

## 膜下滴灌水氮供应对甜菜氮素同化和利用的影响

李智<sup>1,2</sup>, 李国龙<sup>1</sup>, 孙亚卿<sup>1</sup>, 苏文斌<sup>2</sup>, 樊福义<sup>2</sup>, 张少英<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>内蒙古农业大学甜菜生理研究所, 呼和浩特010018

<sup>2</sup>内蒙古自治区农牧业科学院特色作物研究所, 呼和浩特010031

**摘要:**甜菜(*Beta vulgaris*)是我国北方重要的糖料作物, 其根部是榨糖的原料。水肥科学管理是作物栽培中重要的农艺措施, 在甜菜生产中氮肥施用量普遍偏高, 造成甜菜生长源库关系失调, 产量和含糖率下降。为此, 本试验于2016~2017年在内蒙古乌兰察布市凉城县研究了水氮耦合条件下, 不同水氮供应对甜菜氮素吸收、积累、分配、氮同化酶活性、氮肥利用效率和产质量的影响, 为甜菜生产水氮科学管理提供生理基础和理论依据。结果表明: 膜下滴灌条件下, 甜菜氮吸收量和叶片硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性均随施氮量和灌水量的增加而增加; 叶丛快速生长期叶片NR和GS活性最高, 块根及糖分增长长期块根中GS活性最高, 与不同器官生长速率相一致; 随施氮量的增加, 氮素吸收利用率、氮素偏生产力、氮素生理利用率和氮素农学利用率均减小。甜菜生育期灌水1 350~1 427 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 配合施氮量150~179.22 kg·hm<sup>-2</sup>, 有利于甜菜产质量增加, 同时水氮利用效率也提高。

**关键词:**甜菜; 水氮耦合; 氮同化; 氮素利用效率; 产质量

甜菜(*Beta vulgaris*)是我国北方重要的经济作物。近些年, 华北地区甜菜种植面积逐渐扩大, 已成为我国甜菜第一大产区, 甜菜制糖业也成为当地的支柱性产业。曹禹等(2016)研究表明, 氮磷钾中氮肥对甜菜产量贡献率最大, 施氮增产的主要原因是氮素能改善光合性能, 提高作物光合效率。合理施氮有利于提高甜菜产质量(Hergert 2010), 但施氮过量造成叶丛徒长, 根冠比下降, 反而降低甜菜产量和含糖率。灌水可以提高作物对氮素的吸收和利用, 进而提高作物产量(刘明等2018; Wang等2019; Zhang等2019; Trifonov等2018)。生产实践中, 农民为了增加产量, 大量施用氮肥, 造成甜菜产质量下降。如在新疆由于氮肥施用量过多, 导致甜菜含糖率由17.88%下降至14.56%左右(费聪等2015)。总体而言, 作物种植中, 以水济肥、以肥调水、水肥协调高效利用是节本增效的重要措施。科学灌溉与合理的氮素运筹有利于甜菜块根及糖分增长长期生长中心的转移, 还能延缓植株后期脱肥, 从而促进甜菜产质量的提高。因此, 本研究通过在水氮耦合条件下探索不同灌水量和施氮量对甜菜氮素吸收、氮同化和利用效率的影响, 旨在为甜菜获得高产高糖提供水氮合理管理的生理基础及技术参数。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验地概况

于2016~2017年在内蒙古乌兰察布市凉城县

六苏木镇进行试验, 该地位于东经112°27', 北纬40°26', 属温带半干旱大陆性季风气候, 年日照时数为3 026 h, 有效积温2 500°C, 无霜期一般为125 d左右, 年降水量在350~450 mm之间。2016和2017年甜菜生育期有效降雨量分别为211.6和215.2 mm。

试验地点: 分别在凉城县六苏木镇南大路村(2016)和凉城县六苏木镇脑包村(2017), 两地相距6.8 km。

### 1.2 试验材料

供试甜菜(*Beta vulgaris* L.)品种: ‘瑞士先正达HI1003’。

### 1.3 试验设计

播前土壤养分见表1, 试验种植方式采用膜下滴灌纸筒育苗移栽, 一膜两行, 中间铺一根滴灌带, 灌水量用水表控制。2016年试验采用二次饱和D-最优设计(表2), 设灌水和施氮2个因素, 4个水平, 共6个处理, 采用完全随机排列, 另设空白对照; 小区长6 m, 宽4 m, 每个处理6次重复, 共42个小区。2017年在2016年试验的基础上进一步细化试验, 在最小灌水量和施氮量不变的基础上缩小最大灌水量和施氮量, 增加灌水量和施氮量的梯度, 采用裂区设计, 灌水量和施氮量各4个水平(表3), 共16个

收稿 2019-05-05 修定 2019-06-04

资助 现代农业产业技术体系项目(CARS-170201)。

\* 通讯作者(syzh36@aliyun.com)。

表1 土壤养分

Table 1 Soil nutrient status

年份	全氮含量/ g·kg <sup>-1</sup>	全磷含量/ g·kg <sup>-1</sup>	全钾含量/ g·kg <sup>-1</sup>	碱解氮含量/ mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷含量/ mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾含量/ mg·kg <sup>-1</sup>	有机质含量/ g·kg <sup>-1</sup>	pH
2016	0.51	0.28	12.36	86.63	9.90	109.59	11.26	8.30
2017	0.31	0.60	17.63	51.77	6.17	93.01	8.21	8.35

表2 试验设计(2016)

Table 2 Experiment design in 2016

处理	编码值		实际值	
	灌水量	施氮量	灌水量/m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	施氮量/kg·hm <sup>-2</sup>
W1N1	-1	-1	450.00	75.00
W4N1	1	-1	2 700.00	75.00
W1N4	-1	1	450.00	315.00
W2N2	-0.131 5	-0.131 5	1 427.10	179.25
W4N3	1	0.394 4	2 700.00	242.40
W3N4	0.394 4	1	2 018.70	315.00

表3 裂区设计(2017)

Table 3 Split plot design in 2017

因素	实际值	编号
灌水量	450 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	W1
	900 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	W2
	1 350 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	W3
	1 800 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>	W4
施氮量	75 kg·hm <sup>-2</sup>	N1
	150 kg·hm <sup>-2</sup>	N2
	225 kg·hm <sup>-2</sup>	N3
	300 kg·hm <sup>-2</sup>	N4

