铃薯幼苗干物质累积量无显著差异,这与李泽碧等^[41]的研究结果相似。结合土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N与马铃薯产量及生理指标的相关性分析结果可知,土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量的变化对马铃薯生理代谢及产量的提高具有重要的影响。控释氮肥通过增加马铃薯中后期根际 NH_4^+ -N含量,调控 NO_3^- -N含量,而提高了叶片SPAD值和光合作用,而提高了块茎生物量、产量及氮素累积量。综上所述,控释氮肥在调控根际 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量、提高马铃薯产量及氮素吸收方面表现均最优。

4 结论

聚氨酯包膜尿素能促进马铃薯根茎叶生物量的积累和马铃薯植株后期的根系生长,显著提高马铃薯苗期中后期的土壤 NH_4^+ -N含量,增加了叶片叶绿素(SPAD值)含量和净光合速率,提高了光合作用,促进了马铃薯植株后期的根系生长和根系活力,提高了马铃薯产量和氮素利用率。

参考文献:

- [1] Koch M, Naumann M, Pawelzik E, et al. The importance of nutrient management for potato production part I: plant nutrition and yield[J]. *Potato Research*, 2020, 63: 97-119.
- [2] Jia L G, Chen Y, Qin Y L, et al. Potato yield gaps across the rainfed Yin-mountain hilly area of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17 (11): 2418-2425.
- [3] Tang J Z, Xiao D P, Wang J, et al. Optimizing water and nitrogen managements for potato production in the agro-pastoral ecotone in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 253 (6): 106945.
- [4] Shen J B, Zhang F S, Siddique K H M. Sustainable resource use in enhancing agricultural development in China[J]. *Engineerin*, 2018, 4 (5): 588-589.
- [5] Shi X R, Hu K L, Batchelor W D, et al. Exploring optimal nitrogen management strategies to mitigate nitrogen losses from paddy soil in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105877.
- [6] Ran C, Gao D P, Liu W Y, et al. Straw and nitrogen amendments improve soil, rice yield, and roots in a saline sodic soil[J]. *Rhizosphere*, 2022, 24: 100606.
- [7] 张福锁. 中国肥料发展研究报告[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [8] Murugan P, Ong S Y, Hashim R, et al. Development and evaluation of controlled release fertilizer using P (3HB-co-3HHx) on oil palm plants (*nursery stage*) and soil microbes[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 28: 101710.
- [9] 陈贵, 鲁晨妮, 石艳平, 等. 不同缓控释肥搭配脲铵对水稻产量、氮素利用效率和土壤养分的影响[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33 (1): 122-130.
- [10] 马海生, 宫锡余, 肖艳, 等. 聚氨酯缓控释肥生产工艺开发[J]. *磷肥与复肥*, 2020, 35 (5): 15-16, 19.
- [11] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29 (2): 201-219.
- [12] 林清火, 刘海林, 黄艳艳, 等. 4种缓控释氮肥的养分释放特征及肥效[J]. *热带作物学报*, 2018, 39 (9): 1718-1723.
- [13] Vejan P, Khadiran T, Abdullah R, et al. Controlled release fertilizer: a review on developments, applications and potential in agriculture[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 339: 321-334.
- [14] Lawencia D, Wong S K, Low D Y S, et al. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release[J]. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2021, 10 (2): 238.
- [15] Pan P, Jiang H M, Zhang J F, et al. Shifts in soil bacterial communities induced by the controlled-release fertilizer coatings[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (12): 2855-2864.
- [16] 巩闪闪, 刘晓静, 张志勇, 等. 不同施氮措施对冬小麦农田土壤酶活性和氮转化的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (11): 2215-2222.
- [17] 梁红胜, 张子义, 王学霞, 等. 控释氮肥与水溶肥配施对设施番茄生理特征的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (5): 70-76.
- [18] 王小军, 张智, 王春丽, 等. 不同新型包膜尿素对油菜产量、品质及氮肥利用率的综合影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (6): 129-137.
- [19] 高捷, 李思宇, 成大宇, 等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展[J]. *作物杂志*, 2022 (3): 20-26.
- [20] Gao X, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil[J]. *Field Crops Research*, 2015, 181: 60-68.
- [21] 陈敬忠, 黄小龙, 刘济明, 等. 影响不同果期米槁主要成分的根际优势微生物群落及其对土壤性质的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (10): 1779-1791.
- [22] Li R, Chen J H, Qin Y L, et al. Possibility of using a SPAD chlorophyll meter to establish a normalized threshold index of nitrogen status in different potato cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42 (8): 834-841.
- [23] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 王博, 刘扣珠, 任天宝, 等. 减氮条件下生物炭对烤烟根系发育及土壤微生物群落的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (3): 45-50.
- [26] 毛红祥, 桂素萍, 肖植特. AA3型连续流动分析仪测定有机肥料全氮含量[J]. *中国土壤与肥料*, 2015 (3): 116-119.



