

氮肥基追比例对苏打盐碱土甜菜光合效率及糖产量的调控

田露, 苏文斌, 郭晓霞*, 黄春燕, 菅彩媛, 梁亚晖, 李智, 韩康

(内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古呼和浩特 010031)

摘要:【目的】探究氮肥基追比例对苏打盐碱土甜菜光合特征、产量和质量的调控效应, 为甜菜高效施肥提供依据。【方法】田间试验于 2020—2021 年在内蒙古通辽市开展, 在氮 (N) 总量 150 kg/hm² 基础上, 设置 9 个氮肥基追比例处理: 10:0:0 (N10)、8:2:0 (N821)、7:3:0 (N731)、6:4:0 (N641)、5:5:0 (N551)、8:1.6:0.4 (N822)、7:2.1:0.9 (N732)、6:2.8:1.2 (N642)、5:3.5:1.5 (N552), 和不施氮肥对照 (CK), 共 10 个处理, 追肥时期在叶丛快速生长期 (V1) 和块根生长及糖分积累期 (V2) 进行。在 V1、V2 和糖分积累期 (V3), 测定光合指标和生物量, 收获期调查甜菜含糖率、产量和产糖量。【结果】与 CK 处理相比, 施氮显著提高了甜菜叶片光合能力、干物质积累量以及产量; 基肥比例大于 70% 的处理含糖率无显著降低; 基肥比小于 60% 的处理对产量无显著影响; 除 N551 和 N552 处理外, 其余处理产糖量均显著提高, N732 处理的产糖量两年均显著高于其他处理 ($P<0.05$)。与 N10 处理相比, 氮肥分期施用提高了 V1 期甜菜叶片光合能力、干物质积累量, 且同一基肥比例下以追肥 1 次优于追肥 2 次; 进入 V2 期, 除基追比 N821 和 N551 处理外, 其余处理甜菜叶片光合能力、干物质积累量均高于对照, 且同一基肥比例下以追肥 2 次优于追肥 1 次, 其中以 N732 处理表现最优, 各指标显著高于其余处理, 其甜菜叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度、SPAD 值两年平均值分别提高 17.20%、13.33%、21.34%、21.01%、10.35%, 叶片、叶柄、块根及全株干物质积累量分别提高 26.02%、46.69%、47.96%、41.92%。与此同时, N732 处理有效调节了甜菜干物质分配和转运, 显著降低了 V1 期后地上部干物质比例, 提高了块根干物质比例, 提高了根冠比, 形成了良好“源-库”关系, 为产量形成奠定基础。通过主成分分析, 甜菜产量和质量与叶片净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、气孔导度、SPAD 值均存在正相关关系。【结论】合理的氮肥基追比可通过对苏打盐碱化耕地甜菜叶片光合特征的调控, 实现甜菜产量和质量的提高。本研究中 N732 处理的氮肥运筹方式 (基肥 105 kg/hm²、叶丛快速生长期追肥 31.5 kg/hm²、块根生长及糖分积累期追肥 13.5 kg/hm²) 具有较好的效果, 分别提高甜菜产量 19.53%、产糖量 20.47%、氮肥农学效率 167.48%、氮肥偏生产力 19.53%, 可作为苏打盐碱化耕地甜菜高产优质的氮肥管理方式。

关键词: 甜菜; 氮肥运筹; 苏打盐碱化耕地; 光合效率; 糖产量

Optimum basal and topdressing ratios of nitrogen fertilizer for high photosynthetic efficiency and sugar yield of sugar beet in soda alkali-saline farmland

TIAN Lu, SU Wen-bin, GUO Xiao-xia*, HUANG Chun-yan, JIAN Cai-yuan, LIANG Ya-hui, LI Zhi, HAN Kang
(Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China)

Abstract: 【Objectives】We investigated the regulation effect of basal and topdressing ratios of nitrogen fertilizer on photosynthetic efficiency and yield of sugar beet in soda alkali-saline farmland. 【Methods】The field experiment was conducted in farmland of Tongliao City, Inner Mongolia from 2020 to 2021. Under the total N input of 150 kg/hm², nine basal to topdressing ratio treatments were setup, as: 10:0:0 (N10), 8:2:0 (N821), 7:3:0 (N731), 6:4:0 (N641), 5:5:0 (N551), 8:1.6:0.4 (N822), 7:2.1:0.9 (N732), 6:2.8:1.2 (N642), 5:3.5:1.5 (N552),

收稿日期: 2022-12-08 接受日期: 2023-02-28

基金项目: 通辽市科左中旗苏打盐碱化耕地改良技术模式研究与监测评价 (202076); 内蒙古自治区科技计划项目 (2020CG0060); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-170207); 内蒙古自治区草原英才工程项目 (甜菜提质增效绿色栽培技术创新人才团队)。

联系方式: 田露 E-mail: tltl_hi@126.com; * 通信作者 郭晓霞 E-mail: guoxiaoxia2008@126.com

taking no nitrogen fertilizer as control (CK). The two topdressings were carried out at the rapid growth stage of leaf tufts (V1) and the growth and sugar accumulation stage of root tubers (V2). The photosynthetic indices and aboveground biomass were measured at V1, V2 and V3 (sugar accumulation) stages, and the sugar content, beet and sugar yield were investigated at harvest stage. **【 Results 】** Compared with CK, all the fertilizer treatments significantly increased the photosynthetic efficiency, dry matter accumulation and yield of sugar beet; The treatments with basal N ratio higher than 70% did not impact the sugar content, and treatments with N basal ratio less than 60% did not increase beet yield; and the fertilizer treatments, except N551 and N552, significantly increased sugar yield. In the two years, treatment N732 achieved significantly higher sugar yield than all the other treatments. Compared with treatment of N10, split fertilizer treatments improved photosynthetic efficiency and dry matter accumulation at V1 stage, and the increase by one-time topdressing treatment was better than by two-time topdressing under the same basal dressing ratio. At V2 stage, all the fertilizer treatments, except basal N rate of N821 and N551 treatments, significantly increased photosynthetic capacity and dry matter accumulation of sugar beet, and the effect of two-time topdressing treatments were better than that of one-time topdressing treatments. Treatment N732 exhibited the highest net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, stomatal conductance and SPAD value of sugar beet, which were averagely 17.20%, 13.33%, 21.34%, 21.01%, and 10.35% higher than the other treatments. Its dry matter accumulation in leaves, petioles, tuber roots and whole plants were 26.02%, 46.69%, 47.96%, and 41.92% higher. Treatment N732 effectively stimulated the distribution and transport of dry matter in sugar beet. In detail, it significantly reduced the proportion of dry matter in above ground, increased that in tuber roots after V1 stage forming a good “source sink” relationship, laying a foundation for yield formation. Through principal component analysis, the yield and quality of sugar beet were positively correlated with leaf net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, stomatal conductance and SPAD value. **【 Conclusions 】** Reasonable basal and topdressing ratio of nitrogen fertilizer could increase sugar beet yield and sugar yield by regulating the leaf photosynthetic efficiencies in soda alkali-saline farmland. In this study, the basal to top dressing ratio of N732 (N 105 kg/hm² as base fertilizer, 31.5 kg/hm² applied at the rapid growth stage of foliage and 13.5 kg/hm² at tuber growth and sugar accumulation stage) increased the yield by 19.53%, sugar yield by 20.47%, improved the agronomic efficiency and partial productivity of nitrogen fertilizer by 167.48% and 19.53%, so is recommended as nitrogen fertilizer management system for high yield and quality of sugar beet in soda alkali-saline farmland.

Key words: sugar beet; nitrogen fertilizer management; soda alkali-saline farmland; photosynthetic efficiency; sugar yield

苏打盐碱化耕地是一种以苏打盐碱土为主要土壤的耕地类型, 其土壤盐分主要为碳酸钠和碳酸氢钠, 土壤含盐量大于 2 g/kg, 土壤胶体上含有过量的交换性钠, 碱化度大于 10%, 土壤在盐化的过程中伴随着碱化, 土壤肥力水平低下^[1], 严重制约着作物生长和产量形成。氮素是作物体内蛋白质、叶绿素、核酸以及多种酶的主要组成成分, 其对作物生长发育过程中碳、氮代谢以及产、质量的形成起着至关重要的作用。在盐碱地栽培中, 土壤中盐分和碱分能够导致施入土壤中的氮肥以氨挥发和氧化亚氮排放的形式损失^[2-3], 氮肥利用率明显降低。作物在不同生育时期对养分的需求不同, 研究表明氮肥全部基施会造成氮肥利用率低^[4], 甚至产量下降^[5],

合理的氮肥运筹方式不仅是作物实现优质高产的关键, 而且是提高农业氮肥利用率, 减少肥料施用对环境污染的重要途径之一^[6-7], 因此采用合理的氮肥运筹方式是提高盐碱地作物产质量水平和氮肥利用率的一条行之有效的措施。

甜菜是我国第二大糖料作物, 其本身具有一定的抗盐碱能力, 是我国北方地区盐碱地上种植的重要轮作作物^[8]。氮素是甜菜生长发育过程中必不可少的营养元素之一, 甜菜中蔗糖含量直接受氮代谢的调控。研究表明, 当施氮量没有达到甜菜需氮量时, 施氮量与甜菜光合速率、干物质积累量、含糖率和产量均呈正相关关系, 但施氮量超过甜菜需氮量时, 甜菜产量、含糖率等均随施氮量增加呈下降