处理,另设空白对照(甜菜生育期灌水3次,不施氮肥);小区长6 m,宽5 m,每个处理4次重复,共68个小区,采用完全随机排列。两年试验行距50 cm,株距23 cm,理论株数87 000株·hm<sup>-2</sup>。两年分别在5月20日和5月15日进行大田人工移栽,氮肥用尿素(含氮量46%),磷肥用重过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),钾肥用硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%),肥料以基肥的形式一次性施入大田,根据测土配方计算得出,2016年施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 180 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O) 75 kg·hm<sup>-2</sup>,灌水间隔为20 d,每次灌水450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。其中,灌水的上限和下限值分别为2 700和450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,施氮肥的上限和下限值分别为315和75 kg·hm<sup>-2</sup>;甜菜收获时间是9月30日。2017年施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 108 kg·hm<sup>-2</sup>,钾肥

(K<sub>2</sub>O) 90 kg·hm<sup>-2</sup>,灌水间隔为30 d,每次灌水450 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>;在9月29日收获甜菜。

## 1.4 测定指标及方法

### 1.4.1 酶活性的测定

硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)活性的测定参照史树德(2011)的方法。

谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)活性的测定参照邹琦(2003)的方法。

### 1.4.2 植株中氮含量测定

氮含量测定参照中华人民共和国农业行业标准 NY/T 2017-2011《植物中氮、磷、钾的测定》。

### 1.4.3 氮素利用效率的计算

氮素偏生产力(kg·kg<sup>-1</sup>)=施氮区块根产量/施氮量;

氮素农学利用率(kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区块根产量-空白区块根产量)/施氮量;

氮素吸收利用率(%)=(施氮区植株氮积累量-不施氮区植株氮积累量)/施氮量×100;

氮素生理利用率(kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区块根产量-不施氮区块根产量)/(施氮区植株氮积累量-不施氮区植株氮积累量)。

## 1.5 数据统计

采用SAS 9.0进行方差分析,GraphPad Prism 5进行作图。

## 2 实验结果

### 2.1 水氮耦合对甜菜氮素吸收和分配的影响

2016和2017年水氮耦合处理对甜菜叶丛氮积累量的影响分别如图1和图2所示。从图1和2中可以看出,水氮耦合各处理甜菜叶丛(包括叶片、叶柄和青头)氮积累量在苗期差异不显著;在叶丛快速生长期,叶丛氮积累量达到最大值,且氮积累量随灌水量和施氮量的增加而增加。从图2中可看出同一施氮水平下,水分供应分别为W3和W4水平时叶丛氮积累量差异不显著;同一灌溉水平下,氮素供

应分别为N3和N4水平时叶丛氮积累量差异较小,表明水氮耦合条件下,在甜菜生长需水需肥量最大的时期,灌水量和施氮量超过W3和N3水平,叶丛吸氮量增幅变缓。在块根及糖分增长期,甜菜叶丛氮积累量随着施氮量的增加而增加,随着灌水量的增加呈下降趋势。在糖分积累期,由于前期水氮供应增加,叶丛徒长,导致下部叶片早衰,叶丛含氮量下降。以W3N2和W3N1两个处理比较,每增加1.50 g·m<sup>-2</sup>纯氮,甜菜叶丛氮积累量下降8.52 mg·株<sup>-1</sup>。

从图3和4可以看出,块根中氮积累量在叶丛快速生长期和块根及糖分增长期随施氮量和灌水

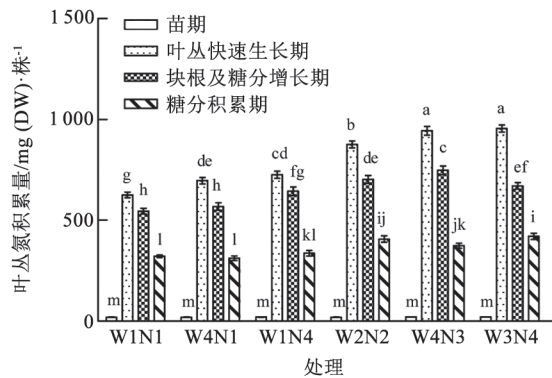


图1 水氮耦合对甜菜叶丛氮积累量的影响(2016)

Fig.1 Effect of water and nitrogen coupling on foliage nitrogen accumulation of sugar beet in 2016

不同小写字母代表差异显著( $P<0.05$ ), 下图同此。

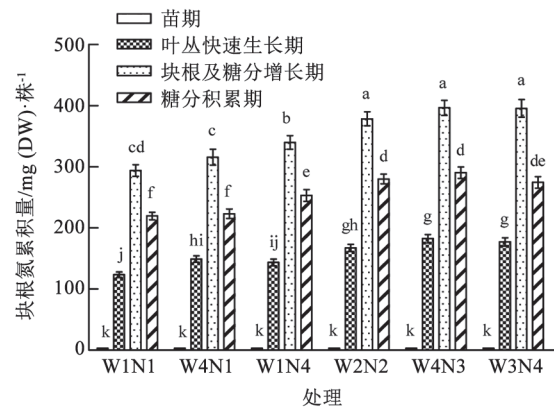


图3 水氮耦合对甜菜块根氮积累量的影响(2016)

Fig.3 Effect of water and nitrogen coupling on root nitrogen accumulation of sugar beet in 2016

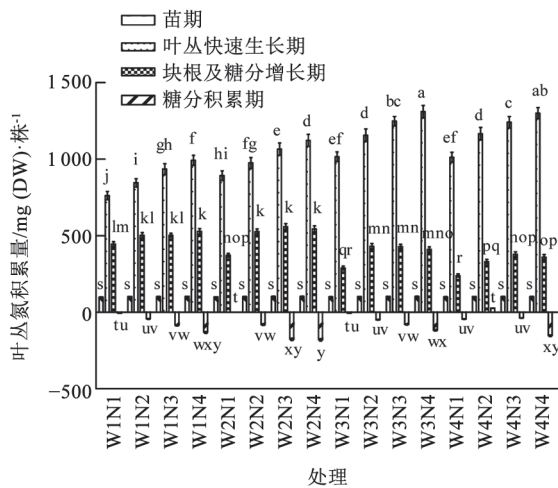


图2 水氮耦合对甜菜叶丛氮积累量的影响(2017)

Fig.2 Effect of water and nitrogen coupling on foliage nitrogen accumulation of sugar beet in 2017

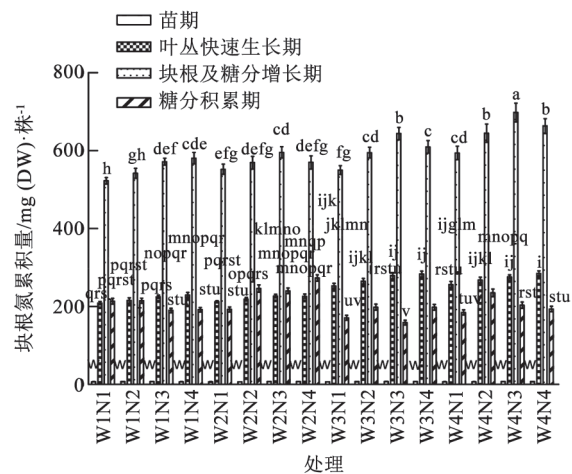


图4 水氮耦合对甜菜块根氮积累量的影响(2017)

