

引用格式:

苗为伟, 杨启良, 熊凯, 韩焕豪, 刘小刚, 周平, 曹春号. 水氮耦合下小桐子的生长特性及其根区土壤的水氮迁移[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 553–561.

MIAO W W, YANG Q L, XIONG K, HAN H H, LIU X G, ZHOU P, CAO C H. Characterization of the growth of *Jatropha curcas* under water-nitrogen coupling condition and its root soil water and nitrogen migration[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(5): 553–561.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



水氮耦合下小桐子的生长特性及其根区土壤的水氮迁移

苗为伟, 杨启良*, 熊凯, 韩焕豪, 刘小刚, 周平, 曹春号

(昆明理工大学农业与食品学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 采用 3 个滴灌灌水水平(10、20、30 mm, 分别记为 W1、W2、W3)和 3 个施氮水平(尿素)(0、90、180 g/株, 分别记为 N0、N1、N2)的耦合方式对 1 年生小桐子进行灌溉和施肥处理, 研究小桐子的生理生长特性, 并探索小桐子根区土壤的水氮迁移规律。结果表明: 水氮耦合对小桐子的株高、茎粗和生物量具有显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的影响, 且二者间存在着一定的互作效应; 在 W1 低水处理下, 施加适量的氮肥可促进小桐子的生长和干物质积累; 当灌水水平相同时, N1 处理的小桐子的茎粗、株高和所测生物量指标值均较大; 当施氮水平相同时, W2 处理的小桐子的茎粗、株高和所测生物量指标值均较大; 纵向上, 2016 年 6、9 月根系所在中层(>20~40 cm)土壤含水率均值最高, 深层(>40~60 cm)的其次, 浅层(0~20 cm)的最小, 2017 年 6、9 月各土层深度水分分布比较均匀, 在施氮处理(N1、N2)下, 2016 年 6 月深层土壤的硝态氮质量分数随着灌水水平的增加而提高, W3 处理对比 W1 和 W2 处理更容易导致硝态氮的淋失; 横向上, 距树干 10 cm 测量点的硝态氮质量分数始终低于距树干 30 cm 测量点的, 2016 年 6、9 月水分的横向分布保持与硝态氮的分布规律一致, 处理 1 年后由于小桐子须根生长, 受导流作用影响, 使得 2017 年 6、9 月水分在中层土壤中横向分布发生改变。在本研究条件下, 施尿素 90 g 和滴灌 20 mm 灌水水平的处理为有利于小桐子生长的最优水氮耦合处理。

关 键 词: 小桐子; 水氮耦合; 滴灌; 环形施肥; 土壤; 硝态氮分布; 水分分布; 迁移

中图分类号: S794.9

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)05-0553-09

Characterization of the growth of *Jatropha curcas* under water-nitrogen coupling condition and its root soil water and nitrogen migration

MIAO Weiwei, YANG Qiliang*, XIONG Kai, HAN Huanhao, LIU Xiaogang, ZHOU Ping, CAO Chunhao

(School of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to study the physiological growth characteristics of annual seedling of *Jatropha curcas* and explore the law of water and nitrogen transfer in the root soil of *Jatropha curcas* under three drip irrigation levels, 10 mm(W1), 20 mm(W2) and 30 mm(W3), and three nitrogen(urea) levels, 0 g(N0), 90 g(N1) and 180g(N3) pre tree were applied. The results showed that the coupling of water and nitrogen had significant($P<0.05$) or extremely significant($P<0.01$) effects on the plant height, stem diameter and biomass of *Jatropha curcas* with some interaction effects between them. Under W1 treatment, the growth and dry matter accumulation could be promoted by applying appropriate nitrogen fertilizer. The values of stem diameter, plant height and measured biomass of N1 were larger than those of the others treatments when only considering the N treatment, while for the irrigation condition, W2 group had larger values of stem

收稿日期: 2020-02-21

修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379004); 云南省高校特色作物高效用水与绿色生产重点实验室项目(KKPS201923009)

作者简介: 苗为伟(1996—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事农业节水灌溉与智能化测控技术研究, 1457754563@qq.com; *通信作者, 杨启良, 教授, 主要从事农业节水与生态环境效应研究, yangqilianglovena@163.com

diameter, plant height and measured biomass. Longitudinally, the mean water content achieved the peak in the middle layer(>20-40 cm) from the 2016 June and September root, followed by the deep layer(>40-60 cm) and the shallow layer(0-20 cm). The water distribution was more uniform across soil depths in June and September 2017. Under nitrogen treatment(N1, N2), the mass fraction of nitrate nitrogen in the deep soil layer in June 2016 increased over the increasing of irrigation level, and W3 treatment was more likely to lead to nitrate nitrogen leaching than W1 and W2 treatment. Horizontally, the mass fraction of nitrate nitrogen at the measuring point 10 cm away from the trunk was lower than that at the 30 cm away from the trunk. The horizontal distribution of water keeps the same distribution rule with nitrate nitrogen in June and September, 2016. In June and September, 2017, due to the diversion of *Jatropha curcas* fibrous roots, the horizontal distribution of water in the middle soil changed. Based on the study, we concluded that the treatment with 90 g per tree of urea and 20 mm of drip irrigation level was the optimal treatment for the growth of *Jatropha curcas*.