趋势^[9],同时部分研究表明甜菜对氮素的需求主要集中在叶丛快速生长期和块根生长及糖分积累期,这两个时期对氮肥的高效利用对后期甜菜产量和品质的形成至关重要,块根生长及糖分积累期后甜菜对氮素的吸收则呈下降趋势^[10-11],但也有部分研究表明在进入糖分积累期后少量氮肥施用可以延缓甜菜叶片和根系的衰老,提高叶片光合能力,进而实现产量和含糖率的增加^[12]。目前关于甜菜氮肥运筹的研究多集中在非盐碱化耕地甜菜栽培中,研究内容均为氮肥在不同施用时期的追肥比例上,同时研究侧重某一时期的光合特征及产量变化^[13-16],未见有关氮肥不同基追比下多个生育时期联合分析甜菜光合特征、物质积累的研究,盐碱地甜菜氮肥运筹的研究更是鲜见报道。本研究以苏打盐碱化耕地甜菜为对象,通过设置不同氮肥基追比处理,对比分析甜菜叶片光合特征、干物质积累特征和产质量的变化,以期筛选出适宜苏打盐碱化耕地甜菜栽培的最佳氮肥运筹模式,为该区域甜菜高产优质栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于2020年4月—10月和2021年4月—10月于内蒙古自治区通辽市科左中旗三家子村(122.20 E, 43.62 N)开展。试验地年平均气温5.2℃~5.9℃,最高气温40.9℃,最低气温-33.9℃,年平均降水量

370 mm,降水年内分配不均,年际变化大,多年平均蒸发量为2027 mm。土壤类型以苏打盐碱土为主,0—20 cm土壤pH 9.77,碱化度21.86%,土壤全盐含量1.59 g/kg,有机质含量12.70 g/kg,有效磷含量5.63 mg/kg,速效钾含量103.25 mg/kg,土壤碱解氮含量55.36 mg/kg。

1.2 试验材料与试验设计

1.2.1 试验材料 甜菜品种:KWS2314。供试肥料:尿素(含N 46%),重过磷酸钙(含P₂O₅ 46%),硫酸钾(含K₂O 50%)。

1.2.2 试验设计 试验采用随机区组设计。氮肥纯氮施用量按照课题组前期多年研究结果中甜菜生长对氮肥的需求量确定,为150 kg/hm²,按照不同基追比和施用时期施入,具体氮肥施用处理见表1。磷肥(P₂O₅)180 kg/hm²,钾肥(K₂O)90 kg/hm²在整地时结合耕翻一次性施入,氮肥追施采用施肥罐结合灌水施入。试验共计10个处理,重复3次,30个小区,小区面积216 m²(7.2 m×30 m)。甜菜采用手推式播种器人工播种,宽窄行种植,宽行行距70 cm、窄行行距40 cm,株距17 cm,播种深度2.5~3.5 cm。采用浅埋滴灌的方式种植,田间管理方式与大田生产一致。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 甜菜光合特性指标测定 光合指标在甜菜苗叶丛快速生长期(V1)、块根生长及糖分积累期(V2)、糖分积累期(V3)测定,其中V1和V2期在追

表1 试验处理氮肥基追比例及追施时期

Table 1 The basal and topdressing ratio of nitrogen fertilizer and topdressing time in each treatment

处理 Treatment	追肥次数 Number of topdressing	基追肥分配比例 Basal to topdressing ratio	基肥量 (kg/hm ²) Base fertilizer	追肥量 Topdressing amount (kg/hm ²)	
				V1	V2
N821	1	8:2:0	120	30	0
N731	1	7:3:0	105	45	0
N641	1	6:4:0	90	60	0
N551	1	5:5:0	75	75	0
N822	2	8:1.6:0.4	120	24	9
N732	2	7:2.1:0.9	105	31.5	13.5
N642	2	6:2.8:1.2	90	42	18
N552	2	5:3.5:1.5	75	52.5	22.5
N10	0	10:0:0	150	0	0
CK			0	0	0

注: V1—叶丛快速生长期, V2—块根生长及糖分积累期。

Note: V1—Rapid growth stage of foliage, V2—Tuber growth and sugar accumulation stage.

肥处理后 7~10 天测定。选择晴朗无风天气, 上午 9:00—11:00 或下午 15:00—17:00, 用 Li-6400 便携式光合系统, 采用红蓝光源叶室 (LED), LED 光量子设置为 $1500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 测定甜菜倒五叶的净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s)。采用日本产 SPAD-502 叶绿素仪测定相同位置叶片 SPAD 值。

1.3.2 甜菜植株干物质测定 在进行甜菜苗光合指标测定的同时, 每个小区取样 3 个点, 每个点分别取 3 株甜菜, 将甜菜植株分为叶片、叶柄、块根 3 个部分, 105°C 杀青 30 min 后, 80°C 烘干至质量恒定, 称重。

1.3.3 甜菜含糖率、产量和产糖量测定 甜菜收获时, 每个小区随机取 15 株甜菜块根, 采用日本产 Atago Refractometer PAL-1 数字手持折射仪测定块根锤度, 按照公式折算含糖率: 含糖率=锤度 $\times 80\%$ 。

每个小区选取 10 m^2 , 采用称重法测定块根产量, 产糖量=产量 $\times$ 含糖率。

1.3.4 氮肥相关指标计算 氮肥农学效率 (agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, AEN, kg/kg) = (施氮区甜菜产量-不施氮区甜菜产量)/施氮量。

氮肥偏生产力 (partial factor productivity of N fertilizer, PFPN, kg/kg) = 施氮区甜菜产量/施氮量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据计算、处理和作图, 采用 SPSS 25.0 软件进行显著性和相关性分析, LSD 最小显著性差异法进行显著性分析 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮肥基追比例对苏打盐碱化耕地甜菜叶片光合特征的影响

2.1.1 氮肥运筹对甜菜气体交换参数的影响 由图 1 可知, 氮肥分次施用对甜菜叶丛快速生长期 (V1)、块根生长及糖分积累期 (V2) 以及糖分积累期 (V3) 叶片气体交换参数均有一定程度影响, 且两年结果基本表现一致。与 CK 处理相比, 3 个生育时期各氮肥处理甜菜叶片 P_n 、 C_i 、 T_r 、 G_s 均显著提高, V1、V2 和 V3 期 P_n 两年平均分别提高了 8.39%~26.51%、8.44%~31.86% 和 5.22%~26.61%; C_i 两年平均分别提高了 7.21%~30.55%、5.76%~19.99% 和 5.17%~24.99%; T_r 两年平均分别提高了 10.28%~38.20%、8.66%~49.58%、8.72%~57.57%; G_s 两年平均分别提高了 14.51%~60.90%、7.16%~40.75% 和 7.90%~

4.77%。

在 V1 期, 同一基肥比例下追肥 1 次处理的甜菜各气体交换参数指标均高于追肥 2 次处理。与氮肥全部基施 (N10) 相比, N641、N821、N731 和 N732 处理的甜菜叶片 P_n 两年平均值分别提高 16.72%、12.96%、11.02%、9.80% ($P<0.05$); N641、N821、N731、N732、N551、N822 处理的甜菜叶片 T_r 两年平均值提高 25.32%、19.35%、14.63%、14.09%、10.42%、10.98%, 差异显著 ($P<0.05$); N641、N821、N731、N732、N551、N822、N642 处理的甜菜叶片 C_i 和 G_s 两年平均值分别提高 21.77%、18.17%、15.44%、14.10%、11.25%、11.23%、6.68% 和 40.52%、34.31%、28.91%、24.27%、21.91%、15.64%、11.00%, 均表现差异显著 ($P<0.05$)。

在 V2 和 V3 期, 同一基肥比例处理相比, N822、N732 和 N552 处理甜菜叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 两年均分别显著高于相应的 N821、N731 和 N551 处理; N822 和 N732 处理甜菜叶片 C_i 两年均分别显著高于 N821 和 N731 处理。与氮肥全部基施处理 (N10) 相比, N732、N822、N642、N641 处理在两年两个时期甜菜叶片 P_n 均值分别提高 17.20%、12.15%、6.68%、7.14%; C_i 分别提高 13.33%、9.36%、6.41%、7.00%; T_r 分别提高 21.34%、15.78%、12.12%、11.62%; G_s 分别提高 21.01%、12.69%、10.22%、9.02%, 且均达到显著差异 ($P<0.05$), N732 处理显著高于 N822、N642 和 N641 处理, 但 N822、N642、N641 三者的差异在两年以及不同指标间表现不一致。

2.1.2 氮肥运筹对甜菜叶片 SPAD 值的影响 由图 2 可知, 氮肥运筹对甜菜叶丛快速生长期 (V1)、块根生长及糖分积累期 (V2) 以及糖分积累期 (V3) 叶片 SPAD 值均有一定程度的影响, 且两年的结果表现基本一致。

与 CK 处理相比, 3 个生育时期各氮肥处理甜菜叶片 SPAD 值均显著提高, 叶丛快速生长期、块根生长及糖分积累期和糖分积累期在两年平均提高 4.20%~23.71%、6.54%~19.22% 和 4.96%~25.06%。

在 V1 期, 同一基肥比例下, 追肥 1 次的处理甜菜叶片 SPAD 值均高于追肥 2 次的处理。与 N10 处理相比, N641、N821、N731、N732、N551、N822、N642、N552 处理甜菜叶片 SPAD 值两年平均分别提高 18.78%、14.32%、13.81%、11.59%、7.37%、8.96%、6.00%、3.09%, 差异显著 ($P<0.05$)。