Fig.4 Effect of water and nitrogen coupling on root nitrogen accumulation of sugar beet in 2017

量的增加呈逐渐增加的趋势,在块根及糖分增长期达到最大值。两年块根中氮积累量规律一致。

从表4中可以看出,不同生育时期叶丛氮积累量占生育期总氮积累量的比例由高到低依次是:叶丛快速生长期>块根及糖分增长期>糖分积累期>苗期,而块根中氮积累量占生育期总氮积累量的比例由高到低依次是:块根及糖分增长期>叶丛快速生长期和糖分积累期>苗期,推测甜菜生育前期积累的氮素主要以分配给叶丛为主,生育后期以分配给块根为主,从而达到源-库协调。不同水氮耦合供应使氮在甜菜地上部和地下部的分配比例不同,产质量最高的处理W2N2(2016)和W3N2(2017)叶丛和块根中氮积累量占生育期总氮积累量的比例在苗期和叶丛快速生长期适当提高,在块根及糖分增长期和糖分积累期适当减少,有利于产质量增加。

## 2.2 水氮耦合对甜菜氮同化的影响

NR是一种氧化还原酶,催化硝酸盐还原成亚硝酸盐,是氮素同化的限速酶,其活性高低代表着氮素同化能力的强弱。从图5中可以看出,甜菜叶片中NR活性在甜菜生育期呈先升高后降低的趋势,在叶丛快速生长期达到最大值。在各生育时期,同一施氮水平下, NR活性随灌水量的增加呈增加趋势;同一灌溉条件下, NR活性也随施氮量的增加呈增加趋势;在块根及糖分增长期和糖分积累期, NR活性与叶丛快速生长期规律一致,处理W3N3叶片中NR活性要高于其他处理。

从图6中可以看出,甜菜生育期叶片中GS活性呈先增加后降低的趋势,在块根及糖分增长期达到最大值,高峰期出现比NR活性要晚一个时期。在叶丛快速生长期,叶片GS活性随灌水量和施氮量的增加而增加,但N3和N4水平之间差异不显著;

表4 水氮耦合处理条件下甜菜生育期叶丛和块根中氮积累分配率

Table 4 Nitrogen accumulation and distribution rate in foliage and root of sugar beet in growth period by water and nitrogen coupling

年份	处理	不同生育时期叶丛氮积累量占生育期总氮积累量的比例/%				不同生育时期块根氮积累量占生育期总氮积累量的比例/%			
		苗期	叶丛快速生长期	块根及糖分增长期	糖分积累期	苗期	叶丛快速生长期	块根及糖分增长期	糖分积累期
		2016	W1N1	1.31	41.38	36.04	21.27	0.46	19.29
	W4N1	1.24	43.61	35.62	19.53	0.42	21.58	45.69	32.31
	W1N4	1.16	42.05	37.29	19.49	0.42	19.42	45.96	34.21
	W2N2	0.99	43.68	35.02	20.31	0.37	20.17	45.67	33.79
	W4N3	0.97	45.24	35.86	17.93	0.37	20.91	45.45	33.28
	W3N4	0.98	46.22	32.44	20.36	0.37	20.83	46.52	32.28
2017	W1N1	5.72	43.64	25.49	25.15	0.74	21.88	54.71	22.66
	W1N2	5.35	44.26	26.32	24.06	0.76	21.97	55.26	22.01
	W1N3	5.26	47.75	25.67	21.32	0.77	22.55	57.29	19.39
	W1N4	5.13	49.07	26.15	19.66	0.72	22.83	57.72	18.72
	W2N1	5.77	51.34	21.41	21.48	0.72	21.93	57.05	20.30
	W2N2	5.02	47.50	25.70	21.78	0.67	20.97	54.56	23.80
	W2N3	4.92	50.42	26.51	18.16	0.72	21.23	55.72	22.33
	W2N4	4.87	52.58	25.48	17.07	0.71	20.95	52.71	25.63
	W3N1	5.94	60.13	17.14	16.79	0.72	25.84	56.14	17.30
	W3N2	4.91	55.79	20.82	18.48	0.69	24.77	55.63	18.91
	W3N3	4.86	58.61	20.12	16.41	0.72	25.57	58.93	14.79
	W3N4	4.90	61.86	19.39	13.86	0.70	25.67	55.25	18.37
	W4N1	6.52	65.40	15.48	12.61	0.68	24.61	57.02	17.69
	W4N2	5.23	59.55	16.93	18.30	0.62	23.21	55.75	20.41
	W4N3	5.00	60.13	18.34	16.53	0.66	23.21	58.64	17.50
	W4N4	5.19	65.93	18.29	10.59	0.65	24.76	57.62	16.97