Keywords: *Jatropha curcas*; water-nitrogen coupling; drip irrigation; circular fertilization; soil; nitrate nitrogen distribution; moisture distribution; migration

小桐子(*Jatropha curcase* L.)为大戟科、麻疯树属能源植物,属多年生落叶灌木或小乔木。小桐子具有生长较快、耐寒、耐旱、耐侵蚀等特性^[1],具有恢复植被、修复污染土壤等改善生态环境的作用^[2],可用于生物医药^[3-4]和生物饲料^[5-7]等,其种子含非食用油量高达 40%~60%,可替代柴油作为燃料^[8-9],是生产生物柴油^[10]的原料树种,具有重要的开发利用价值。

云南干热河谷地区光热资源丰富,但水资源缺乏,成为限制该地区农业生产发展的瓶颈。近年来,小桐子因具有较强的耐旱特性成为该地区发展的新兴产业^[11],而如何提高小桐子的生物量和果实产量成为亟需解决的问题。目前,大多数研究^[11-16]集中在不同水氮耦合处理的小桐子的生长、形态特征和水分、养分吸收利用等方面。研究^[12,16]发现,采用适当的灌水定额进行交替灌溉处理小桐子,可提高叶片、叶柄、冠层和整株的贮存水调节能力,过高或过低的灌水量均不利于小桐子的生长;小桐子生理生长特性及干物质积累等受土壤含水量的影响显著。小桐子根系主要分布于土层深度 20~40 cm 的范围内,且沿水平方向生长;小桐子根系生长及根区水肥状况对其水肥利用效率影响显著^[13]。

确定适宜小桐子生长的水氮量和研究小桐子根区土壤水氮的分布规律具有重要意义。本研究中,在不同的水氮耦合条件下,研究小桐子的生理生长特性,并探索小桐子根区的水氮迁移规律,旨在为揭示小桐子抗旱能力强的生理机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小桐子 1 年生幼树来自云南元谋干热河谷区。供试土壤为燥红壤土,田间持水量为 24.8%,土壤有机质、全氮、全磷、全钾质量分数分别为 4.89、0.71、0.24、6.90 g/kg。

1.2 试验设计

试验于 2016 年 2 月至 2017 年 10 月在昆明理工大学现代农业工程学院的玻璃温室(N102°08', E25°01')进行。于 2016 年 2 月 10 日,挑选已移植于玻璃温室且长势均匀的小桐子幼树,并统一浇水至田间持水量。于 2016 年 3 月 10 日开始水分处理,采用滴灌压力补偿式滴头进行灌水。试验设 10、20、30 mm 共 3 个灌水水平,分别记为 W1、W2、W3,灌水周期为 20 d 或 21 d,水分处理持续至 2017 年 9 月 10 日,共浇水 28 次,W1、W2、W3 灌溉定额分别为 280、560、840 mm。于 2016 年 3 月 20 日施肥,氮肥处理设添加分析纯尿素 0、90、180 g/株共 3 个水平,分别记为 N0、N1、N2,另外每株统一施 100 g 磷酸二氢钾。于距离树干 20 cm 处的环形位置施肥和滴灌,施肥深度为 15 cm。试验采用完全耦合设计,共 9 组处理(W1N0、W1N1、W1N2、W2N0、W2N1、W2N2、W3N0、W3N1、W3N2)。试验小区规格为 12 m×8 m,行距为 1.25 m,株距为 1.00 m。1 行为 1 个处理,每个处理共定植 6 株小桐子幼树。为防止水氮的侧渗,每个处理两侧设置埋深 60 cm 的不透水薄膜。试验期间其他田间管理均保持一致。

1.3 测定项目与方法

1) 株高和茎粗测定。自 2016 年 6 月 1 日至当年 12 月 20 日, 除第 1、2 次只间隔 18 d 外, 每 20 d 或 21 d 用直尺测定株高, 用螺旋测微仪测定基茎粗。因小桐子幼苗生长过快, 故在第 2 年进行了修枝处理。小桐子有了侧枝后, 因无法统一标准进行统计, 故采用第 1 年的生长情况。

2) 土壤水分和硝态氮测定。于 2016、2017 年的 6 月 6 日和 9 月 6 日, 在距离小桐子幼树树干 10、30 cm 处分别取土, 深度为 0~60 cm, 垂直方向每 10 cm 取 1 层土, 每个点共取土 6 层, 其中 0~20 cm 为浅层、>20~40 cm 为中层、>40~60 cm 为深层。每个处理随机取样 3 次。采用烘干法测定土壤含水率; 采用紫外可见分光光度计测定土

壤硝态氮质量分数。

3) 生物量测定。于 2016、2017 年的 10 月 26 日, 每个处理选取长势均匀一致的小桐子树测定生物量, 包括小桐子叶片数、叶干质量、主杆干质量、根干质量和主根长。

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 20.0 进行显著性分析; 运用 Excel 2016 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对小桐子茎粗和株高的影响

由表 1 可知, 小桐子的茎粗和株高受灌水水平、施氮处理的影响效果相似, 随着种植时间的增

表 1 水氮耦合下小桐子的茎粗和株高及其方差分析

Table 1 Stem diameter and plant height of <i>Jatropha curcas</i> under water-nitrogen coupling and its variance analysis								
处理	茎粗/mm							
	06-01	06-20	07-10	07-30	08-20	09-10	09-30	10-20
W1N0	(14.60±0.40)c	(15.20±0.20)c	(17.89±1.02)f	(19.69±1.09)c	(22.39±1.22)f	(25.45±1.14)f	(28.41±1.32)d	(30.15±1.95)f
W1N1	(15.97±0.15)ab	(16.93±0.19)b	(21.01±1.46)ab	(26.23±2.28)b	(30.17±1.44)ab	(34.27±1.76)abc	(36.75±0.81)ab	(38.79±1.32)abc
W1N2	(15.83±0.18)ab	(16.56±0.66)b	(20.25±0.27)cd	(23.17±0.49)b	(27.46±0.42)e	(29.95±1.34)e	(32.37±0.62)c	(33.35±0.76)e
W2N0	(15.82±0.15)bc	(16.46±0.58)b	(19.16±0.78)de	(23.56±1.11)a	(26.43±0.53)de	(30.81±0.88)de	(32.92±1.27)c	(35.59±0.95)d
W2N1	(16.80±0.17)a	(19.05±0.34)a	(22.02±0.14)a	(27.45±1.54)a	(33.67±0.89)a	(34.94±1.52)a	(37.73±1.81)a	(39.67±0.20)a
W2N2	(16.13±0.24)ab	(16.93±0.07)b	(19.54±0.79)de	(26.56±1.37)b	(28.96±0.87)cd	(32.75±0.50)bcd	(35.53±0.81)ab	(37.53±1.05)bcd
W3N0	(14.91±0.15)c	(15.67±0.48)c	(18.22±1.43)ef	(20.71±0.77)c	(23.45±1.06)f	(25.95±0.41)f	(29.30±1.66)d	(31.79±1.37)fe
W3N1	(16.53±0.99)a	(18.79±1.15)a	(21.57±0.67)bc	(26.43±0.53)a	(30.96±0.88)ab	(34.72±0.93)ab	(37.71±0.60)a	(39.16±0.98)ab
W3N2	(15.94±0.24)bc	(16.90±0.58)b	(20.63±0.38)e	(24.47±0.41)bc	(28.77±0.88)f	(32.26±1.27)cd	(35.19±1.23)b	(36.97±0.86)cd
W	*	*	**	**	**	**	**	**
N	**	**	**	**	**	**	**	**
W×N			*	**	**	**	**	**