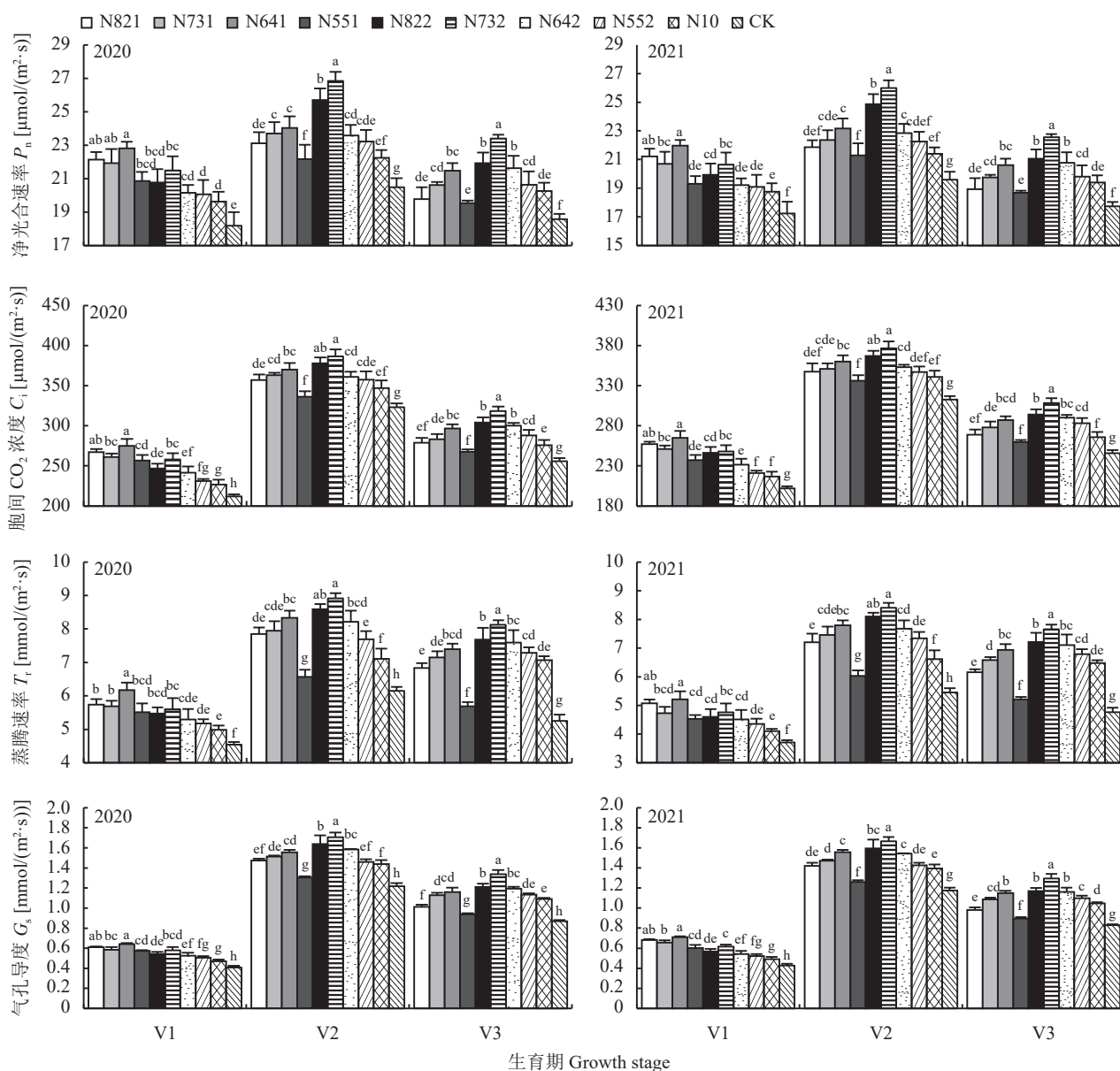


图 1 氮肥不同基追比例下甜菜叶片气体交换参数

Fig. 1 Gas exchange parameters of sugar beet leaves under different ratios of basal to topdressing nitrogen

注: N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552 分别代表氮肥基追比例 10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1.6:0.4、7:2.1:0.9、6:2.8:1.2、5:3.5:1.5; CK 为不施氮肥处理。V1—叶丛快速生长期; V2—块根生长及糖分积累期; V3—糖分积累期。柱上不同小写字母表示同一时期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1.6:0.4, 7:2.1:0.9, 6:2.8:1.2, 5:3.5:1.5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. V1—Rapid growth stage of foliage; V2—Tuber growth and sugar accumulation stage; V3—Sugar accumulation stage. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at 0.05 level at the same growth period.

在 V2 和 V3 期, 同一基肥比例处理相比下, N732 和 N552 处理甜菜叶片 SPAD 两年均值分别显著高于 N731 和 N551 处理。与 N10 处理相比, N551 处理在两年两个生育时期均显著降低, V2 期 N732、N822、N641、N731、N642、N552、N821 处理甜菜叶片 SPAD 两年均值分别提高 10.35%、8.69%、7.72%、6.64%、5.32%、3.48%、3.70% ($P < 0.05$);

V3 期则仅有 N732、N822、N642 处理表现为显著提高, 两年均值分别提高 16.81%、9.75%、5.08%。

2.2 氮肥基追比例对苏打盐碱化耕地甜菜干物质的影响

2.2.1 氮肥基追比例对苏打盐碱化耕地甜菜干物质积累量的影响

由图 3 可知, 氮肥分次施用处理对甜菜叶丛快速生长期 (V1)、块根生长及糖分积累期

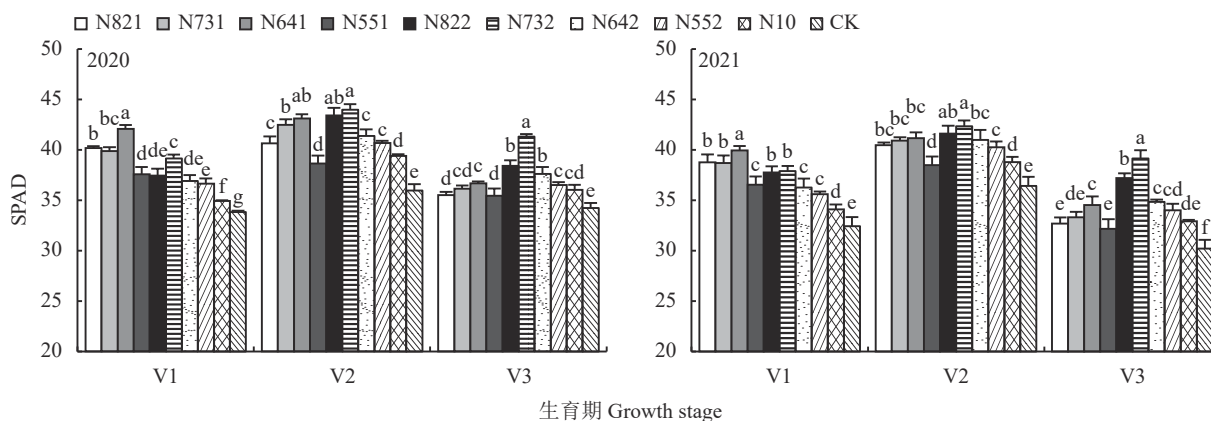


图2 氮肥运筹下甜菜叶片 SPAD 值

Fig. 2 SPAD values of sugar beet leaves under different ratios of basal to topdressing nitrogen

注: N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552 分别代表氮肥基追比例 10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1.6:0.4、7:2.1:0.9、6:2.8:1.2、5:3.5:1.5; CK 为不施氮肥处理。V1—叶丛快速生长期; V2—块根生长及糖分积累期; V3—糖分积累期。柱上不同小写字母表示同一时期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1.6:0.4, 7:2.1:0.9, 6:2.8:1.2, 5:3.5:1.5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. V1—Rapid growth stage of foliage; V2—Tuber growth and sugar accumulation stage; V3—Sugar accumulation stage. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at 0.05 level at the same growth period.

(V2) 以及糖分积累期 (V3) 干物质的积累均有一定的影响, 且两年结果表现基本一致。

与 CK 处理相比, 不同氮肥处理的全生育时期甜菜叶片、叶柄、块根及全株干物质积累量均显著提高, 其中两年叶片干物质积累量平均提高 17.13%~69.32%; 叶柄干物质积累量平均提高 21.13%~94.62%; 块根干物质积累量平均提高 20.55%~104.89%; 全株干物质积累量平均提高 18.74%~90.94%。

在 V1 期, 同一基肥比例下 N821、N641 和 N551 处理甜菜全株干物质及其在各器官的积累量两年均分别显著高于 N822、N642 和 N552 处理。与 N10 处理相比, 叶片干物质积累量和全株干物质积累量, 除 N552 处理外, 其余各处理两年均表现显著提高, 提高幅度表现为 N641>N821>N731>N732>N551>N822>N642, 其中叶片干物质积累量两年分别平均提高 56.58%、51.49%、37.09%、33.51%、31.14%、25.87%、16.10%, 全株干物质积累量两年分别平均提高 65.14%、58.13%、42.13%、37.61%、34.03%、29.49%、17.38%; 叶柄和块根干物质积累量 2020 年表现为除 N552 和 N642 处理外, 其余各处理显著提高, 提高幅度 N641>N821>N731>N732>N551>N822, 叶柄和块根干物质积累量分别提高 56.87%和 65.21%、53.22%和 54.19%、34.80%和 40.90%、27.05%和 38.68%、25.15%和 34.61%、22.62%和

28.56%, 2021 年与叶片和全株干物质积累表现一致, N641、N821、N731、N732、N551、N822、N642 处理叶柄和块根干物质积累量分别提高 74.12%和 85.07%、69.32%和 72.94%、47.13%和 57.35%、41.22%和 51.91%、37.89%和 44.56%、34.01%和 41.03%、24.40%和 21.76%。

在 V2 和 V3 期, 同一基肥比例下 N822、N732 和 N552 处理的甜菜全株干物质及其在各器官的积累量两年分别显著高于 N821、N731、和 N551 处理。与 N10 处理相比, N732、N822、N642、N641、N552 处理的甜菜全株干物质及其在各器官的积累量表现显著提高, 提高幅度 N732>N822>N642>N641>N552, 两年两个时期叶片干物质积累量分别平均提高 26.02%、18.04%、15.47%、11.83%、8.90%, 叶柄干物质积累量分别平均提高 46.69%、31.77%、28.65%、20.27%、12.82%, 块根干物质积累量分别平均提高 47.96%、31.34%、28.85%、18.73%、12.83%, 全株干物质积累量分别平均提高 41.92%、28.61%、24.46%、17.39%、11.86%, 且 N732 处理甜菜全株及各器官干物质积累量均显著高于 N822、N642、N641 和 N552 处理, 后 4 个处理在不同器官、不同时期和不同年际干物质积累量表现不一致。N821 和 N551 处理该时期甜菜全株干物质均低于氮肥全部基施处理 (N10), 且 N551 处理在两年均表现显著低于氮肥全部基施处理。