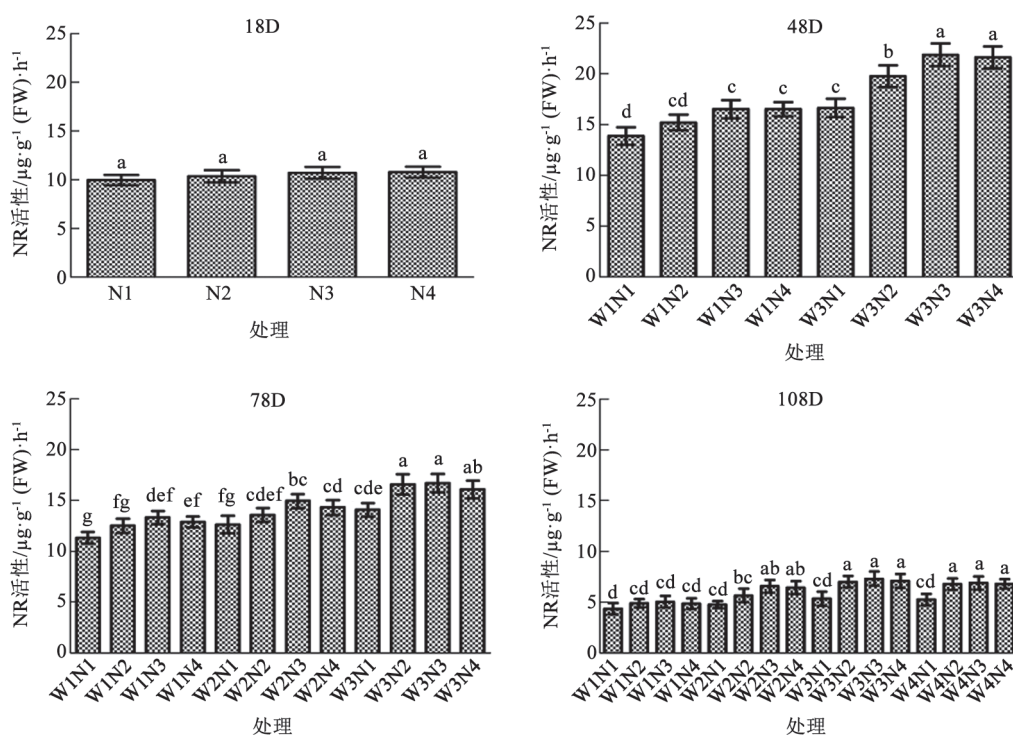


图5 水氮耦合对甜菜叶片NR活性的影响

Fig.5 Effect of water and nitrogen coupling on activity in sugar beet leaves

图中18D、48D、78D、108D均代表苗龄, 分别对应苗期、叶丛快速生长期、块根及糖分增长期和糖分积累期, 图6、7同此。

块根及糖分增长期, 叶片GS活性随灌水量和施氮量的增加呈增加趋势, 但处理W3N2、W3N3、W3N4之间差异不显著; 糖分积累期, 水氮耦合处理在N2、N3和N4水平之间差异不显著, 说明适当增加施氮量可以增加叶片GS活性。

从图7中可以看出, 块根中GS活性在甜菜生育期呈先增加后降低的趋势, 在块根及糖分增长期达到最大值, 且块根中GS活性普遍低于叶片中GS活性, 不同水氮组合处理块根中GS活性与叶片中规律表现一致。

### 2.3 水氮耦合对甜菜氮素利用效率的影响

表5为两年的水氮耦合处理下甜菜产质量情况。由表5可知2016年W2N2处理下产质量水平最高; 2017年W3N2处理下产质量水平最高。

叶丛快速生长期是甜菜生长最旺盛的时期, 这一时期甜菜生长最快, 氮素吸收、硝酸盐还原量和氮素同化酶活性最高, 因此, 在表6中对叶丛和块根中含氮量、酶活性、生长指标、含糖率和单株根重

做了相关性分析, 结果表明: 水氮耦合处理下甜菜叶丛和块根中含氮量与酶活性呈极显著正相关关系, 与叶面积指数和干物质积累呈显著正相关关系, 与含糖率呈极显著负相关关系, 与单株根重呈显著正相关关系; 单株根重与叶面积指数呈显著正相关, 与干物质积累量呈极显著正相关关系; 而含糖率与叶面积指数和干物质积累量呈显著负相关。

从表7中可以看出, 甜菜水氮耦合W3N1处理下氮素吸收利用率、氮素生理利用率、氮素偏生产力和氮素农学利用率均高于其他处理, W3N2处理下氮素利用率高于同一施氮水平其他处理, 表明灌水量适当提高可增加甜菜氮素吸收利用率。氮素吸收利用率随施氮量的增加呈降低的趋势, 2016年试验结果与2017年一致。

氮素生理利用率与氮素吸收利用率规律相同, 随着施氮量的增加呈降低的趋势。从表7中可以看出, 同一灌溉水平下, 氮素偏生产力随施氮量的增加而降低, 水氮耦合处理W3N1和W3N2分别优