处理	茎粗/mm			株高/cm			
	11-10	11-30	12-20	06-01	06-20	07-10	07-30
W1N0	(30.99±1.74)d	(32.04±1.42)e	(33.67±1.41)e	(25.60±0.88)d	(27.00±1.00)f	(30.67±0.76)d	(39.67±1.53)f
W1N1	(40.76±0.52)a	(40.85±0.86)bc	(41.70±1.16)b	(26.67±0.58)bc	(34.67±2.52)cd	(55.33±3.51)b	(78.67±5.51)c
W1N2	(33.56±0.86)c	(35.86±0.98)d	(36.57±0.68)d	(26.00±0.44)dc	(29.33±0.50)ef	(37.00±5.00)c	(61.33±5.69)d
W2N0	(37.84±1.35)b	(40.33±1.54)c	(41.46±0.78)b	(26.67±0.44)bc	(32.00±1.00)f	(59.00±2.65)b	(81.00±4.58)c
W2N1	(41.65±1.80)a	(43.09±1.29)a	(44.12±0.44)a	(27.33±0.29)a	(40.33±3.06)a	(71.33±2.52)a	(102.67±4.16)a
W2N2	(39.51±1.21)ab	(41.46±0.98)abc	(42.56±0.89)ab	(26.87±0.44)b	(38.67±1.53)ab	(60.67±1.53)b	(89.67±2.08)b
W3N0	(34.78±1.28)c	(37.33±0.65)d	(39.26±1.20)c	(26.33±0.44)c	(27.33±1.53)e	(31.67±3.21)d	(49.00±2.00)e
W3N1	(41.07±1.30)a	(42.65±0.72)ab	(43.68±1.17)a	(27.25±0.58)a	(37.33±2.08)ab	(69.67±2.31)a	(93.67±5.86)b
W3N2	(39.43±1.00)ab	(40.74±0.98)bc	(41.55±1.35)b	(26.67±0.29)bc	(35.33±2.52)bc	(58.33±3.79)b	(80.33±6.43)b
W	**	**	**	*	**	**	**
N	**	**	**	*	**	**	**
W×N	**	**	**		*	**	**

表 1(续)

处理	株高/cm						
	08-20	09-10	09-30	10-20	11-10	11-30	12-20
W1N0	(62.67±0.58)f	(85.67±2.52)f	(106.33±4.73)g	(128.33±3.06)e	(139.67±3.51)e	(140.67±4.93)e	(144.67±4.16)f
W1N1	(103.33±2.08)c	(123.00±2.65)c	(147.33±3.79)d	(160.00±3.61)c	(166.00±8.19)d	(171.00±7.00)c	(189.33±5.51)d
W1N2	(92.33±4.16)de	(117.67±4.16)c	(135.67±2.08)e	(145.00±5.57)d	(148.33±5.51)e	(149.63±5.51)de	(152.00±4.58)ef
W2N0	(96.67±6.11)cd	(122.00±5.57)c	(143.67±5.86)d	(173.33±9.87)b	(186.67±4.16)c	(195.33±6.11)b	(195.67±5.51)cd
W2N1	(133.67±2.52)a	(161.33±2.08)a	(183.00±3.61)a	(206.33±4.73)a	(219.00±4.00)a	(230.33±3.06)a	(235.67±11.06)a
W2N2	(131.00±12.12)a	(158.00±14.11)a	(181.33±5.51)a	(195.33±10.07)a	(201.00±4.58)b	(202.67±6.43)b	(217.33±2.08)b
W3N0	(83.67±4.51)e	(103.00±6.24)d	(122.33±4.16)f	(134.33±3.06)e	(140.33±7.23)e	(152.00±4.00)d	(157.00±4.58)e
W3N1	(130.00±1.73)a	(159.33±2.52)a	(172.67±4.93)b	(203.67±5.03)a	(217.67±2.08)a	(227.33±3.06)a	(234.33±1.53)a
W3N2	(114.00±5.57)b	(136.67±3.06)b	(157.33±3.21)c	(176.67±4.73)b	(192.00±4.58)c	(200.33±6.11)b	(200.67±6.66)c
W	**	**	**	**	**	**	**
N	**	**	**	**	**	**	**
W×N	**	**	**	**	**	**	**

同列不同字母示在 0.05 水平差异显著; “*”和“**”分别示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

加, 各处理下的小桐子的茎粗和株高呈逐渐增长的趋势, 且在 7~10 月生长速度较快, 之后生长速度放缓, 增长趋于平稳; 灌水水平及施氮处理对小桐子的茎粗和株高影响表现为显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$), 且二者对除 6 月小桐子茎粗和株高无显著交互效应外, 对其他时期小桐子的茎粗和株高存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的交互效应。