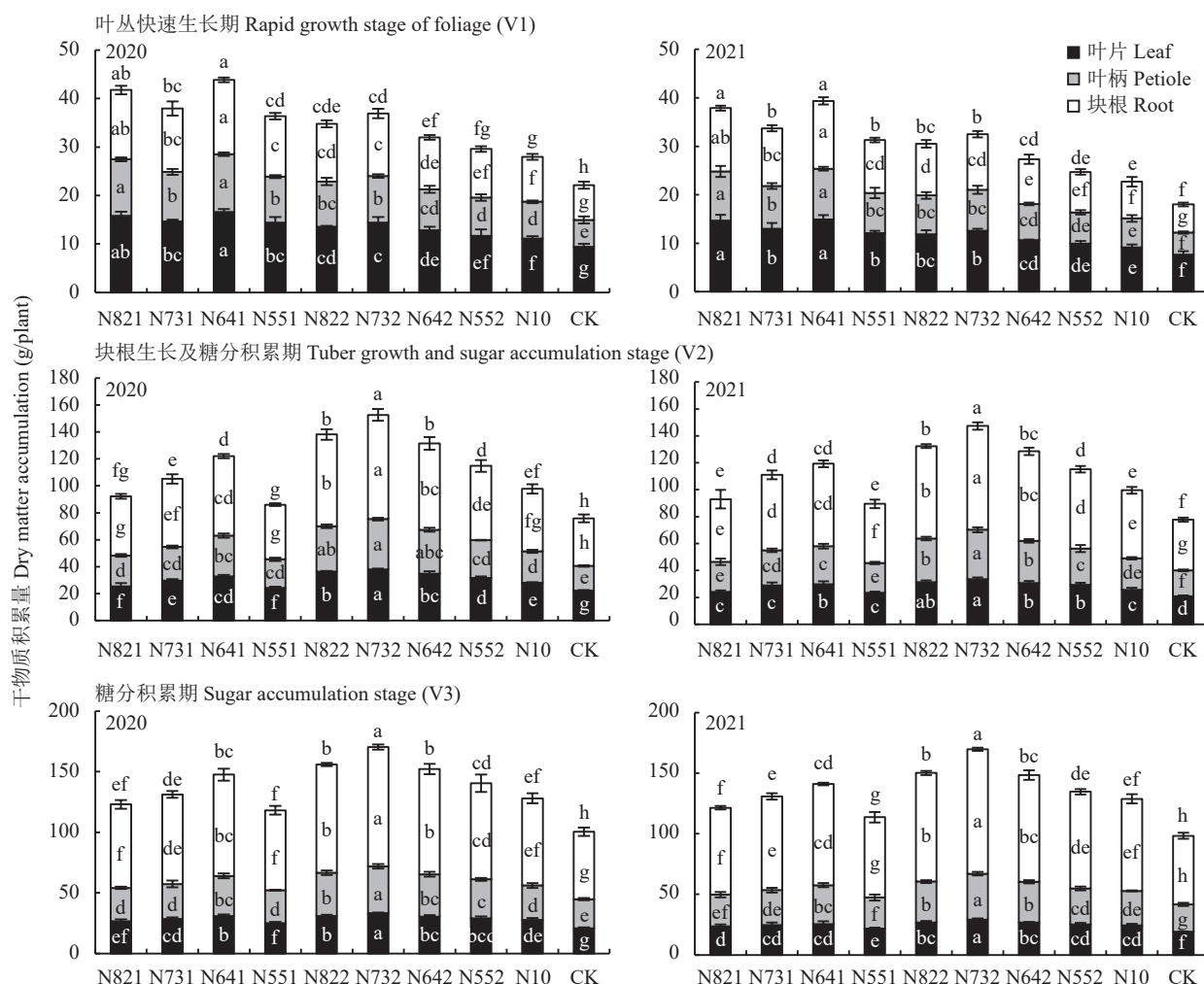


图3 氮肥不同基追比例下甜菜干物质变化

Fig. 3 Dynamics of dry matter of sugar beet under different ratios of basal to topdressing nitrogen

注: N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552 分别代表氮肥基追比例 10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1.6:0.4、7:2.1:0.9、6:2.8:1.2、5:3.5:1.5; CK 为不施氮肥处理。柱上不同小写字母表示整株干物质处理间差异显著 ($P<0.05$); 柱内不同小写字母表示同一器官处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1.6:0.4, 7:2.1:0.9, 6:2.8:1.2, 5:3.5:1.5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments for the whole plant dry matter ($P<0.05$); different lowercase letters in the bars indicate significant difference among treatments for the same organ ($P<0.05$).

2.2.2 氮肥运筹对甜菜干物质分配和转运的影响

由表2可知, 氮肥运筹处理对甜菜叶丛快速生长期(V1)、块根生长及糖分积累期(V2)以及糖分积累期(V3)干物质分配和转运均有一定程度影响, 且两年结果基本表现一致。

随着生育期推进, 地上部干物质比例降低, 块根干物质比例升高。与CK处理相比, V1期, N821、N731、N641、N551、N822、N732处理在两年均表现为地上部干物质比例显著降低, 块根干物质比例显著升高, 其中地上部干物质比例两年分别平均降低3.13%、3.77%、4.36%、3.46%、3.40%、4.16%,

块根干物质比例两年分别平均提高6.57%、7.92%、9.16%、7.27%、7.13%、8.74%; V2和V3期, 则仅有N822、N732和N642处理在两年均表现为地上部干物质比例显著降低, 块根干物质比例显著升高, 其中地上部干物质比例两年两个时期分别平均降低4.88%、6.27%、4.27%, 块根干物质比例两年两个时期平均分别提高4.71%、6.09%、4.14%。与氮肥全部基施(N10)相比, V1期, 各氮肥运筹处理地上部干物质比例均降低, 块根干物质比例均提高, 处理N732表现显著, 两年地上部干物质比例平均降低2.85%, 块根干物质比例平均提高5.74%; V2期, 两

表 2 氮肥不同基追比例下甜菜地上部、地下部干物质分配比例及根冠比
Table 2 Dry matter distribution in the aboveground and underground parts of sugar beet and the root to shoot ratio under different ratios of basal to topdressing nitrogen at different growth stages