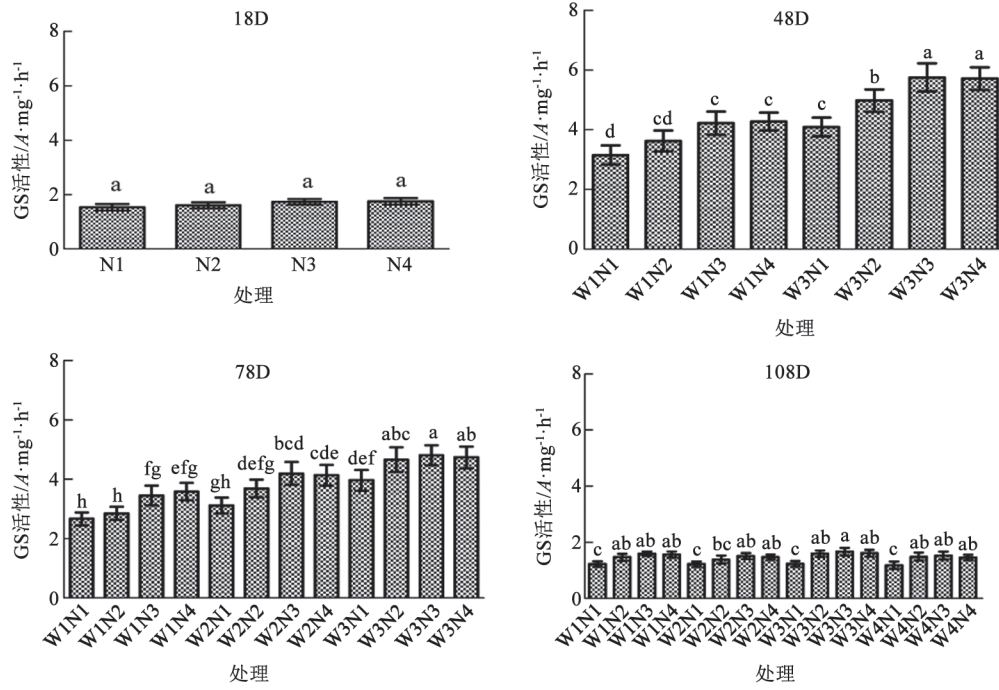


图6 水氮耦合对甜菜叶片GS活性的影响

Fig.6 Effect of water and nitrogen coupling on GS activity in sugar beet leaves

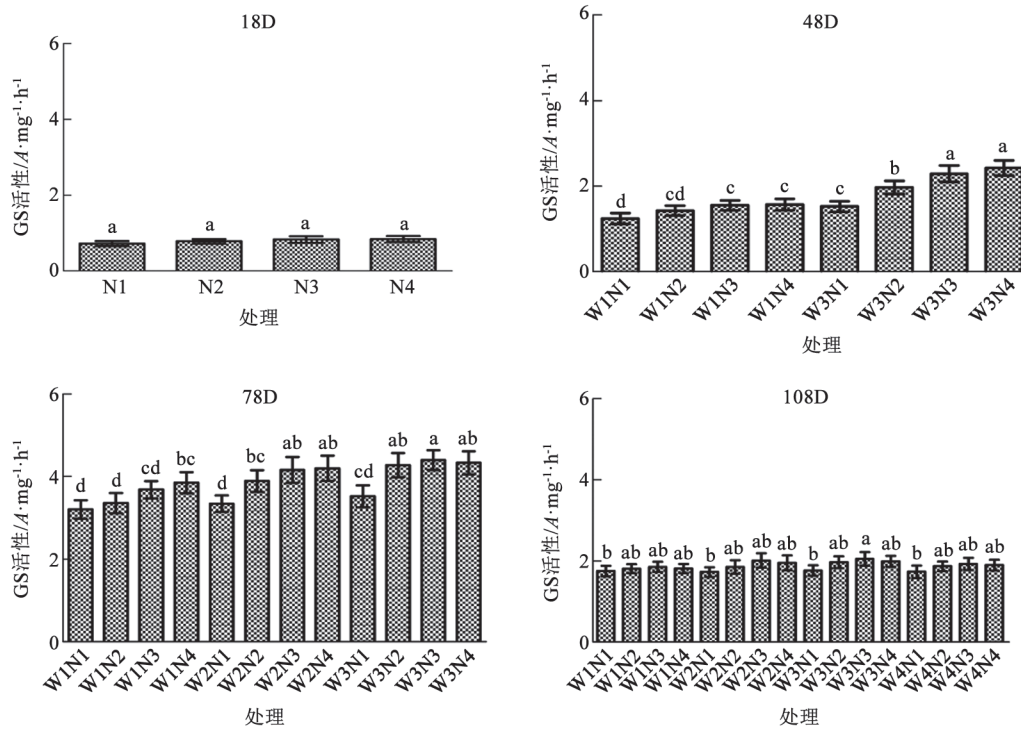


图7 水氮耦合对甜菜块根GS活性的影响

Fig.7 Effect of water and nitrogen coupling on GS activity in sugar beet roots

表5 水氮耦合对甜菜产质量的影响

Table 5 Effect of water and nitrogen coupling on the yield and quality of sugar beet

年份	处理	产量/kg·hm <sup>-2</sup>	含糖率/%	产糖量/kg·hm <sup>-2</sup>
2016	W1N1	64 257.52±2 078.05 <sup>abA</sup>	15.91±0.11 <sup>aA</sup>	10 222.99±267.22 <sup>abAB</sup>
	W4N1	68 446.80±2 247.13 <sup>aA</sup>	15.35±0.13 <sup>abAB</sup>	10 508.72±417.5 <sup>aAB</sup>
	W1N4	65 779.02±1 969.94 <sup>abA</sup>	15.59±0.07 <sup>abAB</sup>	10 254.61±355.19 <sup>abAB</sup>
	W2N2	68 119.77±632.15 <sup>aA</sup>	15.88±0.60 <sup>aA</sup>	10 818.88±474.93 <sup>aA</sup>
	W4N3	66 669.66±2 068.85 <sup>abA</sup>	15.41±0.44 <sup>abAB</sup>	10 266.68±93.21 <sup>abAB</sup>
	W3N4	65 310.11±2 075.41 <sup>abA</sup>	14.90±0.23 <sup>bB</sup>	9 735.89±461.22 <sup>bB</sup>
2017	W1N1	59 930.72±1 153.00 <sup>bcdeABC</sup>	16.69±0.28 <sup>aA</sup>	10 002.63±265.00 <sup>abcdAB</sup>
	W1N2	59 213.19±1 188.00 <sup>cdeBC</sup>	16.67±0.32 <sup>aA</sup>	9 872.98±319.00 <sup>abcdeAB</sup>
	W1N3	60 855.31±2 168.00 <sup>abcdABC</sup>	16.54±0.24 <sup>aA</sup>	10 064.30±421.00 <sup>abcAB</sup>
	W1N4	57 569.07±1 342.00 <sup>c</sup>	16.45±0.33 <sup>abA</sup>	9 467.32±218.00 <sup>efBCD</sup>
	W2N1	60 880.15±2 201.00 <sup>abcdABC</sup>	16.55±0.36 <sup>aA</sup>	10 075.27±330.00 <sup>abAB</sup>
	W2N2	60 626.12±1 058.00 <sup>abcdABC</sup>	16.54±0.33 <sup>aA</sup>	10 024.68±122.00 <sup>abcdAB</sup>
	W2N3	61 901.87±908.00 <sup>abcAB</sup>	16.15±0.15 <sup>abcdABC</sup>	9 996.47±59.00 <sup>abcdAB</sup>
	W2N4	59 599.45±683.00 <sup>bcdeABC</sup>	15.96±0.21 <sup>bcdeABC</sup>	9 509.57±114.00 <sup>defBCD</sup>
	W3N1	62 461.57±1 791.00 <sup>abAB</sup>	16.16±0.13 <sup>abcdABC</sup>	10 091.57±221.00 <sup>abAB</sup>
	W3N2	63 419.84±1 694.00 <sup>aA</sup>	16.13±0.10 <sup>abcdABC</sup>	10 229.46±295.00 <sup>aA</sup>
	W3N3	61 912.38±721.00 <sup>abcAB</sup>	15.60±0.38 <sup>deBC</sup>	9 659.23±277.00 <sup>bcdeABCD</sup>
	W3N4	59 046.80±1 202.00 <sup>cdeBC</sup>	15.44±0.39 <sup>c</sup>	9 120.84±416.00 <sup>fCD</sup>
	W4N1	60 520.09±991.00 <sup>abcdABC</sup>	16.14±0.55 <sup>abcdABC</sup>	9 762.33±192.00 <sup>abcdeABC</sup>
	W4N2	60 016.92±1 162.00 <sup>bcdeABC</sup>	16.23±0.12 <sup>abcAB</sup>	9 738.11±149.00 <sup>abcdeABCD</sup>
	W4N3	60 885.17±2 225.00 <sup>abcdABC</sup>	15.68±0.13 <sup>cdeBC</sup>	9 547.95±400.00 <sup>defABCD</sup>
	W4N4	58 647.01±1 849.00 <sup>deBC</sup>	15.47±0.35 <sup>eBC</sup>	9 066.73±119.00 <sup>fD</sup>

同列表数据用不同小写和大写字母分别表示差异达到显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )水平,表7同此。

表6 甜菜不同器官含氮量、酶活性、含糖率和单株根重的相关性

Table 6 The correlation of nitrogen contents in different organs, enzyme activities, sugar content and root weight per plant of sugar beet

	叶丛含氮量	块根含氮量	NR活性	GS活性(叶)	GS活性(根)	叶面积指数	干物质积累量	含糖率	单株根重
叶丛含氮量	1	—	—	—	—	—	—	—	—
块根含氮量	0.977**	1	—	—	—	—	—	—	—
NR活性	0.984**	0.962**	1	—	—	—	—	—	—
GS活性(叶)	0.985**	0.944**	0.993**	1	—	—	—	—	—
GS活性(根)	0.974**	0.941**	0.988**	0.983**	1	—	—	—	—
叶面积指数	0.831*	0.761*	0.800*	0.830*	0.777*	1	—	—	—
干物质积累量	0.779*	0.742*	0.711*	0.731*	0.680	0.957**	1	—	—
含糖率	-0.989**	-0.950**	-0.961**	-0.975**	-0.957**	-0.801*	-0.743*	1	—
单株根重	0.767*	0.801*	0.713*	0.687	0.660	0.789*	0.894**	-0.704	1

