

不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响^①

陆扣萍^{1,2}, 谢寅峰¹, 闵炬², 施卫明^{2*}

(1 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037; 2 中国科学院南京土壤研究所面源污染治理技术研发中心, 南京 210008)

摘要: 采用大棚栽培田间小区试验, 研究了不同施氮量下茼蒿根系形态特征的动态变化, 以及不同施氮水平对茼蒿产量和品质的影响。结果表明: 与农民习惯施氮相比, 减氮 40% 处理对茼蒿根系生长有显著促进作用, 主要表现为根表面积和体积以及总根长显著增加; 但氮肥对茼蒿根增粗生长的促进作用主要表现在生长后期。减氮 40% 处理下的茼蒿产量和 Vc 含量最高。茼蒿茎硝酸盐含量随施氮量的增加呈线性增加, 农民习惯施氮处理下, 茼蒿茎硝酸盐含量最高, 达到 1291.9 mg/kg, 已超过农产品安全质量无公害根茎类蔬菜的安全标准。

关键词: 太湖地区; 大棚蔬菜; 氮肥; 根系; 产量; 品质

中图分类号: S625.5⁺4

植物的根系是吸收水分和养分的主要器官, 同时又是物质同化、转化和合成的重要器官^[1]。与大田作物相比, 蔬菜作物的根系普遍分布浅, 根长密度低, 养分吸收能力相对较弱, 因而需要土壤提供相对较高的养分浓度和强度^[2]。普遍认为, 根系形态和分布与土壤养分吸收效率有紧密联系。吸收能力强的作物在形态上表现为根系长度、体积、分布密度和有效吸收面积较大^[3]。而施氮 (N) 水平^[4]、环境因素^[5-6]以及土壤理化性质^[7]等显著地影响根系生长和作物产量^[8-9]。近年来, 国内就有关施 N 量对作物根系形态生长的影响开展了一些研究。这些研究主要集中在 N 肥对小麦^[10]、水稻^[11-12]、玉米^[13]等深根性作物的根系分布、活力影响及其与产量、品质的关系, 对蔬菜根系的研究多体现在根重与产量的相关性上^[14-15], 而有关蔬菜根系形态生长指标 (总根长、根表面积及根体积等) 对产量影响的研究较少。

茼蒿是太湖地区秋季大棚普遍栽培的作物之一, 属直根系, 根系浅, 须根发达, 根群主要分布在 20~30 cm 土层。针对施 N 量与茼蒿产量和品质的关系, 肖时运等^[16]通过盆栽试验认为适宜的化学 N 用量 (393.75~478.13 kg/hm²) 能提高茼蒿叶片硝酸还原酶活性, 降低茼蒿可食部分硝酸盐的含量; 钟攀等^[17]研究露地茼蒿的实验结果表明减 N 和增 K 处理有利于降低茼蒿的硝酸盐含量; 狄彩霞等^[18]认为在施入等量

N 肥的基础上, P、K、中量及微量元素和有机肥料平衡施用使露地茼蒿极显著增产 (135.8%~177.0%)。但是, 以上研究主要集中在露地蔬菜和盆栽实验条件下, 对设施条件下适宜施 N 量与茼蒿产量和品质关系的研究较少, 而大量施 N 对根茎类蔬菜硝酸盐积累是否超标也有待进一步明确。为此, 本实验以太湖流域直湖港地区秋季大棚普遍栽培的蔬菜品种茼蒿为供试作物, 通过不同 N 素水平的田间实验, 研究茼蒿根系形态生长与产量和品质的关系, 从根系生长调控的角度为太湖地区秋季设施蔬菜合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地及供试材料

本试验于 2009 年 8 月至 11 月在位于太湖地区的江苏省无锡市胡埭镇龙延村进行。试验选用 1 个钢管塑料大棚, 该大棚由种植了 20 年以上的水稻田改种而来。大棚使用面积为 7 m×90 m, 棚龄为 2 年, 进行试验前揭棚闲置两个月 (2009 年 6—8 月) 后进行试验。

试验地耕层土壤 (0~20 cm) 质地为黏土, 土壤基本理化性状为 pH 6.09, 电导率 0.19 mS/cm, 有机质 27.9 g/kg, 全 N 1.06 g/kg, NO₃⁻-N 35.0 mg/kg, NH₄⁺-N 1.07 mg/kg, 速效 P 199.8 mg/kg 和速效 K 148.4 mg/kg。

供试茼蒿品种为大青叶茼蒿, 无锡市北塘种子有限公司生产, 适宜秋延后大棚种植, 于 2009 年 8 月 20

①基金项目: 国家科技重大专项项目 (2008ZX07101-005) 资助。

* 通讯作者 (wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 陆扣萍 (1985—), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜氮素营养生理与环境效应的研究。E-mail: kplu@issas.ac.cn