年份 Year	处理 Treatment	叶丛快速生长期 (V1) Rapid growth stage of foliage				块根生长及糖分积累期 (V2) Tuber growth and sugar accumulation stage				糖分积累期 (V3) Sugar accumulation stage			
		地上部 (%) Aboveground part	地下部 (%) Underground part	根冠比 Root to shoot ratio	根冠比 Root to shoot ratio	地上部 (%) Aboveground part	地下部 (%) Underground part	根冠比 Root to shoot ratio	根冠比 Root to shoot ratio	地上部 (%) Aboveground part	地下部 (%) Underground part	根冠比 Root to shoot ratio	根冠比 Root to shoot ratio
2020	N821	65.75±0.41 bcd	34.25±0.41 abc	0.52±0.01 abc	0.52±0.01 abc	52.42±0.89 abc	47.58±0.89 bcd	0.91±0.03 cd	0.91±0.03 cd	43.96±0.66 ab	56.04±0.66 bc	1.28±0.03 bc	1.28±0.03 bc
	N731	65.62±1.71 bcd	34.38±1.71 abc	0.52±0.04 abc	0.52±0.04 abc	52.04±0.76 abc	47.96±0.76 bcd	0.92±0.03 bcd	0.92±0.03 bcd	43.71±0.82 abc	56.29±0.82 abc	1.29±0.04 abc	1.29±0.04 abc
	N641	65.04±0.50 d	34.96±0.50 a	0.54±0.01 a	0.54±0.01 a	51.72±0.34 bc	48.28±0.34 bc	0.93±0.01 bcd	0.93±0.01 bcd	43.37±0.58 abc	56.63±0.58 abc	1.31±0.03 abc	1.31±0.03 abc
	N551	65.67±0.23 bcd	34.33±0.23 abc	0.52±0.01 abc	0.52±0.01 abc	52.88±0.52 ab	47.12±0.52 cd	0.89±0.02 cd	0.89±0.02 cd	44.29±1.66 ab	55.71±1.66 bc	1.26±0.09 bc	1.26±0.09 bc
	N822	65.73±0.50 bcd	34.27±0.5 abc	0.52±0.01 abc	0.52±0.01 abc	50.72±0.74 cd	49.28±0.74 ab	0.97±0.03 ab	0.97±0.03 ab	42.66±0.66 bc	57.34±0.66 ab	1.34±0.04 ab	1.34±0.04 ab
	N732	65.11±0.37 cd	34.89±0.37 ab	0.54±0.01 ab	0.54±0.01 ab	49.37±0.88 d	50.63±0.88 ab	1.03±0.04 a	1.03±0.04 a	42.22±0.48 c	57.78±0.48 a	1.37±0.03 a	1.37±0.03 a
	N642	66.46±0.59 abc	33.54±0.59 bc	0.50±0.01 bcd	0.50±0.01 bcd	51.25±1.13 bc	48.75±1.13 bc	0.95±0.04 bc	0.95±0.04 bc	42.92±0.24 bc	57.08±0.24 ab	1.33±0.01 ab	1.33±0.01 ab
	N552	66.06±1.16 bcd	33.94±1.16 abc	0.51±0.03 abc	0.51±0.03 abc	52.03±1.55 abc	47.97±1.55 bcd	0.92±0.06 bcd	0.92±0.06 bcd	43.61±1.43 abc	56.39±1.43 abc	1.29±0.07 abc	1.29±0.07 abc
	N10	66.84±0.86 ab	33.16±0.86 cd	0.50±0.02 cd	0.50±0.02 cd	52.70±1.12 ab	47.30±1.12 cd	0.90±0.04 cd	0.90±0.04 cd	43.85±0.9 ab	56.15±0.9 bc	1.28±0.05 bc	1.28±0.05 bc
	CK	67.61±0.50 a	32.39±0.50 d	0.48±0.01 d	0.48±0.01 d	53.47±1.49 a	46.53±1.49 d	0.87±0.05 d	0.87±0.05 d	44.64±0.75 a	55.36±0.75 c	1.24±0.04 c	1.24±0.04 c
2021	N821	65.44±1.24 bcde	34.56±1.24 abcd	0.53±0.03 abcd	0.53±0.03 abcd	50.1±1.76 abc	49.90±1.76 cd	1.00±0.07 cd	1.00±0.07 cd	40.96±1.37 ab	59.04±1.37 bc	1.44±0.08 abc	1.44±0.08 abc
	N731	64.7±0.93 de	35.3±0.93 ab	0.55±0.02 ab	0.55±0.02 ab	49.49±0.29 bcd	50.51±0.29 bcd	1.02±0.01 bcd	1.02±0.01 bcd	40.82±0.93 abc	59.18±0.93 abc	1.45±0.06 abc	1.45±0.06 abc
	N641	64.48±0.44 e	35.52±0.44 a	0.55±0.01 a	0.55±0.01 a	48.65±1.02 c	51.35±1.02 ab	1.06±0.04 b	1.06±0.04 b	40.79±1.49 abc	59.21±1.49 abc	1.45±0.09 abc	1.45±0.09 abc
	N551	65.07±0.82 cde	34.93±0.82 abc	0.54±0.02 abc	0.54±0.02 abc	51.02±0.79 ab	48.98±0.79 d	0.96±0.03 d	0.96±0.03 d	41.71±1.24 ab	58.29±1.24 bc	1.40±0.07 b	1.40±0.07 b
	N822	65.1±0.15 cde	34.9±0.15 abc	0.54±0.01 abc	0.54±0.01 abc	48.19±0.61 de	51.81±0.61 ab	1.08±0.03 ab	1.08±0.03 ab	40.32±0.69 bc	59.68±0.69 ab	1.48±0.04 ab	1.48±0.04 ab
	N732	64.68±0.09 de	35.32±0.09 ab	0.55±0.01 ab	0.55±0.01 ab	47.70±0.18 e	52.30±0.18 a	1.10±0.01 a	1.10±0.01 a	39.85±0.72 c	60.15±0.72 a	1.53±0.05 a	1.53±0.05 a
	N642	66.38±1.92 abcd	33.62±1.92 cde	0.51±0.04 cde	0.51±0.04 cde	48.28±0.08 de	51.72±0.08 ab	1.07±0.01 ab	1.07±0.01 ab	40.6±0.55 abc	59.4±0.55 abc	1.46±0.03 ab	1.46±0.03 ab
	N552	66.25±0.43 abcd	33.75±0.43 bcde	0.51±0.01 bcde	0.51±0.01 bcde	48.82±0.78 cd	51.18±0.78 bc	1.05±0.03 bc	1.05±0.03 bc	40.71±0.55 abc	59.29±0.55 abc	1.46±0.03 abc	1.46±0.03 abc
	N10	66.76±1.38 ab	33.24±1.38 de	0.50±0.03 de	0.50±0.03 de	49.33±0.62 cd	50.67±0.62 bc	1.03±0.03 bc	1.03±0.03 bc	41.04±0.54 ab	58.96±0.54 bc	1.44±0.03 abc	1.44±0.03 abc
	CK	67.82±0.65 a	32.18±0.65 e	0.47±0.01 e	0.47±0.01 e	51.54±0.25 a	48.46±0.25 d	0.94±0.01 d	0.94±0.01 d	41.75±0.36 a	58.25±0.36 c	1.36±0.02 c	1.36±0.02 c

注: N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552分别代表氮肥基追比例10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1:6:0:4、7:2:1:0:9、6:2:8:1:2、5:3:5:1:5; CK为不施氮肥处理。同列数据后不同小写字母表示同一年份同一指标处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1:6:0:4, 7:2:1:0:9, 6:2:8:1:2, 5:3:5:1:5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$) for the same index in the same year.

年 N732 处理均表现为显著降低了地上部干物质比例 4.81%，显著提高了块根干物质比例 5.13%，其余各处理间表现不一致；V3 期，N731、N641、N822、N732、N642、N552 处理地上部干物质比例均降低，块根干物质比例均提高，仅有 N731 处理表现显著，两年地上部干物质比例平均降低 3.42%，块根干物质比例平均提高 2.46%。

随着生育期推进，甜菜根冠比呈增加趋势。与 CK 相比，V1 期 N821、N731、N641、N551、N822、N732 处理在两年分别平均提高 10.03%、12.24%、14.14%、11.12%、10.90%、13.48%，差异显著 ($P<0.05$)；V2 和 V3 期，两年两个时期 N822、N732、N642 处理根冠比分别平均提高 10.71%、

14.28%、9.42%，差异显著 ($P<0.05$)。与 N10 处理相比，V1 期各氮肥运筹处理甜菜根冠比提高，但仅有 N732 处理表现显著，两年平均提高 8.76%；V2 和 V3 期，N821、N551 处理在两年均降低了甜菜根冠比，其余处理甜菜根冠比均提高，仅 N732 处理表现显著，两年两个时期平均提高 8.63%。

2.3 氮肥基追比例对苏打盐碱化耕地甜菜产量、质量和氮肥利用的影响

由表 3 可知，氮肥分次施用对甜菜产量、含糖率和产糖量均造成一定程度影响，两年结果表现基本一致。与 CK 相比，氮肥处理甜菜产量两年平均提高了 8.67%~35.74% ($P<0.05$)，但含糖率出现不同

表 3 氮肥不同基追比例下甜菜产量、品质和氮肥利用效率

Table 3 Yield, quality and nitrogen use efficiency of sugar beet under different ratios of basal to topdressing nitrogen

年份 Year	处理 Treatment	产量 (kg/hm ²) Yield	含糖率 (%) Sugar content	产糖量 (kg/hm ²) Sugar yield	氮肥农学效率 (kg/kg) Agronomic efficiency of nitrogen	氮肥偏生产力 (kg/kg) Partial factor productivity of nitrogen
2020	N821	47769.10±638.30 d	13.74±0.62 ab	6563.37±225.63 de	26.91±6.91 g	318.46±4.26 e
	N731	49854.92±643.58 cd	14.08±0.63 ab	7015.78±226.06 bc	40.82±6.49 ef	332.37±4.29 cd
	N641	51716.37±1833.80 bc	13.18±0.63 abcd	6807.49±101.87 cd	53.23±9.76 cd	344.78±12.23 bc
	N551	47904.32±1496.84 d	12.62±0.50 cd	6042.40±127.70 f	27.82±5.17 g	319.36±9.98 e
	N822	53801.96±1007.07 bc	13.35±0.50 abc	7179.55±165.57 b	67.13±3.34 b	358.68±6.71 bc
	N732	58075.72±2248.25 a	13.17±0.82 abcd	7634.48±186.67 a	95.63±6.71 a	387.17±14.99 a
	N642	52961.47±1196.11 bc	12.97±0.9 bcd	6861.55±243.73 bcd	61.53±7.81 bc	353.08±7.97 bc
	N552	50365.17±382.91 dcd	12.07±0.61 d	6076.37±277.77 f	44.22±6.96 de	335.77±2.55 cd
	N10	48669.32±1673.30 d	13.01±0.19 bcd	6330.33±130.16 ef	32.92±2.12 fg	324.46±11.16 de
	CK	43731.86±1425.40 e	14.21±0.86 a	6209.49±289.45 f	-	-
2021	N821	47929.68±880.01 e	14.22±0.37 a	6813.98±139.85 de	29.50±1.44 e	319.53±5.87 f
	N731	50537.76±1275.28 d	14.31±0.27 a	7230.66±75.40 c	46.89±4.32 d	336.92±8.50 e
	N641	52789.41±1189.88 c	13.38±0.61 b	7060.19±238.66 cd	61.90±3.47 c	351.93±7.93 cd
	N551	47030.13±898.44 e	12.99±0.11 bc	6106.64±85.04 g	23.50±1.98 e	313.53±5.99 f
	N822	55603.16±2185.22 b	13.60±0.74 ab	7552.04±190.49 b	80.66±10.85 b	370.69±14.57 b
	N732	60330.15±1371.05 a	13.28±0.49 bc	8006.25±131.25 a	112.17±6.89 a	402.20±9.14 a
	N642	54721.10±659.52 bc	12.96±0.39 bc	7088.26±172.04 c	74.78±3.16 b	364.81±4.4 bc
	N552	50669.07±1339.29 d	12.56±0.16 c	6362.58±84.94 f	47.76±4.65 d	337.79±8.93 de
	N10	50387.68±1335.54 d	13.21±0.38 bc	6652.92±36.72 e	45.89±5.87 d	335.92±8.90 e
	CK	43504.49±673.51 f	14.32±0.55 a	6228.37±170.38 fg	-	-

注：N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552 分别代表氮肥基追比例 10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1.6:0.4、7:2.1:0.9、6:2.8:1.2、5:3.5:1.5；CK 为不施氮肥处理。同列数据后不同小写字母表示同一年份同一指标处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1.6:0.4, 7:2.1:0.9, 6:2.8:1.2, 5:3.5:1.5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$) for the same index in the same year.