\*和\*\*分别表示相关性达到显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )水平。

于同一施氮水平下其他不同灌水处理,氮素农学利用率与氮素偏生产力规律一致。两年试验结果一致。

### 3 讨论

氮素是植物生长的重要营养元素,主要以 $\text{NO}_3^-$

和 $\text{NH}_4^+$ 的形式被植物吸收利用。 $\text{NO}_3^-$ 需要在NR和亚硝酸还原酶作用下还原成 $\text{NH}_4^+$ 后被植物利用,95%以上的 $\text{NH}_4^+$ 需要通过GS途径同化(莫良玉等2001)。NR和GS在氮同化中起关键作用(谷岩等2013)。NR是氮代谢中的关键酶,也是限速酶。李曼等(2017)研究表明,高氮使干旱胁迫的黄瓜(*Cu-*

表7 水氮耦合对甜菜氮素利用率的影响

Table 7 Effect of water and nitrogen coupling on the nitrogen use efficiency of sugar beet

年份	处理	施氮量/kg·hm <sup>-2</sup>	氮素吸收利用率/%	氮素生理利用率/kg·kg <sup>-1</sup>	氮素偏生产力/kg·kg <sup>-1</sup>	氮素农学利用率/kg·kg <sup>-1</sup>
2016	W1N1	75	53.19 <sup>bAB</sup>	181.91 <sup>bB</sup>	856.77 <sup>bB</sup>	96.77 <sup>bB</sup>
	W4N1	75	68.68 <sup>aA</sup>	222.24 <sup>aA</sup>	912.62 <sup>aA</sup>	152.62 <sup>aA</sup>
	W1N4	315	21.35 <sup>dD</sup>	130.57 <sup>cC</sup>	208.82 <sup>eE</sup>	27.87 <sup>eD</sup>
	W2N2	179	55.44 <sup>bAB</sup>	111.91 <sup>cD</sup>	380.09 <sup>cC</sup>	62.05 <sup>cC</sup>
	W4N3	242	45.47 <sup>bBC</sup>	87.76 <sup>dDE</sup>	275.12 <sup>dD</sup>	39.90 <sup>dD</sup>
	W3N4	315	33.82 <sup>cD</sup>	78.00 <sup>dE</sup>	207.33 <sup>eE</sup>	26.38 <sup>eD</sup>
2017	W1N1	75	53.58 <sup>bcBCD</sup>	184.92 <sup>aAB</sup>	799.08 <sup>bB</sup>	99.09 <sup>eB</sup>
	W1N2	150	36.66 <sup>efGHI</sup>	122.09 <sup>cdCD</sup>	394.75 <sup>dC</sup>	44.76 <sup>efGDE</sup>
	W1N3	225	28.77 <sup>ghHI</sup>	129.06 <sup>cC</sup>	270.47 <sup>eD</sup>	37.14 <sup>gEF</sup>
	W1N4	300	24.37 <sup>hi</sup>	69.34 <sup>hG</sup>	191.90 <sup>fE</sup>	16.90 <sup>hG</sup>
	W2N1	75	61.21 <sup>abABC</sup>	182.54 <sup>abAB</sup>	811.74 <sup>bAB</sup>	111.75 <sup>bB</sup>
	W2N2	150	49.05 <sup>cdDEF</sup>	110.46 <sup>deCDE</sup>	404.17 <sup>cdC</sup>	54.18 <sup>eD</sup>
	W2N3	225	38.90 <sup>efFGH</sup>	107.42 <sup>deCDE</sup>	275.12 <sup>eD</sup>	41.79 <sup>fgDE</sup>
	W2N4	300	30.61 <sup>fghGHI</sup>	77.30 <sup>ghFG</sup>	198.66 <sup>fE</sup>	23.67 <sup>hFG</sup>
	W3N1	75	68.27 <sup>aA</sup>	194.56 <sup>aA</sup>	832.82 <sup>aA</sup>	132.83 <sup>aA</sup>
	W3N2	150	55.59 <sup>bcBCD</sup>	130.97 <sup>cC</sup>	422.80 <sup>cC</sup>	72.81 <sup>dC</sup>
	W3N3	225	41.72 <sup>deEFG</sup>	100.26 <sup>deDEF</sup>	275.17 <sup>eD</sup>	41.84 <sup>fgDE</sup>
	W3N4	300	32.73 <sup>fghGHI</sup>	66.68 <sup>hG</sup>	196.82 <sup>fE</sup>	21.83 <sup>hG</sup>
	W4N1	75	64.08 <sup>aAB</sup>	166.89 <sup>bB</sup>	806.93 <sup>bAB</sup>	106.95 <sup>bcB</sup>
	W4N2	150	51.92 <sup>cCDE</sup>	96.51 <sup>efEF</sup>	400.11 <sup>dC</sup>	50.12 <sup>eDE</sup>
W4N3	225	41.52 <sup>deEFG</sup>	89.75 <sup>fgEFG</sup>	270.60 <sup>eD</sup>	37.27 <sup>gEF</sup>	
W4N4	300	31.14 <sup>fghGHI</sup>	65.80 <sup>hG</sup>	195.49 <sup>fE</sup>	20.49 <sup>hG</sup>	

*cumis sativus*)叶片NR活性显著提高。于海彬等(1993)研究表明,甜菜叶片NR活性与施氮量密切相关,随施氮量增加而提高。但NR活性受气候条件、地上部生长状况和根系吸收能力影响较大。本研究结果表明,NR活性随施氮量和灌水量的增加而增加,甜菜叶片中NR活性在叶丛快速生长期达到最高值,在糖分积累期迅速下降。GS/GOGAT途径的主要作用是同化光呼吸产生的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和硝酸盐还原的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,GS是这个途径的多功能酶,参与多个调节过程。王月福等(2012)对冬小麦(*Triticum aestivum*)研究表明,提高GS活性可以促进氨基酸合成和转化。张翼飞(2013)研究表明,甜菜叶片和块根中GS活性随施氮量的增加而增加,但施氮过量使块根中GS活性降低,且甜菜生育前期叶片GS活性高于生育后期,本研究结果表明甜菜叶片GS活性与硝酸还原酶活性规律一致,而块根中GS活性在块根及糖分增长期达到最大值。