由表 1 还可知, 当灌水水平相同时, N1 处理小桐子的茎粗和株高值均较大, 其次是 N2 处理, N0 处理的茎粗和株高值最小; 当施氮水平相同时, W2 处理小桐子的茎粗和株高值均较大, 其次是 W3 处理, W1 处理的株高和茎粗值最小; 6 月 1 日至 12 月 20 日, W2 处理的平均茎粗增量和平均株高增量较 W1 处理的分别增加了 21.22%和 39.35%, 较 W3 处理的分别增加了 2.43%和 11.02%, 且其差异均有统计学意义($P<0.05$); 6 月 1 日至 12 月 20 日, N1 处理的平均茎粗增量和平均株高增量较 N2 处理的分别增加了 9.59%和 17.82%, 较 N0 处理的分别增加了 16.22%和 38.08%, 且其差异均有统计学意义($P<0.05$); 在 W1 灌水水平下, N1 和 N2 处理的小桐子株高和茎粗较 N0 处理的均有不同程度增加, 其中 N1 处理的株高和茎粗增量最大, 说明在低水处理时, 通过施加适量的氮肥可提升小桐子的抗干旱胁迫能力, 促进其株高与茎粗的发育; W2N1 处理的小桐子的茎粗和株高值均高于其他处理的, 且在 12 月

20 日测得最大值, 最大平均茎粗和株高值分别为 44.12 mm 和 235.67 cm, 较同时期 W1N1 处理的分别提高了 5.80%和 24.48%, 且其差异均有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 水氮耦合对小桐子生物量的影响

由表 2 可知, 灌溉水量和施氮水平处理对小桐子的生物量存在极显著影响($P<0.01$), 且二者存在显著或极显著的交互效应; 当灌溉水平相同时, N1 处理小桐子的叶片数、叶干物质质量、主杆干物质质量、根干物质质量和主根长值均较大, N2 处理的次之, N0 处理的最小; 当施氮水平相同时, W2 处理小桐子的叶片数、叶干物质质量、主杆干物质质量、根干物质质量和主根长值均较大, W3 处理的次之, W1 处理的最小; 随着种植时间的延长, 小桐子的叶片数、叶干物质质量、主杆干物质质量、根干物质质量和主根长均呈逐渐增加的趋势; 与小桐子的株高和茎粗一样, 在 W1 处理下, 通过增加适量的氮肥可提高小桐子的生物量, 实现增产的目标。2016 年, N1 处理小桐子的平均叶片数、平均叶干物质质量、平均主杆干物质质量、平均根干物质质量和平均主根长较 N2 处理的分别增加了 19.47%、26.54%、66.75%、96.91%和 28.16%, 较 N0 处理的分别增加了 65.99%、148.26%、47.26%、63.14%和 25.86%; 2017 年, N1 处理下小桐子的平均叶片数、平均叶干物质质量、平均主杆干物质质量、平均根干物质质量和平均主根长较 N2 处理的分别增加了 10.81%、24.33%、17.16%、

43.39%和 9.02%，较 N0 处理的分别增加了 63.50%、67.43%、112.02%、66.33%和 14.29%。

2016、2017 年小桐子的叶片数、叶干物质质量、主

杆干物质量、根干物质量和主根长均在 W2N1 处理下测得最大值。

表 2 水氮耦合下小桐子的生物量及其方差分析

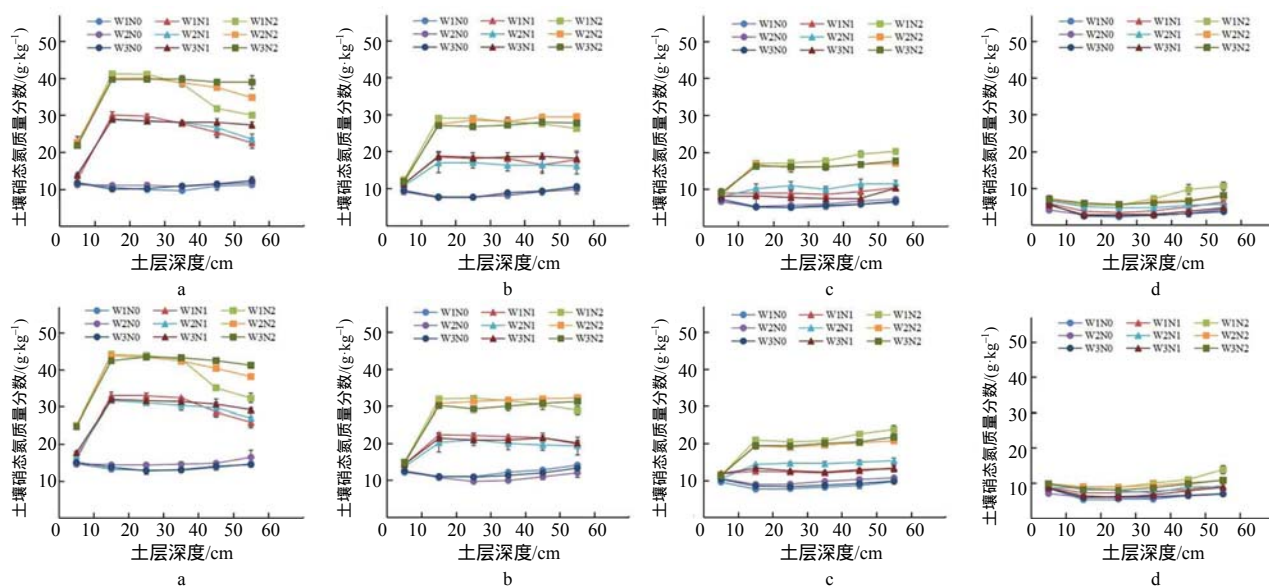
Table 2 Biomass and variance analysis of <i>Jatropha curcas</i> under water-nitrogen coupling						
测量时间	处理	叶片数	叶干物质量/g	主杆干物质量/g	根干物质量/g	主根长/cm
2016-10	W1N0	(23.33±0.58)g	(10.90±0.57)f	(25.12±2.35)g	(9.83±1.05)g	(10.33±0.36)g
	W1N1	(69.00±1.00)d	(28.17±1.67)d	(134.36±7.78)e	(25.34±0.65)f	(14.47±0.95)f
	W1N2	(55.00±2.00)f	(19.40±1.09)e	(41.75±5.44)f	(15.31±0.67)g	(11.64±0.82)f
	W2N0	(61.33±5.69)e	(25.68±1.03)d	(289.64±8.35)b	(63.67±4.11)c	(19.86±0.77)c
	W2N1	(97.00±5.29)a	(62.38±5.37)a	(313.94±7.25)a	(110.33±12.10)a	(24.50±1.75)a
	W2N2	(85.00±2.65)b	(36.99±3.20)c	(267.23±7.62)c	(89.92±4.04)b	(21.91±1.02)b
	W3N0	(60.33±2.89)ef	(16.84±1.42)e	(145.58±8.43)e	(41.25±4.91)e	(15.69±0.66)ef
	W3N1	(74.67±3.51)c	(42.07±4.03)b	(229.58±2.66)d	(51.53±2.02)d	(18.77±0.85)cd
	W3N2	(68.67±1.15)d	(39.91±2.22)bc	(147.05±11.34)e	(41.25±4.91)e	(17.25±0.64)de
	W	**	**	**	**	**
	N	**	**	**	**	**
	W×N	*	**	**	**	*
2017-10	W1N0	(101.33±6.11)g	(67.00±4.58)g	(155.67±6.81)f	(103.33±9.61)f	(31.46±2.55)f
	W1N1	(213.00±12.12)d	(113.00±2.65)f	(321.00±4.58)d	(135.67±4.16)e	(36.93±1.10)bc
	W1N2	(193.67±3.21)e	(108.00±1.73)f	(313.67±13.20)d	(114.00±4.58)f	(33.14±0.41)ef
	W2N0	(216.33±9.02)d	(147.33±5.69)d	(341.33±6.81)d	(232.33±3.79)c	(35.86±0.90)c
	W2N1	(311.67±18.88)a	(296.33±5.51)a	(751.33±12.50)a	(534.67±8.74)a	(42.84±1.50)a
	W2N2	(285.00±10.82)b	(195.33±8.74)b	(635.33±54.86)c	(294.33±7.64)b	(39.10±1.95)b
	W3N0	(152.67±4.51)f	(134.67±3.51)e	(329.33±6.51)d	(179.00±6.00)d	(34.86±0.80)cd
	W3N1	(244.33±9.87)c	(175.00±7.94)c	(679.67±35.73)b	(185.67±13.05)d	(37.01±0.68)bc
	W3N2	(215.33±7.23)d	(166.67±1.15)c	(546.33±21.03)d	(188.67±6.03)d	(34.88±0.50)cd
	W	**	**	**	**	**
	N	**	**	**	**	**
	W×N	**	**	**	**	*