程度的降低, N551、N642 和 N10 处理的下降幅度达到显著水平。由于块根产量的增加, 2020 年 N732、N822、N731、N642、N641、N821 处理, 2021 年 N732、N822、N731、N642、N641、N821、N10 处理的产糖量显著提高, 2021 年 N551 处理的产糖量显著降低。

在同一基肥比例下, 甜菜产量 N732、N822 处理分别显著高于 N731、N821 处理。与 N10 处理相比, N732、N822、N642、N641 处理甜菜两年平均产量分别提高 19.53%、10.45%、8.71%、5.52% ($P < 0.05$), 且 N732 甜菜产量显著高于 N822、N642 和 N641 处理。

分析各氮肥处理甜菜产量、含糖率和含糖量可知, 在基肥比例高时 (70% 或者 80%), 追施 2 次较追施 1 次, 可显著提高产量, 但降低含糖率; 而在基肥比例较低 (60% 或者 50%) 时, 追施次数对产量和糖产量的影响不显著。与 N10 处理相比, N821 和 N731 处理的含糖率在 2021 年表现为显著提高。

甜菜产糖量是由甜菜产量和含糖率共同决定的, 同一基肥比例下, 追肥 2 次各处理甜菜产糖量均高于追肥 1 次处理, 且 N822 和 N732 处理分别显著高于 N821 和 N731 处理。与氮肥全部基施 (N10) 相比, N732、N822、N731、N642、N641 处理甜菜产糖量两年均值分别提高 20.47%、13.46%、9.76%、7.47%、6.83%, 差异显著 ($P < 0.05$), 且 N732 处理甜菜产糖量显著高于 N822、N731、N642 和 N641 处理。

分析氮肥农学效率和氮肥偏生产力可知, 两年同一基肥比例下, 追肥 2 次各处理氮肥农学效率和氮肥偏生产力均高于追肥 1 次处理, 且除基肥比例为 60% 的两个处理外, 其余各基肥比例下均表现显著提高。与 N10 处理相比, N732、N822、N642、N641 处理氮肥农学效率两年均值分别提高 167.48%、89.66%、74.95%、48.30%, 氮肥偏生产力 2 年分别平均提高 19.53%、10.45%、8.71%、5.52%, 差异显著 ($P < 0.05$), 且 N732 处理显著高于 N822、N642 和 N641 处理。

2.4 甜菜光合特征与干物质质量的相关分析

由表 4 可知, 2020 和 2021 年甜菜叶丛快速生长期、块根生长及糖分积累期、糖分积累期, 在氮肥不同基追比例处理下, 甜菜叶片净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度和 SPAD 值均与叶片、块根干物质积累量之间存在着极显著 ($P < 0.01$) 的相关关系, 说明氮肥通过对甜菜叶片光合特征的

调控直接影响甜菜不同器官的干物质积累, 促进干物质的形成。

2.5 氮肥不同基追比例下苏打盐碱化耕地甜菜光合特征、产质量的主成分分析

由图 4 可知, 将甜菜光合特征、产质量 7 个指标划分为两个主成分, 解析贡献率 2020 年分别为 89.66% 和 5.60%, 2021 年分别为 92.25% 和 4.14%。各指标间均具有正相关关系, 各光合特征指标与甜菜产量的相关性高于其与甜菜产糖量的相关性, 两年结果均显示 C_i 和 G_s 与产量相关性优于其他光合指标, 说明氮肥分次施用改善甜菜光合特征的关键在于对 C_i 和 G_s 的调控, 实现了光合能力的提升。同时氮肥分次施用是通过增加甜菜叶片 P_n 、 C_i 、 T_r 、 G_s 和 SPAD 值实现产量的增加, 进而提升甜菜产糖量。两年结果均显示, N732 处理在 PC1 轴上与其他处理被明显分开, 说明其对甜菜光合特征和产质量具有显著正向影响, CK、N551 处理也在 PC1 轴上与其他处理被明显分开, 但其对光合特征和产质量表现反向影响, 其余各处理均在 PC1 轴上没有被明显区分开。

3 讨论

3.1 氮肥运筹提升苏打盐碱化耕地甜菜光合能力

光合作用是作物产量形成的基础, 高的光合能力是提高作物同化物积累的重要生理基础, 是作物获得高产的首要条件^[17-19]。气体交换参数 (净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度和气孔导度) 是从作物叶片气体的交换量来衡量作物光合能力^[20], SPAD 值是衡量叶片叶绿素相对含量的指标, 叶绿素含量直接影响作物光合速率及其产物的形成^[21]。研究表明甜菜块根增长过程中 90% 以上的有机质是由光合作用转化以及固定的^[22], 改善和提升光合能力是甜菜栽培中的重要环节, 氮素是作物生长吸收最多的矿质元素, 对作物光合作用、器官建成、碳氮代谢等生理反应有重要影响^[23]。适量氮素供给能提高甜菜光合速率, 但若氮肥过量则光合速率表现降低^[24]。本研究中, 与不施氮肥相比, 各氮肥处理在 3 个生育时期甜菜叶片光合特征均呈现显著升高的效应, 说明氮肥对甜菜叶片光合能力具有直接影响。同时本研究发现, 叶丛快速生长期同一基肥施用量下, 追肥 1 次处理甜菜叶片光合能力分别优于追肥 2 次处理, 这与前人关于在叶丛快速生长期适当施用氮肥能够改善光合特性的研究结果^[15]基本一致; 与氮肥全部基

表 4 氮肥不同基追比例下甜菜光合特征与不同器官干物质的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of photosynthetic characteristics with dry matter accumulation of different sugar beet organs under different ratios of basal to topdressing nitrogen

年份 Year	生育时期 Growth period	器官 Organ	P_n	C_i	T_r	G_s	SPAD
2020	叶丛快速生长期 (V1) Rapid growth stage of foliage	叶片 Leaf	0.974**	0.997**	0.980**	0.992**	0.968**
		叶柄 Petiole	0.993**	0.989**	0.987**	0.991**	0.975**
		块根 Root	0.984**	0.993**	0.984**	0.991**	0.974**
	块根生长及糖分积累期 (V2) Tuber growth and sugar accumulation stage	叶片 Leaf	0.974**	0.997**	0.980**	0.992**	0.968**
		叶柄 Petiole	0.993**	0.989**	0.987**	0.991**	0.975**
		块根 Root	0.984**	0.993**	0.984**	0.991**	0.974**
	糖分积累期 (V3) Sugar accumulation stage	叶片 Leaf	0.965**	0.979**	0.923**	0.966**	0.881**
		叶柄 Petiole	0.972**	0.971**	0.889**	0.956**	0.936**
		块根 Root	0.983**	0.989**	0.952**	0.982**	0.923**
2021	叶丛快速生长期 (V1) Rapid growth stage of foliage	叶片 Leaf	0.964**	0.968**	0.971**	0.988**	0.953**
		叶柄 Petiole	0.964**	0.976**	0.978**	0.985**	0.960**
		块根 Root	0.965**	0.986**	0.979**	0.992**	0.984**
	块根生长及糖分积累期 (V2) Tuber growth and sugar accumulation stage	叶片 Leaf	0.869**	0.900**	0.930**	0.939**	0.892**
		叶柄 Petiole	0.957**	0.941**	0.948**	0.965**	0.907**
		块根 Root	0.944**	0.929**	0.929**	0.949**	0.896**
	糖分积累期 (V3) Sugar accumulation stage	叶片 Leaf	0.982**	0.991**	0.965**	0.988**	0.950**
		叶柄 Petiole	0.984**	0.979**	0.943**	0.979**	0.948**
		块根 Root	0.982**	0.967**	0.918**	0.953**	0.967**

注： P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 分别代表净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率。
Note: P_n , G_s , C_i , T_r indicate net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, respectively. *— $P<0.05$, **— $P<0.01$.

施 (N10) 相比, 该时期各氮肥不同基追比例处理甜菜叶片光合特征指标均提高, 且以处理 N641、N821、N731 和 N732 在各指标均表现显著提高, 该时期对胞间 CO_2 浓度和气孔导度的影响大于对净光合速率和蒸腾速率, 说明叶丛快速生长期, 适当的增加氮肥追施量能够通过提高甜菜叶片叶绿素含量, 改善气孔状况, 增加 CO_2 进入叶片的浓度, 进而提高甜菜叶片光合能力, 这与调节光合作用的关键在于改善叶片气孔开闭, 加快气体交换, 使进入叶片气孔的光合原料 CO_2 增加, 进而提高叶片光合作用的研究结果^[25]类似。进入块根生长和糖分积累期, 随着第二次氮肥的追施, 各处理甜菜叶片光合特征呈现与叶丛快速生长期不同的表现, 同一基肥施用量下, 追肥 2 次处理甜菜叶片光合能力分别优于追肥 1 次处理, 可见该时期追施部分氮肥能够进一步改善甜菜叶片光合特性, 这是由于适量施肥能够提高叶绿素含量, 延长叶片光合生理的持续期^[26], 延缓叶片衰

老, 增强叶片对光破坏的防御机制, 有效调节光合性能, 且该阶段对甜菜叶片净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度和 SPAD 值的影响基本一致, 实现了各指标的协同提升, 进而改善叶片光合能力, 与氮肥全部基施相比 (N10), N732、N822、N642 和 N641 处理的各光合指标显著提高。可见在同一基追比例下, 将氮肥分 2 次在叶丛快速生长期和块根生长及糖分积累期分别施用, 能够促进甜菜中后期叶片保持较好的光合能力, 其中以处理 N732 表现更优。

3.2 氮肥运筹改善苏打盐碱化耕地甜菜干物质积累、分配和转运

干物质是光合产物的最终形态, 其积累和分配能够反映作物适应各种农艺措施下自我调节能力^[27]。干物质在作物不同器官的积累、分配除了受作物本身遗传特性的影响外, 还能够响应外界环境的调控表现出不同的分配特征^[28], 进而与产量的形成密切相