不同作物氮素利用效率也不同,武姣娜等

(2018)研究表明,覆膜春玉米(*Zea mays*)施氮量为0~250 kg·hm<sup>-2</sup>时可以促进氮素吸收,春玉米产量也提高,但施氮量为250~400 kg·hm<sup>-2</sup>时,氮素吸收和产质量差异不显著(王泽林等2019)。汪俊玉等(2018)研究表明,与不施氮相比,施氮显著增加了番茄(*Lycopersicon esculentum*)产量,但施氮过量反而降低了番茄产量。可见,作物施氮也要适量。程明瀚等(2018)研究表明,水氮耦合条件下青椒适宜施氮量是120 kg·hm<sup>-2</sup>,施氮过量造成其在土壤中过分残留从而抑制根系对水分的吸收和利用。赵庆鑫等(2017)研究表明,在适量施氮条件下,甘薯(*Ipomoea batatas*)获得高产的关键是促进地上部氮元素向块根中转运,提高收获期在块根中的分配率。本研究结果表明,水氮耦合显著提高甜菜对氮素吸收,不同水氮组合处理甜菜叶丛含氮量在叶丛快速生长期达到最大值,且随着灌水量和施氮量的增加而增加,过量施氮反而不利于氮素吸收。块根中含氮量在块根及糖分增长期达到最高峰,说明甜菜氮



代谢在叶丛快速生长期和块根及糖分增长期处于主导地位。叶丛氮吸收量在糖分积累期随施氮量的增加而降低,是因为甜菜生育前期施氮和灌水较多的处理使地上部生物量大,后期由于光和营养的影响,致使下部叶片衰老枯死,叶丛生物量减少幅度较大,从而导致叶丛氮吸收量大幅降低。叶丛和块根中氮积累量占生育期总氮积累量的比例在苗期和叶丛快速生长期适当提高,在块根及糖分增长期和糖分积累期适当减少时,可以促进甜菜生长,防止后期早衰,而且甜菜产质量最高。

刘明等(2018)研究表明,不同水氮栽培模式下,增加施氮量可以提高玉米产量,而氮素利用效率随着施氮量的增加呈先增加后减小的趋势。陆晓松等(2019)研究表明,随着施氮量增加,小麦产量增大,氮肥利用率减小;当施氮量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量增大趋势减弱,甚至降低。吕伟生等(2018)研究表明,施氮量超过 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,早稻(*Oryza sativa*)氮肥偏生产力、吸收利用率、生理利用率及农学利用率均随施氮量的增加而不断降低。李强等(2008)研究表明,在新疆地区施氮量达到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,甜菜产糖量最高。本研究表明,甜菜氮素利用率随施氮量增加而减小,同一施氮水平下,灌水量在 $1\ 350 \sim 1\ 427 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮素利用率要高于其他灌溉水平,说明灌水促进了植株对氮素的利用,但灌水过量反而使甜菜氮素利用率降低;施氮量在 $150 \sim 179.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,甜菜产质量最高。因此,膜下滴灌条件下,水氮耦合有利于甜菜对氮素的吸收、同化和利用,促进节水减肥。

#### 参考文献(References)

- Cao Y, Sun N, Sun GR, et al (2016). The effect of fertilizer input to yield of sugar beet in Yili region. *J Anhui Agr Sci*, 44 (31): 137-139 (in Chinese with English abstract) [曹禹, 孙娜, 孙桂荣等(2016). 氮·磷·钾肥对伊犁地区甜菜产量的影响. *安徽农业科学*, 44 (31): 137-139]
- Cheng MH, Hao ZY, Yang SL, et al (2018). The interactive impact of water and nitrogen on greenhouse green pepper under film-mulched drip irrigation. *Irrig Drain*, 37 (11): 50-56 (in Chinese with English abstract) [程明瀚, 郝仲勇, 杨胜利等(2018). 膜下滴灌条件下温室青椒的水氮耦合效应. *灌溉排水学报*, 37 (11): 50-56]
- Fei C, Geng QY, Li YY, et al (2015). Effect of nitrogen application on yield and sugar mass fraction of root tuber in drip irrigated sugarbeet. *Acta Agr Boreali-Occident Sin*, 24 (11): 101-106 (in Chinese with English abstract) [费聪, 耿青云, 李阳阳等(2015). 氮肥运筹对露播滴灌甜菜产量和块根糖质量分数的影响. *西北农业学报*, 24 (11): 101-106]
- Hergert GW (2010). Sugar beet fertilization. *Sugar Tech*, 12 (3-4): 256-266
- Gu Y, Hu WH, Xu BJ, et al (2013). Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation. *Acta Ecol Sin*, 33 (23): 7399-7407 (in Chinese with English abstract) [谷岩, 胡文河, 徐百军等(2013). 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响. *生态学报*, 33 (23): 7399-7407]
- Li M, Dong YH, Cui QQ, et al (2017). Effects of water-nitrogen coupling on the metabolites and key enzyme activities of carbon and nitrogen metabolism in cucumber leaves under doubled  $\text{CO}_2$  concentration. *Plant Physiol J*, 53 (9): 1717-1727 (in Chinese with English abstract) [李曼, 董彦红, 崔青青等(2017).  $\text{CO}_2$ 浓度加倍下水氮耦合对黄瓜叶片碳氮代谢及其关键酶活性的影响. *植物生理学报*, 53 (9): 1717-1727]
- Li Q, Zhang JX, Gan YZ (2008). Effect of nitrogen application on accumulation and distribution of dry matter and yield and quality of high-yielding sugar beet. *Agr Res Arid Areas*, 26 (5): 55-59 (in Chinese with English abstract) [李强, 章建新, 甘玉柱(2008). 施氮对高产甜菜干物质积累分配及产量和品质的影响. *干旱地区农业研究*, 26 (5): 55-59]
- Liu M, Zhang ZX, Zheng EN, et al (2018). Photosynthesis, water and nitrogen use efficiency of maize as impacted by different combinations of water and nitrogen applications. *Irrig Drain*, 37 (12): 27-34 (in Chinese with English abstract) [刘明, 张忠学, 郑恩楠等(2018). 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究. *灌溉排水学报*, 37 (12): 27-34]
- Lu XS, Yu DS, Xu ZC, et al (2019). Study on comprehensive quantitative relationship of soil fertility quality and nitrogen application rate with wheat nitrogen use efficiency. *Acta Pedol Sin*, 56 (2): 1-7 (in Chinese with English abstract) [陆晓松, 于东升, 徐志超等(2019). 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究. *土壤学报*, 56 (2): 1-7]
- Lü WS, Zeng YJ, Shi QH, et al (2018). Proper nitrogen fertilizer application improving yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted double rice. *J Soil Water Conserv*, 32 (6): 259-268 (in Chinese with English abstract) [吕伟生, 曾勇军, 石庆华等(2018). 合理氮肥运筹提高双季机插稻产量及氮肥利用率. *水土保持学报*,