同列不同字母示在 0.05 水平差异显著；“*”和“**”分别示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

2.3 土壤硝态氮的分布

由图 1 可知，各处理的土壤硝态氮质量分数随着小桐子的种植时间的增加均逐渐降低。横向上，距小桐子树干 10 cm 与 30 cm 土壤硝态氮的分布规律相似，二者距施氮位置(距树干 20 cm)间隔相等，但同一时间点，前者的土壤硝态氮质量分数均低于后者的。纵向上，2016 年 6 月相同施氮处理的土壤中硝态氮质量分数变化趋势一致，N0 处理的不同水分处理间硝态氮在各土层深度的分布差异无统计学意义；N1、N2 处理的硝态氮集中分布在中层土壤；随着灌水水平的增加，深层土壤的硝态氮质量分数随之增加。2016 年 9 月和 2017 年 6 月，各处理的土壤硝态氮质量分数均有

减少，其中 N2 处理 0~10 cm 土层土壤硝态氮质量分数明显下降，接近于 N0 处理 0~10 cm 土层的；同一施氮水平下，除 0~10 cm 土层外，其他土层土壤硝态氮质量分数分布曲线比较平稳。2017 年 9 月，所有处理的土壤硝态氮质量分数继续减少，相较于其他土层，>10~30 cm 土层土壤硝态氮质量分数最低，>50~60 cm 土层土壤硝态氮质量分数最高；深层中 W1N2 处理的土壤硝态氮质量分数最高，比 W2N2、W3N2 高出 3~4 个梯度。综合整个测量时期，不同水氮处理下，中层土壤硝态氮分布一直较为均匀，主要原因可能是小桐子的根系集中在该土层附近，根系对其区域附近的氮元素具有调控作用。



a、b、c、d 分别示距小桐子树干 10 cm 处 2016 年 6、9 月和 2017 年 6、9 月采集样品的硝态氮质量分数；e、f、g、h 分别示距小桐子树干 30 cm 处 2016 年 6、9 月和 2017 年 6、9 月采集样品的硝态氮质量分数。

图 1 水氮耦合下小桐子种植土壤不同土层的硝态氮质量分数

Fig.1 Mass fraction of nitrate nitrogen in different soil layers of *Jatropa curcas* planting soil under water-nitrogen coupling