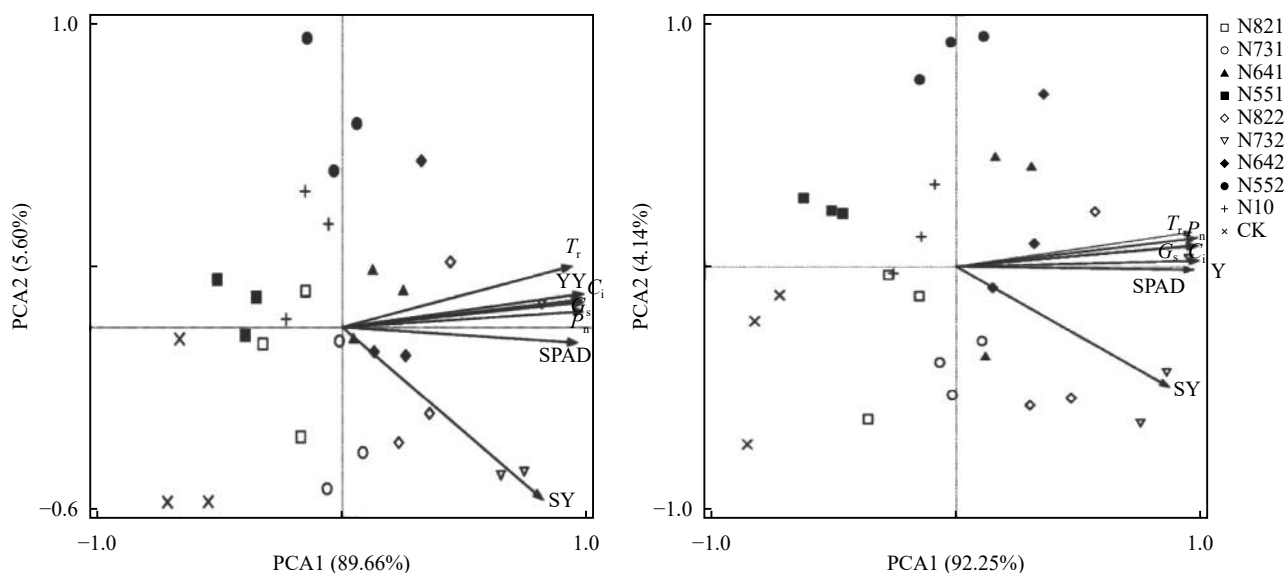


图 4 光合特征、产质量指标的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of photosynthetic characteristics, yield and quality indexes

注: N10、N821、N731、N641、N551、N822、N732、N642、N552 分别代表氮肥基追比例 10:0:0、8:2:0、7:3:0、6:4:0、5:5:0、8:1.6:0.4、7:2.1:0.9、6:2.8:1.2、5:3.5:1.5; CK 为不施氮肥处理。 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 、SPAD、YY 和 BY 分别代表净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、SPAD 值、产量和产糖量。

Note: N10, N821, N731, N641, N551, N822, N732, N642, N552 represent topdressing ratio of 10:0:0, 8:2:0, 7:3:0, 6:4:0, 5:5:0, 8:1.6:0.4, 7:2.1:0.9, 6:2.8:1.2, 5:3.5:1.5, respectively; CK represents no N fertilizer treatment. P_n , G_s , C_i , T_r , SPAD, YY and BY indicate net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, SPAD value, yield and sugar yield, respectively.

关^[29-30]。甜菜叶丛快速生长期是甜菜地上部分生长的重要时期, 对于后期光合产物的生成有着重要作用, 该时期氮素的供应对甜菜生长具有重要影响, 前人研究表明叶丛快速生长期合理的氮肥施用能够促进甜菜该时期地上部分干物质质量的提升, 但该时期氮肥过量则又容易造成地上部叶片徒长, 不利于块根质量的增加^[15], 甜菜块根生长及糖分积累期是甜菜同化产物由地上向地下转运的关键时期^[31], 该时期过多的施氮甜菜地上部分徒长, 影响生长中心向块根的转移, 可见不同时期氮肥的施用对甜菜干物质的积累、分配有着重要影响。本研究中, 对于甜菜叶片、叶柄、块根和全株干物质积累量的影响各处理表现与其对叶片光合特征的影响基本一致, 与不施氮肥相比, 氮肥处理干物质积累量均显著提高; 叶丛快速生长期第 1 次追肥后, 相同基肥比例下追肥 1 次处理干物质积累量均高于追肥 2 次处理, 块根生长和糖分积累期第 2 次追肥后, 相同基肥比例下追肥 2 次处理干物质积累量均高于追肥 1 次处理, 说明同一基肥施用量下, 第 1 次追肥量大利于干物质的积累, 第 2 次适宜的追肥量能够进一步促进甜菜干物质的积累, 同时与氮肥全部基施相比, 叶丛快速生长期各处理均提高了甜菜全株和各器官的干物质积累量, 这与甜菜该时期对氮素需求大,

氮素供应直接促进植株快速生长, 增加干物质质量有关, 这也说明氮肥全部基施不利于甜菜生长期对氮素的利用, 这与前人关于氮肥分基肥和追肥促进干物质积累的研究结果^[32]基本一致, 进入块根生长及糖分积累期, N732、N822、N642、N641、N552 处理较氮肥全部基施甜菜干物质质量显著提高, N821 和 N551 处理则表现降低, 且 N551 处理显著降低, 说明随着甜菜的生长, 后期少量的氮素供应能够延缓其衰老^[12], 促进干物质的积累, 且以 N732 处理表现较优。同时, 本研究通过将各时期甜菜叶片光合特征与干物质积累进行相关性分析, 发现甜菜叶片光合特征与甜菜干物质积累存在着极显著的正相关关系, 这也说明各氮肥处理通过调控光合特征进而实现干物质积累量增加, 与前人关于氮肥通过调控光合能力实现干物质积累增加的研究结果^[33]基本一致。

作物高产不仅需要较强的干物质生产能力, 各器官中干物质的高效运输与分配对产量的形成也是至关重要^[34-35]。对于甜菜而言, 地上部的生长与块根的生长相互促进又相互制约, 调节地上部和块根干物质所占比例, 提高根冠比对促进产量形成具有重要作用^[36]。本研究中与不施氮肥相比, 各氮肥处理在不同时期地上部干物质比例均表现降低, 块根干物

质比例均表现升高,但在叶丛快速生长期 N821、N731、N641、N551、N822、N732 处理效果显著,块根生长及糖分积累期和糖分积累期 N822、N732 和 N642 处理效果显著,可见施氮能够调控甜菜地上和块根的干物质分配比例,但适宜氮肥比例才能实现效果显著,这是不同氮肥运筹方式对甜菜生长调控作用不同引起的,与氮肥全部基施相比,仅有 N732 处理 3 个时期在降低地上干物质比例和升高块根干物质比例上均表现出显著效果,同时其对各时期根冠比的影响与对块根干物质比例的影响基本一致,可见适宜的氮肥运筹处理在提高干物质积累量的同时,能够调节其在器官间的分配,促进干物质由地上部分向块根转运,这是由于 N732 处理能够在甜菜 3 个关键生育时期均保持叶片的光合功能在相对较高水平,使得后期块根干物质积累的潜力大于其他处理。

3.3 氮肥运筹提升苏打盐碱化耕地甜菜产质量水平

作物产量和品质的形成是不同生育时期作物生长发育累积的结果,受生育期内多种作物内在和栽培外在因素的影响,其中施肥是影响作物产量和品质的关键因素之一,作物产量是评价施肥效果的重要指标之一。研究表明甜菜栽培中,氮肥适量的应用能够协调其同时获得最佳产量和含糖率^[37],氮肥不足抑制其块根生长,影响产量,过度施氮在增加产量的同时降低了甜菜含糖率,严重影响产糖量,制约品质的形成^[38]。本研究中,与不施氮肥相比,各施氮肥处理产量均表现显著提高,但含糖率表现降低,这与前人^[39]关于施肥下甜菜产量和含糖率的变化趋势基本一致,但产糖量表现为两年 N732、N822、N731、N642、N641、N821 处理均显著提高,这是因为甜菜产糖量由产量和含糖率综合决定,在其降低含糖率的同时,产量增加的幅度弥补了含糖率降低带来的不足,实现了产糖量的增加。目前往往采用“一炮轰”的施肥方式,该方式在生长前期由于氮肥利用较少容易造成氮素淋失,导致后期出现脱肥早衰进而限制产量形成的问题^[40]。本研究中,与氮肥全部基施相比,N732、N822、N642、N641 处理甜菜产量显著提高,含糖率则各处理年际间差异不一致,产糖量则以 N732、N822、N731、N642、N641 处理表现显著提高,同时 N732、N822、N641、N642 处理的氮肥农学效率和氮肥偏生产力均显著提高,且产量、产糖量、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均以处理 N732 表现最优,显著高于其他各处理。

本研究通过主成分分析对甜菜产质量与叶片光合特征关系进行探讨,结果表明苏打盐碱化耕地甜菜栽培中氮肥运筹是通过改善叶片光合特性来实现产量的增加,这与前人^[14]关于氮肥运筹对甜菜产量的影响研究结果一致,主要原因是甜菜叶丛快速生长期后,光合能力的高低直接制约着后期块根的生长,合理的氮肥运筹方式有助于调节干物质分配比例,促进叶丛快速生长期后的干物质向块根转运,形成良好“源-库”关系^[41],同时块根生长及糖分积累期补充适宜氮素有助于甜菜叶片保持较高的光合能力,从而克服氮肥全部基施在后期带来的氮素缺乏导致的叶片早衰、光合能力下降的问题^[42],本研究中氮肥通过分次施用能够更好地契合甜菜生育后期的需肥特性,是获得最佳甜菜块根产量和产糖量的施氮制度。

4 结论

氮肥分次施用可实现对甜菜光合能力、物质积累和产质量形成的调控,在施肥总量一致且基肥比例相同时,追施 2 次的调控效果优于追施 1 次。采用基肥 105 kg/hm²、叶丛快速生长期和块根生长及糖分积累期各追施 31.5、13.5 kg/hm² 的氮肥施用方式(N732),显著提高了甜菜叶片净光合速率和气体交换能力,增加了甜菜各部位干物质积累量和产糖量,提高了氮肥农学效率和偏生产力,可以作为苏打盐碱化耕地甜菜高产优质的氮肥管理制度,能够实现苏打盐碱化耕地甜菜肥料高效利用和优质高效生产。

参考文献:

- [1] 徐子祺,许晓鸿.松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展[J].中国水土保持,2018,(2): 54-59.
Xu Z Q, Xu X H. The cause of formation and characteristics of soda saline-alkaline land of the Songnen plain and the study progress of control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018, (2): 54-59.
- [2] 张先富.苏打盐碱土对氮转化影响实验研究[D].吉林长春:吉林大学硕士学位论文,2011.
Zhang X F. Effects of saline-alkali soil on nitrogen transformations [D]. Changchun, Jilin: MS Thesis of Jilin University, 2011.
- [3] 何家乐.不同尿素类型与土壤pH对农田氨排放的影响及相关因子分析[D].湖南长沙:湖南农业大学硕士学位论文,2019.
He J L. Effect of different urea types and soils pH on ammonia emission from farmland and analysis of related factors[D]. Changsha, Hunan: MS Thesis of Hunan Agricultural University, 2019.
- [4] Li S X, Wang Z H, Hu T T, et al. Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. Advances in Agronomy, 2009, 101: 123-181.