- 32 (6): 259–268]
- Mo LY, Wu LH, Tao QN (2001). Research advances on GS/GOGAT cycle in higher plants. *J Plant Nutr Fert*, 7 (2): 223–231 (in Chinese with English abstract) [莫良玉, 吴良欢, 陶勤南(2001). 高等植物GS/GOGAT循环研究进展. *植物营养与肥料学报*, 7 (2): 223–231]
- Trifonov P, Lazarovitch N, Arye G (2018). Water and nitrogen productivity of potato growth in desert areas under low-discharge drip irrigation. *Water*, 970 (10): 1–16
- Shi SD, Sun YQ, Wei L (2011). *Plant Physiology Experiment Guidance*. Beijing: China Forestry Publishing House (in Chinese) [史树德, 孙亚卿, 魏磊(2011). *植物生理学实验指导*. 北京: 中国林业出版社]
- Wang JY, Liu DY, Song XJ, et al (2018). Study on the suitable amount of nitrogen fertilizer for tomato under drip irrigation and fertilizer integration. *Soil Fert Sci China*, (6): 98–103 (in Chinese with English abstract) [汪俊玉, 刘东阳, 宋霄君等(2018). 滴灌水肥一体化条件下番茄氮肥适宜用量探讨. *中国土壤与肥料*, (6): 98–103]
- Wang HD, Li J, Cheng MH, et al (2019). Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber. *Sci Hortic*, 243: 357–366
- Wang YF, Yu ZW, Li SX, et al (2002). Effect of nitrogen nutrition on the change of key enzyme activity during the nitrogen metabolism and kernel protein content in winter wheat. *Acta Agron Sin*, 28 (6): 743–748 (in Chinese with English abstract) [王月福, 于振文, 李尚霞等(2002). 氮素营养水平对冬小麦氮代谢关键酶活性变化和籽粒蛋白质含量的影响. *作物学报*, 28 (6): 743–748]
- Wang ZL, Bai J, Li Y, et al (2019). Effects of nitrogen application and plastic mulching on nitrogen uptake and allocation in dry-land spring maize. *J Plant Nutr Fert*, 25 (1): 74–84 (in Chinese with English abstract) [王泽林, 白炬, 李阳等(2019). 氮肥施用和地膜覆盖对旱作春玉米氮素吸收及分配的影响. *植物营养与肥料学报*, 25 (1): 74–84]
- Wu JN, Wei XD, Li X, et al (2018). Research progress in nitrogen use efficiency in plants. *Plant Physiol J*, 54 (9): 1401–1408 (in Chinese with English abstract) [武姣娜, 魏晓东, 李霞等(2018). 植物氮素利用效率的研究进展. *植物生理学报*, 54 (9): 1401–1408]
- Yu HB, Cai B, Sun GQ, et al (1993). Studies on nitrate reductase activity in sugar beet. *China Sugar Beet*, (3): 18–23 (in Chinese with English abstract) [于海彬, 蔡葆, 孙国琴等(1993). 甜菜硝酸还原酶活性研究. *中国甜菜*, (3): 18–23]
- Zhang X, Meng FQ, Li H, et al (2019). Optimized fertigation maintains high yield and mitigates N<sub>2</sub>O and NO emissions in an intensified wheat–maize cropping system. *Agr Water Manage*, 211: 26–36
- Zhang YF (2013). Study on regulation mechanism of nitrogen application to nitrogen assimilation and carbon metabolism in sugar beet (*beta vulgaris* L.) (dissertation). Harbin: Northeast Agricultural University (in Chinese with English abstract) [张翼飞(2013). 施氮对甜菜氮素同化与碳代谢的调控机制研究(学位论文). 哈尔滨: 东北农业大学]
- Zhao QX, Jiang Y, Shi CY, et al (2017). Effect of nitrogen-potassium interaction on absorption and translocation of nitrogen and potassium in sweetpotato and the root yield. *Plant Physiol J*, 53 (5): 889–895 (in Chinese with English abstract) [赵庆鑫, 江燕, 史春余等(2017). 氮钾互作对甘薯氮钾元素吸收、分配和利用的影响及与块根产量的关系. *植物生理学报*, 53 (5): 889–895]
- Zou Q (2003). *Plant Physiology Experiment Guidance*. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [邹琦(2003). *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社]

## Effects of water and nitrogen supply on nitrogen assimilation and utilization of sugar beet (*Beta vulgaris*) with drip irrigation under plastic mulch

LI Zhi<sup>1,2</sup>, LI Guo-Long<sup>1</sup>, SUN Ya-Qing<sup>1</sup>, SU Wen-Bin<sup>2</sup>, FAN Fu-Yi<sup>2</sup>, ZHANG Shao-Ying<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*Sugar Beet Physiological Institute, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*

<sup>2</sup>*Special Crops Institute, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China*

**Abstract:** Sugar beet (*Beta vulgaris*) is an important sugar crop in north China, and its root is used as raw materials for sugar extraction. Scientific management of water and fertilizer is an important agronomic measure in crop cultivation. In the production of sugar beet, excessive nitrogen application often results in uncoordinated source-sink relationship, and thus decrease beet yield and sugar content. The aim of this study was to investigate the effects of different water and nitrogen supply on nitrogen utilization related physiological characteristics and yield and sugar content of beet. The experiment was conducted in Liangcheng County, Inner Mongolia from 2016 to 2017. The research results may provide theoretical basis for rational water and nitrogen management in sugar beet production. The results showed that the nitrogen absorption of sugar beet, activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthase (GS) in leaves increased with increasing nitrogen and water application with drip irrigation under plastic mulch. The leaf NR and GS activities were maximum in leaf fast growth stage, and the root showed highest GS activity in root and sugar growth period, which was consistent with the growth rates of different organs. With the increase of nitrogen application, absorption and utilization rate, partial productivity, the physiological utilization and agronomic utilization of nitrogen fertilizer all decreased. During the whole growth stage of sugar beet, application of 1 350–1 427 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> irrigation and 150–179.22 kg·hm<sup>-2</sup> nitrogen was propitious to the rise of yield and sugar content, and had the same effect on utilization efficiency of water and nitrogen.

**Key words:** sugar beet (*Beta vulgaris*); water and nitrogen coupling; nitrogen assimilation; nitrogen use efficiency; yield and quality

---

Received 2019-05-05 Accepted 2019-06-04

This work was supported by China Agriculture Research System (CARS-170201).

\*Corresponding author (syzh36@aliyun.com).