2.4 土壤的含水率分析

由表 3 可知，横向上，2016 年 6、9 月距树干

10 cm 取样点的土壤含水率低于距树干 30 cm 取样点的，其中距树干 10 cm 取样点的浅层、中层、深

表 3 水氮耦合下小桐子种植土壤不同土层的含水率

处理	土层	距树干 10 cm 取样点土壤的含水率均值				距树干 30 cm 取样点土壤的含水率均值			
		2016-06	2016-09	2017-06	2017-09	2016-06	2016-09	2017-06	2017-09
W1N0	浅层	21.40±0.43	22.92±0.50	22.87±0.27	30.70±0.85	25.04±0.47	26.46±0.44	20.78±0.46	25.83±0.34
	中层	25.40±0.38	24.32±0.52	24.59±0.57	30.72±0.29	27.98±0.61	31.39±0.62	23.08±0.35	24.81±0.37
	深层	22.74±0.32	25.40±0.53	26.25±0.45	26.66±0.47	26.53±0.39	28.38±0.38	25.27±0.54	24.84±0.38
W1N1	浅层	20.14±0.39	18.33±0.45	22.98±0.34	27.35±0.39	24.01±0.43	24.04±0.59	21.91±0.51	25.46±0.43
	中层	21.99±0.50	22.52±0.35	24.70±0.59	28.66±0.46	25.38±0.46	25.98±0.48	22.48±0.49	22.26±0.53
	深层	22.08±0.34	22.46±0.47	22.54±0.56	26.54±0.40	22.88±0.44	24.59±0.24	19.79±0.30	26.12±0.31
W1N2	浅层	22.49±0.36	18.07±0.37	27.54±0.42	28.20±0.43	25.47±0.35	26.02±0.41	26.51±0.33	22.90±0.37
	中层	24.44±0.50	23.70±0.34	24.34±0.46	29.26±0.41	26.79±0.55	25.90±0.24	24.48±0.41	22.89±0.41
	深层	22.39±0.34	24.44±0.41	24.41±0.62	27.30±0.53	26.66±0.35	27.38±0.44	23.33±0.60	25.71±0.44
W2N0	浅层	23.92±0.42	25.21±0.28	26.79±0.34	33.05±0.48	26.28±0.51	25.75±0.46	26.09±0.36	27.30±0.22
	中层	25.07±0.49	27.24±0.35	27.70±0.45	30.67±0.41	28.82±0.60	27.72±0.33	26.92±0.31	26.04±0.25
	深层	22.32±0.54	25.15±0.52	25.89±0.40	28.35±0.48	26.65±0.45	25.88±0.45	22.95±0.29	27.89±0.28
W2N1	浅层	25.87±0.43	19.55±0.39	27.66±0.29	32.08±0.48	26.71±0.67	22.46±0.76	26.00±0.42	26.96±0.36
	中层	28.04±0.35	29.09±0.45	27.00±0.45	32.58±0.42	28.13±0.49	29.58±0.47	25.05±0.39	22.42±0.36
	深层	23.59±0.52	27.84±0.28	23.38±0.40	26.84±0.13	24.95±0.69	28.15±0.44	23.40±0.48	26.71±0.23
W2N2	浅层	17.49±0.43	21.13±0.48	19.55±0.46	29.95±0.23	23.88±0.35	23.01±0.48	18.55±0.38	26.17±0.37
	中层	23.00±0.44	24.09±0.26	19.75±0.17	30.84±0.57	27.74±0.32	26.21±0.63	25.03±0.49	23.79±0.39
	深层	20.25±0.50	24.40±0.28	21.34±0.20	27.54±0.43	25.07±0.41	26.23±0.63	25.27±0.35	27.88±0.37
W3N0	浅层	26.30±0.28	25.38±0.53	27.82±0.44	34.74±0.55	27.08±0.24	27.74±0.22	27.30±0.34	29.71±0.36
	中层	27.55±0.40	28.95±0.54	28.13±0.55	33.86±0.80	30.51±0.34	30.07±0.54	26.69±0.66	25.98±0.47
	深层	24.88±0.71	29.25±0.58	27.05±0.41	30.73±0.62	26.52±0.35	29.47±0.51	24.73±0.51	28.26±0.61
W3N1	浅层	26.75±0.47	26.02±0.29	29.75±0.57	34.76±0.33	28.05±0.49	26.54±0.40	27.96±0.76	31.29±0.36
	中层	28.15±0.54	28.87±0.42	28.24±0.35	35.91±0.58	29.91±0.41	30.78±0.68	26.94±0.39	29.89±0.46
	深层	27.95±0.45	29.84±0.49	28.27±0.32	33.61±0.60	28.66±0.37	30.93±0.66	28.67±0.35	32.28±0.40
W3N2	浅层	26.77±0.29	24.15±0.50	29.40±0.30	33.47±0.43	27.55±0.32	26.04±0.46	28.12±0.32	31.70±0.55
	中层	27.92±0.50	26.84±0.65	26.49±0.77	33.11±0.31	29.12±0.21	29.38±0.37	25.58±0.36	29.81±0.42
	深层	26.71±0.40	25.41±0.43	26.07±0.52	30.74±0.31	27.93±0.35	27.60±0.48	25.52±0.45	29.94±0.33

层土壤的含水率均值分别较距树干 30 cm 取样点对应土层深度土壤含水率均值低 10.86%、8.65%、7.71%；2017 年 6、9 月的 2 处采样点含水率高低则相反，距树干 10 cm 取样点的浅层、中层、深层土壤的含水率均值分别较距树干 30 cm 取样点对应土层深度土壤含水率均值高 10.23%、13.74%、3.19%，该差异性在中层土壤最明显。这可能是一年后小桐子的侧根生长呈开口朝下的抛物线型，距树干 10 cm 取样点处的中层土为无侧根区，而距树干 30 cm 取样点处的中层土为侧根分布较密集的区域，当土壤水分接触侧根后，水分会沿着侧根向下朝远离树干的方向快速迁移，造成该土层水分流失。纵向上，2016 年 6、9 月距树干 10 cm 取样点的浅层、中层、深层土壤含水率均值分别为 22.88%、25.95%、24.84%，距树干 30 cm 取样点的浅层、中层、深层土壤含水率均值分别为 25.67%、28.40%、26.92%，中层土壤含水率均值最大，深层土壤的其次，浅层土壤的最小，这与同期土壤中硝态氮的分布规律一致，具有较好的相关性；2017 年 6、9 月，各土层深度水分分布比较均匀，分布差异无统计学意义。同一施氮水平下，随着灌水水平的增加，不同土层深度总含水率呈现不断增加的趋势。