- [5] McDonald G K. Effects of nitrogenous fertilizer on the growth, grain yield and grain protein concentration of wheat[J]. *Crop & Pasture Science*, 1992, 43(5): 949–967.
- [6] 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5128–5137.
Wu G L, Guo L Y, Cui Z Y, *et al.* Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5128–5137.
- [7] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 559–565.
Jiang T. Effects of nitrogen application regime on yield, quality and plant nutrient contents of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 559–565.
- [8] Gui G, Ji Y. Sugar beet production and industry in China[J]. *Sugar Tech*, 2015, 17(1): 13–21.
- [9] 费聪. 氮素运筹对露播滴灌甜菜产量和品质的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2016.
Fei C. Effects of nitrogen application on yield and quality of sugar beet with dew drip irrigation[D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2016.
- [10] 王树堂, 黄立功, 张成建, 等. 氮素对甜菜代谢、品质和产量的影响[J]. *农业科技通讯*, 2012, (5): 184–185.
Wang S T, Huang L G, Zhang C J, *et al.* Effect of nitrogen on metabolism, quality and yield of sugar beet[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2012, (5): 184–185.
- [11] Malnou C S, Taggard K W, Sparkles D L. Nitrogen fertilizer and the efficiency of the sugar beet crop in late summer[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(1): 47–56.
- [12] 邵金旺, 蔡葆, 张家骅. 甜菜生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
Shao J W, Cai B, Zhang J H. Sugar beet physiology[M]. Beijing: Agricultural Press, 1991.
- [13] 许鹏杰, 胡华兵, 陈燕, 等. 氮肥运筹对滴灌甜菜糖分积累期叶片光合特性的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(1): 21–26.
Xu P J, Hu H B, Chen Y, *et al.* Effects of nitrogen management on photosynthetic characteristics of sugarbeet leaves in the period of sugar accumulation under drip irrigation[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science Edition)*, 2021, 40(1): 21–26.
- [14] 徐林峰, 戴宇祥, 周红亮, 等. 氮素运筹对干旱区滴灌甜菜生长的影响[J]. *中国糖料*, 2019, 41(3): 40–44.
Xu L F, Dai Y X, Zhou H L, *et al.* Effect of nitrogen application on growth of drip irrigation sugar beet in arid area[J]. *Sugar Crops of China*, 2019, 41(3): 40–44.
- [15] 苏继霞, 王开勇, 费聪, 等. 氮肥运筹对滴灌甜菜产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1404–1408.
Su J X, Wang K Y, Fei C, *et al.* Effects of nitrogen management on sugar beet yield, nitrogen uptake and soil nitrogen balance under drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(6): 1404–1408.
- [16] 费聪, 耿青云, 李阳阳, 等. 氮肥运筹对露播滴灌甜菜产量和块根糖质量分数的影响[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(11): 101–106.
Fei C, Geng Q Y, Li Y Y, *et al.* Effect of nitrogen application on yield and sugar mass fraction of root tuber in drip irrigated sugar beet[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 24(11): 101–106.
- [17] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318–325.
Gao H J, Zhu P, Peng C, *et al.* Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil organic nitrogen content under the same N input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 318–325.
- [18] Li Y P, Li H B, Li Y Y, *et al.* Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(3): 231–239.
- [19] Iram S, Sajad H, Muhammad A R, *et al.* Crop photosynthetic response to light quality and light intensity[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(1): 4–23.
- [20] 李鹏民, 高辉远, Strasser R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. *植物生理与分子生物学报*, 2005, 31(6): 559–566.
Li P M, Gao H Y, Strasser R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, 31(6): 559–566.
- [21] 李强, 罗延宏, 余东海, 等. 低氮胁迫对耐低氮玉米品种苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1132–1141.
Li Q, Luo Y H, Yu D H, *et al.* Effects of low nitrogen stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of maize cultivars tolerant to low nitrogen stress at the seedling stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(5): 1132–1141.
- [22] 曲文章. 甜菜生理学[M]. 黑龙江哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1990.
Qu W Z. Sugar beet physiology[M]. Harbin, Heilongjiang: Heilongjiang Science and Technology Press, 1990.
- [23] Miner G L, Bauerle W L. Seasonal responses of photo-synthetic parameters in maize and sunflower and their relationship with leaf functional traits[J]. *Plant Cell and Environment*, 2019, 42(5): 1561–1574.
- [24] 曲文章, 蔡伯岩, 高妙真, 等. 氮素水平对甜菜产量形成作用机理的研究之二氮素水平对甜菜光合效率的影响[J]. *中国甜菜糖业*, 1999, (4): 1–4.
Qu W Z, Cai B Y, Gao M Z, *et al.* The effect of nitrogen amount to photosynthetic efficiency in the sugar beet plant[J]. *China Beet & Sugar*, 1999, (4): 1–4.
- [25] 程乾斗. 微生物肥料对枸杞生长发育影响的研究[D]. 甘肃兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2014.
Cheng Q D. Research on the effects of microbial fertilizer on growth and development of *Lycium. barbarum* L.[D]. Lanzhou, Gansu: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2014.
- [26] 王仁雷, 李霞, 陈国祥, 等. 氮肥水平对杂交稻汕优63剑叶光合速率和RuBP羧化酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 930–934.

- Wang R L, Li X, Chen G X, *et al.* Effect of N-fertilizer levels on photosynthetic rate and RuBP carboxylase activity in flag leaves of hybrid rice Shanyou 63[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 930–934.
- [27] 王小林, 徐伟洲, 张雄, 等. 黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对品种间作竞争的响应[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(3): 377–387. Wang X L, Xu W Z, Zhang X, *et al.* Responses of dry matter distribution and water use of summer maize (*Zea mays* L.) to intercropped cultivars competition on the Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(3): 377–387.
- [28] 丁俊男, 于少鹏, 李鑫, 等. 生物炭对大豆生理指标和农艺性状的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(4): 784–789. Ding J N, Yu S P, Li X, *et al.* Effects of biochar application on soybean physiological indices and agronomic traits[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(4): 784–789.
- [29] 解保胜, 赵黎明, 那永光, 等. 温光条件与寒地水稻产量和源库特征的关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 917–924. Xie B S, Zhao L M, Na Y G, *et al.* Effects of temperature and sunlight conditions on yield and source sink characteristics of rice in cold region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 917–924.
- [30] 李敏, 张洪程, 杨雄, 等. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性[J]. *作物学报*, 2013, 39(1): 101–109. Li M, Zhang H C, Yang X, *et al.* Characteristics of dry matter accumulation and translocation in rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(1): 101–109.
- [31] Adams R M, Farris P J, Halvorson A D. Sugar beet N fertilization and economic optima: Recoverable sucrose vs. root yield[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75(2): 173–176.
- [32] Wang Y Q, Xi W X, Wang Z M, *et al.* Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(6): 2247–2256.
- [33] 吕广德, 元晓蕾, 张继波, 等. 中、高产型小麦干物质和氮素累积转运对水氮的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1534–1547. Lv G D, Qi X L, Zhang J B, *et al.* Response of nitrogen and dry matter accumulation in middle and high yield wheat cultivars to water and nitrogen supply[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1534–1547.
- [34] 王佳旭, 王宏伟, 姜文野, 等. 不同种植方式对玉米干物质积累、分配和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5): 128–136. Wang J X, Wang H W, Jiang W Y, *et al.* Effect of different planting patterns on dry matter accumulation, distribution and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(5): 128–136.
- [35] Goyal S, Chander K, Mundra M C, *et al.* Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(2): 196–200.
- [36] 危常州, 刘日明, 雷永雯, 等. 不同密度地膜甜菜光合与呼吸特性及与产量质量间的关系[J]. *中国糖料*, 1998, (2): 16–19. Wei C Z, Liu R M, Lei Y W, *et al.* Characteristics of photosynthesis and respiration in different sugar beet population covered with plastic film and the correlation between yield and quality[J]. *Sugar Crops of China*, 1998, (2): 16–19.
- [37] Chatterjee A, Subedi K, Franzen D W, *et al.* Nitrogen fertilizer optimization for sugarbeet in the red river valley of North Dakota and Minnesota[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(4): 1554–1560.
- [38] Cenl R J, Boring T J. In-season prediction of sugar beet yield, quality, and nitrogen status using an active sensor[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(4): 1012–1018.
- [39] 郭晓霞, 苏文斌, 樊福义, 等. 施氮量对膜下滴灌甜菜生长速率及氮肥利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 39–45. Guo X X, Su W B, Fan F Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilization amount on growth rate and nitrogen use efficiency of sugar beet by drip irrigation with mulch[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 39–45.
- [40] Meng Q F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(3): 294–303.
- [41] 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2697–2705. Wang L M, Li S Q, Shao M A. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*Zea mays* L.) leaf and straw-sheath[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2697–2705.
- [42] 李文娟, 何萍, 高强, 等. 不同氮效率玉米干物质形成及氮素营养特性差异研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 51–57. Li W J, He P, Gao Q, *et al.* Dry matter formation and nitrogen uptake in two maize cultivars differing in nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1): 51–57.