- [27] 孙志伟. 供氮量对烤烟叶片光合特性及光合氮利用效率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [28] Li Y Y, Ming B, Fan P P, et al. Effects of nitrogen application rates on the spatio-temporal variation of leaf SPAD readings on the maize canopy[J]. Journal of Agricultural Science, 2022, 160 (1-2): 32-44.
- [29] 杨豫龙. 不同氮效率玉米品种筛选及其在褐土区氮素吸收利用差异[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
- [30] 莫姣娇, 张丽丽, 薛兵东, 等. 不同缓控释剂对辽东南玉米生长发育及产量影响的研究[J]. 农业科技通讯, 2023 (12): 42-44, 49.
- [31] 李凤娇, 邹小红, 李科, 等. 不同氮浓度对油茶幼苗光合特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42 (6): 1167-1175.
- [32] 德木其格, 刘志萍, 王磊, 等. 不同施氮水平对大麦光合性能及氮素积累和转运的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35 (3): 126-135.
- [33] 刘建, 蒋伟, 贾维嘉, 等. 不同氮素形态对宽叶绿绒蒿幼苗表型及光合荧光的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34 (8): 1608-1615.
- [34] Du M, Zhang W Z, Gao J P, et al. Improvement of root characteristics due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions increases rice (*Oryza sativa* L.) yield and nitrogen use efficiency[J]. Agronomy, 2022, 12 (1): 12010023.
- [35] Tafazoli M, Hojjati S M, Jalilvand H, et al. Effect of nitrogen addition on soil CO₂ efflux and fine root biomass in maple monocultures of the hyrcanian region[J]. Annals of Forest Science, 2021, 78: 29.
- [36] Li R C, Gao Y X, Chen Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105045.
- [37] Yang C Q, Li J N, Zhang G W, et al. Barley straw combined with urea and controlled-release nitrogen fertilizer improves lint yield and nitrogen utilization of field-seeded cotton[J]. Agronomy, 2022, 12 (5): 12051208.
- [38] 武鹏, 王玉凤, 张翼飞, 等. 不同土层深度配施缓释/普通尿素对土壤氮素和酶活性及玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (1): 129-138.
- [39] 宁倩倩. 一次性施肥配方及氮肥减施对土壤氮转化、水稻生长及产量的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [40] 胡仁. 一次性根区集中供氮促进水稻氮素高效利用的作用机制[D]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [41] 李泽碧, 周瑜, 黄娟, 等. 施用控释尿素和普通尿素对不同高粱品种生长及产量的影响[J]. 南方农业, 2023, 17 (17): 141-144, 157.

Regulate of polyurethane coated urea on physiological characteristics and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of potato

XUE Hui-ling¹, CAO Bing², GAO Ru-xia¹, WANG Dong¹, WEI Hong³, FAN Ming-shou⁴, ZHANG Zi-yi^{1*} (1. College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010011; 2. Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097; 3. Wuchuan Agricultural Technology Extension Center, Hohhot Inner Mongolia 011700; 4. College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010019)

Abstract: In recent years, with the transformation of agricultural development mode from resource consumption to green ecology, the development of green new fertilizers has become a trend. In this study, the effects of new fertilizer polyurethane coated urea on the physiological characteristics of potato and the inorganic nitrogen content of rhizosphere soil were explored, so as to provide a basis for the rational application of new controlled-release nitrogen fertilizer in potato planting. Four treatments were set up, including no nitrogen application (U0), conventional nitrogen application treatment (N 0.1 g/kg soil, U1), high nitrogen treatment of common urea (N 0.3 g/kg soil, U2) and polyurethane coated urea (N 0.1 g/kg soil CRF). The results showed that nitrogen application significantly increased potato yield, and CRF treatment had obvious advantages in increasing yield. On the 20th day, U1 and CRF treatments increased the biomass of roots, stems, leaves and tubers, on the 40th day, nitrogen application significantly increased the biomass of potato, and there was no significant difference between different nitrogen application treatments, and on the 60th day, CRF treatment increased tuber biomass, leaf SPAD value, net photosynthetic rate of leaves, and root vitality to varying degrees. Compared with U1 and U2 treatments, CRF treatment significantly increased ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) content in rhizosphere soil at 40th and 60th day, while significantly decreased nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) content in rhizosphere soil at 20th and 40th day. Correlation analysis showed that potato yield was significantly positively correlated with root biomass at 40 day and leaf and tuber biomass at 60 day, SPAD value, total root length and nitrogen accumulation, and polyurethane coated urea increased root biomass and stem biomass at 40 day by increasing rhizosphere NH₄⁺-N content, and increased tuber biomass, nitrogen accumulation and SPAD value at 60 day by increasing rhizosphere NO₃⁻-N content.

Key words: potato; polyurethane coated urea; physiological characteristics; rhizosphere soil; nitrogen nutrients