3 结论与讨论

本研究中，水氮耦合对小桐子的生理生长特性和生物量影响显著，当采用半径为 20 cm 的环形施肥方式，施肥深度为 15 cm 时，最优处理为 W2N1，即施尿素 90 g 和滴灌 20 mm 灌水水平。根系是作物从外界吸收水分和养分来维持自身正常生长的重要器官^[17]，而施氮具有调节根系吸收土壤水分和提高水分利用效率的作用^[18]。在 W1 低灌水量条件下适量增施氮肥，提高了小桐子根系对土壤水分的吸收，增强了小桐子抗干旱胁迫的能力，促进了小桐子的生长。W2N1 处理的小桐子株高、茎粗、主根长和干物质量均大于 W3N2 处理(高水高氮处理)的。这与对毛白杨幼林^[19]、夏玉米^[20]、甜瓜^[21]、番茄^[22]等作物的研究结果相似。适合的水肥用量可促进根系的生长，而作物对硝态氮的吸收利用存在极限值^[23-25]，超出该值会对作物产量和生长产生抑制作用，进而影响作物的生长。

本研究中，水氮耦合是影响水分和硝态氮的分布与迁移的重要因素。一方面，水分迁移促进硝态氮迁移。2016 年 6 月，随着灌水量的增加，

水分向深层土壤入渗，带动氮元素向下淋洗，致使深层土壤中硝态氮质量分数随之升高，这会导致根区土壤的硝态氮淋入深层土壤，影响小桐子根部对氮元素的吸收。此外，由于土壤自身的水势梯度作用，在水分从含水量高的区域向含水量低的区域迁移的同时，也会携带土壤硝态氮随之迁移。滴灌方式也是影响水氮迁移的一个原因。在灌水后，滴灌点源入渗的土壤湿润体为椭球体，干湿交界处的硝态氮溶于水后，由于浓度较高，不仅会随水分向下发生迁移，而且较高质量分数的硝态氮也会在土壤水分饱和区发生横向扩散。另一方面，当灌水量相同时，各土层深度土壤硝态氮质量分数随施氮量增加而提高，这与赵允格等^[26]、刘小刚等^[27]的研究结果相吻合，说明硝态氮的迁移能力与施氮水平和灌水水平呈正比，水氮耦合能够促进硝态氮的迁移。

本研究中，小桐子的根系对水分和硝态氮的分布也有着调控作用，各处理的根系区域硝态氮质量分数和含水率变化趋势基本一致，且根系所在的中层土壤含水率较其他土层更高。根系对水氮分布的影响主要在水氮处理后第二年的生长阶段，此时期的的小桐子根系生长更加成熟，对土壤中氮元素和水分的吸收能力增强。具体调控作用为：首先，小桐子侧根对水分具有导流作用，不但提高了灌溉后水分的下渗速度，而且改变了水分下渗的流动方向，使得水分扩散开来，不会集中某一区域；其次，当土壤水氮分布不均匀时，小桐子的根系为了吸收更多的营养物质，会刺激低养分区域内的侧根向周围生长，新生的根尖区对的营养物质和水分调动能力更强，能够促进该区域土壤水氮迁移，使得其区域内的水氮分布更加均匀^[28]；最后，水氮分布与小桐子叶、茎和根部分泌的有机、无机渗透调节物质有关。植物通过代谢合成大量有机、无机渗透调节物质，从而增加其渗透压，增强植株的保水能力^[27]。生长较好的小桐子可使木质部液流黏滞性减小，增加对土壤养分的吸收和运输^[24]。同时氮肥作为促进植物根系生长的主要肥料之一，根系通过吸收大量氮元素为渗透调节物质的合成供应能量，从而提高小桐子根系对水分和养分平衡的调控能力。

参考文献：

- [1] 陈杨玲, 王海波, 陈凯, 等. 能源植物小桐子抗逆性研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(10): 1-6.
CHEN Y L, WANG H B, CHEN K, et al. The

- research progress on stress resistance of energy plant *Jatropha curcas* L.[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(10): 1-6.
- [2] 李星, 唐琳, 雷蕾, 等. 麻疯树叶提取物对恶性黑色素瘤 A375 细胞增殖抑制及诱导凋亡作用的研究[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(9): 2291-2293.
- LI X, TANG L, LEI L, et al. Study on the effects of extract from leaves of *Jatropha curcas* L. on the proliferation inhibition and apoptosis induction in human melanoma cell line A375[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2010, 21(9): 2291-2293.
- [3] 刘娟, 雷蕾, 唐琳, 等. 麻疯树提取物体外抗病毒和杀菌作用的初步研究[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(8): 1890-1893.
- LIU J, LEI L, TANG L, et al. Study on antiviral and bactericidal effects of extracts from *Jatropha curcas* L. in vitro[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2009, 20(8): 1890-1893.
- [4] KUMAR V, MAKKAR H P S, BECKER K. Evaluations of the nutritional value of *Jatropha curcas* protein isolate in common carp(*Cyprinus carpio* L.)[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2012, 96(6): 1030-1043.
- [5] MAKKAR H P S, BECKER K. *Jatropha curcas*, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2009, 111(8): 773-787.
- [6] WAKANDIGARA A. Chemistry of phorbol ester toxicity in *Jatropha curcas* seed: a review[J]. International Journal of Biochemistry Research & Review, 2013, 3(3): 146-161.
- [7] 戴妮. 生物燃料引领航空业绿色未来[J]. 世界环境, 2009(4): 31-32.
- DAI N. Bio-fuel leads up the green future of air industry[J]. World Environment, 2009(4): 31-32.
- [8] 赵琳, 郎南军, 孔继君, 等. 我国小桐子生物柴油产业现状和发展探讨[J]. 广东农业科学, 2010, 37(3): 80-83.
- ZHAO L, LANG N J, KONG J J, et al. Status quo and development of biodiesel industry of *Jatropha curcas* in China[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(3): 80-83.
- [9] MPONELA P, JUMBE C B L, MWASE W F. Determinants and extent of land allocation for *Jatropha curcas* L. cultivation among smallholder farmers in Malawi[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(7): 2499-2505.
- [10] 徐天宇, 李婕, 杨启良, 等. 限量灌溉和施氮对小桐子产量和品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 244-250.
- XU T Y, LI J, YANG Q L, et al. Yields and quality evaluation of *Jatropha curcas* with limited irrigation and nitrogen[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(3): 244-250.
- [11] 杨启良, 孙英杰, 齐亚峰, 等. 不同水量交替灌溉对小桐子生长调控与水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 121-126.
- YANG Q L, SUN Y J, QI Y F. Effects of alternated different irrigation amount modes on growth regulation and water use of *Jatropha curcas* L.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 121-126.
- [12] 李婕, 杨启良, 徐曼, 等. 调亏灌溉和氮处理对小桐子生长及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(11): 995-1002.
- LI J, YANG Q L, XU M, et al. Effect of regulated deficit irrigation and nitrogen nutrition on growth and water use efficiency of *Jatropha curcas* L.[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(11): 995-1002.
- [13] 杨启良, 周兵, 刘小刚, 等. 亏缺灌溉和施氮对小桐子根区硝态氮分布及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 142-150.
- YANG Q L, ZHOU B, LIU X G, et al. Effect of deficit irrigation and nitrogen fertilizer application on soil nitrate-nitrogen distribution in root-zone and water use of *Jatropha curcas* L.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 142-150.
- [14] 焦娟玉, 尹春英, 陈珂. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 91-99.
- JIAO J Y, YIN C Y, CHEN K. Effects of soil water and nitrogen supply on the photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* seedlings[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(1): 91-99.
- [15] 焦娟玉, 陈珂, 尹春英. 土壤含水量对麻疯树幼苗生长及其生理生化特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4460-4466.
- JIAO J Y, CHEN K, YIN C Y. Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L.[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4460-4466.
- [16] 王明克, 杨启良, 刘小刚, 等. 水氮耦合对小桐子生长和灌溉水利用效率的影响[J]. 生态学报, 2013, 32(5): 1175-1180.
- WANG M K, YANG Q L, LIU X G, et al. Coupling effects of watering and nitrogen fertilization on the growth and irrigation water use efficiency of *Jatropha curcas*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1175-1180.