日播种育苗, 9月12日移栽定植, 11月11日收获完毕。

1.2 试验处理及田间管理

试验设6个处理: ①N0: 对照处理, 不施肥; ②N1: 不施化肥 N; ③N2: 根据农民习惯施 N 量减少 60%, 即施纯 N 208 kg/hm²; ④N3: 根据农民习惯施 N 量减少 40%, 即施纯 N 312 kg/hm²; ⑤N4: 根据农民习惯施 N 量减少 25%, 即施纯 N 390 kg/hm²; ⑥N5: 农民习惯施 N 处理, 根据试验所在地农户的平均施 N 水平确定, 即施纯 N 520 kg/hm²。N 肥施用普通尿素, 采用 1 次基肥 2 次追肥, 按 50%、30% 和 20% 的比例施用。各处理 P、K 肥和有机肥用量相同, P 和有机肥用量作底肥一次施入, K 肥采用 1 次基肥 1 次追肥, 按 50% 和 50% 的比例施用。有机肥(鸡粪)、P 肥(过磷酸钙)和 K 肥(硫酸钾)施用量分别为 N 70 kg/hm²、P 120 kg/hm² 和 K 150 kg/hm²。小区面积为 2.5 m × 7.5 m, 重复 3 次, 随机区组排列。田间水分管理采用当地农民传统的浇灌方法, 通常在移栽当天及随后的 3~4 天浇水, 或视土壤干湿状况而定。追肥时尿素撒施后浇水。

1.3 样品采集及项目测定

1.3.1 根系形态指标的测定 采用挖掘法, 分别在茼蒿莲座期(即移栽后 15 天)、茎膨大初期(生长 30 天)和收获期(生长 50 天)选取地上部生长均匀一致的完整植株, 挖取的土体长 30 cm, 宽 50 cm, 深度 40 cm。用水冲洗获得整株根系。扫描仪(Epson 1680, Indonesia)扫描, 并经分析程序(WinRhizo Pro Vision5.0, Canada)分析, 获得总根长、根表面积、根体积和根平均直径等根系形态指标。地上部和根系鲜样取回后杀青(105℃, 30 min), 在 70℃下烘干至恒重, 称干重。

1.3.2 样品采集 植物样品采集: 茼蒿以每小区全部称重计产。取可食部分鲜样测定 Vc 和硝酸盐含量, 3 次重复。收获时, 各小区选取 3 株, 取整株地上部,

用于测定植株吸 N 量。

1.3.3 果实品质及养分的测定 Vc 的测定采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[19]; 硝酸盐的测定按 GB/T5009.33 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定方法。植物样品干物重测定采用 105℃下烘 30 min, 继续在 70℃下烘 72 h 称重。全 N 用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮^[19], 自动定氮仪(BÜCHI 399)测定。

1.3.4 土壤理化性质的测定 有机质采用外加热重铬酸钾氧化-容量法测定^[20]。全 N 用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮^[20], 自动定氮仪(BÜCHI 399)测定。速效 N 采用 1 mol/L KCl 溶液浸提, 浸提液用紫外分光光度计进行测定^[20]。速效 P 采用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[20]。速效 K 采用 1.0 mol/L 的 NH₄OAc 浸提-火焰分光光度法测定^[20]。pH 值测定水土比为 2.5:1, 用 pH 计(pH211 型)测定^[20]。电导率(EC)测定水土比为 5:1, 采用 DDS-320 型电导仪测定^[20]。

2 结果分析

2.1 不同施氮水平对茼蒿根系及地上部生物量的影响

根干重是根系生长状况的集中体现, 反映根系发达程度。从表 1 可以看出, 在茼蒿的整个生长期, 不施 N 处理(N1)下的根干重均显著高于不施肥对照处理(N0), 说明 P、K 对茼蒿根干重的积累具有一定的促进作用。在茼蒿莲座期(生长 15 天), 各处理之间相比, N4 处理的根干重显著大于 N1、N2、N3、N5 处理, 但 N2、N3、N5 施肥处理之间无显著差异。在茼蒿茎膨大初期(生长 30 天), 各处理的根干重相比较, N3>N4>N5>N2>N1。在茼蒿收获期(生长 50 天), N3 处理下的根干重仍保持最高, 与 N1、N2、N4、N5 处理相比, 分别增加了 35%、22.1%、11.0% 和 9.5%。

表 1 茼蒿不同生长期根和地上部干重动态变化

Table 1 Dynamic changes of root and shoot dry weights of lettuce at different growth stages

处理	根干重 (g/株)			地上部干重 (g/株)		
	15 d	30 d	50 d	15 d	30 d	50 d
N0	0.065 d	0.750 c	1.02 d	0.60 c	9.32 b	32.26 c
N1	0.105 c	0.905 bc	1.20 c	0.95 b	8.01 b	24.84 d
N2	0.150 b	0.980 b	1.31c	1.16 b	8.40 b	30.00 cd
N3	0.175 b	1.205 a	1.62 a	1.10 b	13.30 a	39.53 a
N4	0.235 a	1.097 ab	1.46 b	1.74 a	11.18 ab	36.71 ab
N5	0.155 b	0.940 bc	1.48 ab	1.01 b	10.48 ab	27.26 cd