- 1175–1180 .
- [17] 王世平, 张才喜, 罗菊花, 等. 果树根域限制栽培研究进展[J]. 果树学报, 2002, 19(5): 298–301 .
WANG S P, ZHANG C X, LUO J H, et al. Advances in research of rooting-zone restricted fruit growing[J]. Journal of Fruit Science, 2002, 19(5): 298–301 .
- [18] 余华清, 丁峰, 殷尧翥, 等. 不同水氮管理下麦茬杂交稻氮磷钾吸收和转运及其与产量的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 337–343 .
YU H Q, DING F, YIN Y Z, et al. The uptake and transfer of nitrogen, phosphorus, potassium and their relationship with the yield in wheat stubble hybrid rice under different management of water and nitrogen[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(4): 337–343 .
- [19] 贺曰林, 王烨, 张宏锦, 等. 地表滴灌水氮耦合对毛白杨幼林生长及土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 90–98 .
HE Y L, WANG Y, ZHANG H J, et al. Coupling effects of water and nitrogen on tree growth and soil water-nitrogen distribution in young *Populus tomentosa* plantations under surface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 90–98 .
- [20] 宋海星, 李生秀. 水、氮供应和土壤空间所引起的根系生理特性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 6–11 .
SONG H X, LI S X. Changes of root physiological characteristics resulting from supply of water, nitrogen and root-growing space in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizers Science, 2004, 10(1): 6–11 .
- [21] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 日光温室甜瓜根系生长及单果重的水氮耦合效应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1996–2006 .
YUE W J, ZHANG F C, LI Z J, et al. Effects of water and nitrogen coupling on root growth and single fruit weight of greenhouse muskmelon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(10): 1996–2006 .
- [22] 石小虎, 曹红霞, 杜太生, 等. 膜下沟灌水氮耦合对温室番茄根系分布和水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 89–93 .
SHI X H, CAO H X, DU T S, et al. Effects of water and nitrogen coupling on root distribution and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2013, 41(2): 89–93 .
- [23] GAO K, CHEN F, YUAN L, et al. A comprehensive analysis of root morphological changes and nitrogen allocation in maize in response to low nitrogen stress[J]. Plant, Cell & Environment, 2015, 38(4): 740–750 .
- [24] REMANS T, NACRY P, PERVENT M, et al. The *Arabidopsis* NRT1.1 transporter participates in the signaling pathway triggering root colonization of nitrate-rich patches[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America(PNAS), 2006, 103(50): 19206–19211 .
- [25] 吴现兵, 白美健, 李益农, 等. 水肥耦合对膜下滴灌甘蓝根系生长和土壤水氮分布的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 110–119 .
WU X B, BAI M J, LI Y N, et al. Effect of water and fertilizer coupling on root growth, soil water and nitrogen distribution of cabbage with drip irrigation under mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(17): 110–119 .
- [26] 赵允格, 邵明安. 不同施肥条件下农田硝态氮迁移的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 37–40 .
ZHAO Y G, SHAO M A. Experimental study on nitrate transport for different fertilization methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 37–40 .
- [27] 刘小刚, 张岩, 程金焕, 等. 水氮耦合下小粒咖啡幼树生理特性与水氮利用效率[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 160–166 .
LIU X G, ZHANG Y, CHENG J H, et al. Biochemical property and water and nitrogen use efficiency of young Arabica coffee tree under water and nitrogen coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 160–166 .
- [28] 江华波, 王盛锋, 杨峰, 等. 不同浓度硝态氮供应下小麦生长、硝态氮累积及根系钙信号特征[J]. 植物科学学报, 2015, 33(3): 362–368 .
JIANG H B, WANG S F, YANG F, et al. Plant growth, nitrate content and Ca signaling in wheat(*Triticum aestivum* L.) roots under different nitrate supply[J]. Plant Science Journal, 2015, 33(3): 362–368 .

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正