注: 同列不同字母表示不同 N 肥处理的生物量在 p<0.05 水平下差异显著, 下同。

从表 1 还可以看出,在不同生育期,莴苣地上部干重与根干重变化趋势一致。到生长 30 天时,在低 N 水平(N1~N2)或高 N 水平(N4~N5)下,莴苣根系受到胁迫的同时,地上部生长也受到抑制。收获时,N3 处理下的莴苣地上部干重达到 39.53 g/株,较 N1 和 N5 处理分别增加了 1.6 倍和 1.5 倍。

2.2 不同施氮水平对莴苣根系形态的影响

2.2.1 总根长、根平均直径 如表 2 所示,不同供 N 水平对莴苣的总根长影响显著。在莴苣的整个生长期,莴苣的总根长随着施 N 量的不同而差异显著,从整体上看,均以 N3 水平下达到最高。在莴苣的不同生育期,

与 N1 处理相比, N3 处理的莴苣总根长增加了 28.7%~36.1%。随着生育期的推进, N3 处理下的莴苣总根长持续增加,在莴苣收获时仍生长旺盛。收获时,随着施 N 量的增加,莴苣的总根长表现为先增加后下降的趋势。

在莴苣收获前,各处理间莴苣根平均直径均无显著差异。莴苣收获时, N3 处理下的莴苣根平均直径分别高出 N1、N2、N4 和 N5 处理 11.8%、4.1%、2.7% 和 5.6%。收获时,在莴苣根平均直径上, N3>N4>N5>N2>N1,与总根长变化一致。但在莴苣收获前无此趋势,表明 N 肥对莴苣根增粗生长的促进作用主要表现在生长后期。

表 2 莴苣不同生长期总根长和根平均直径动态变化

Table 2 Dynamic changes of lettuce total root length and average diameter at different growth stages

处理	总根长 (cm/株)			根平均直径 (mm/株)		
	15 d	30 d	50 d	15 d	30 d	50 d
N0	1 466.8 c	1 856.1 b	2 185.4 c	0.48 a	0.63 a	0.69 c
N1	1 654.7 c	1 879.7 b	2 248.1c	0.47 a	0.63 a	0.68 c
N2	1 682.8 bc	2 078.1 ab	2 486.7 bc	0.47 a	0.54 a	0.73 b
N3	2 251.3 a	2 420.1 a	2 943.7 a	0.49 a	0.57 a	0.76 a
N4	2 068.6 ab	2 321.2 a	2 778.4 ab	0.52 a	0.60 a	0.74 ab
N5	1 811.3 bc	2 010.3 ab	2 576.4 abc	0.50 a	0.61 a	0.72 bc

2.2.2 根表面积、根体积 根系表面积是植物生长发育的重要指标之一,它与水分、养分的吸收具有直接重要的关系。根系表面积的大小表明根系活力的高低,从而影响作物的产量^[21-22]。从表 3 可以看出,在莴苣莲座期,N3~N5 处理下的莴苣根表面积显著高于 N1 和 N2 处理,但 N3、N4、N5 处理之间无差异。在莴苣茎膨大初期, N0~N3 处理施 N 量范围内,莴苣根表面积随着施 N 量的增加而增加,而 N2、N4、N5 处理之间无差异,表明根表面积的扩大需要一定浓度的 N 素供应,但并不是越高越好。莴苣收获时的根表面积变化趋势与茎膨大初期一致,且超过 N3 施 N 水

平后,随着施 N 量的增加,莴苣根表面积下降趋势更加明显。与 N1、N2、N4 和 N5 处理相比,莴苣收获时, N3 处理下的莴苣根表面积分别增加了 25.4%、18.7%、6.6% 和 8.1%。保持较高的根系表面积,有利于根系吸取大量的物质,满足莴苣营养生长和生殖生长,促进产量的形成。

莴苣根体积的变化趋势与根表面积一致,在 N0~N5 处理供 N 范围内, N3 处理下的根系体积始终保持最高。莴苣收获时, N3 处理下的根体积达到 10.17 cm³/株,较 N5 处理增长 28.7%,差异达到显著水平(p<0.05)。

表 3 莴苣不同生长期根表面积和根体积动态变化

Table 3 Dynamic changes of lettuce surface area and root volume at different growth stages

处理	根表面积 (cm ² /株)			根体积 (cm ³ /株)		
	15 d	30 d	50 d	15 d	30 d	50 d
N0	246.1 b	278.6 c	473 d	3.5 b	3.8 d	7.8 b
N1	273.5 b	294.7 c	481.2 cd	3.2 b	3.8 d	7.7 b
N2	259.4 b	395.2 b	508.3 bcd	3.1 b	6.2 c	9.2 ab
N3	367.4 a	485.0 a	603.3 a	4.5 a	8.7 a	10.2 a
N4	370.8 a	417.6 b	565.7 ab	4.5 a	7.6 b	9.1 ab
N5	332.5 a	418.9 b	558.3 abc	4.3 a	6.4 b	7.9 b

2.3 不同施氮水平对茼蒿产量的影响

从表 4 可以看出, 与无肥对照 (N0) 相比, 仅仅施入合适的 P、K 肥处理 (N1) 并不能提高茼蒿产量, 说明 N 是主要的产量限制因子。与 N1 处理相比, N2~N5 处理产量增加了 5.71~13.86 t/hm², 差异达 5% 显著水平, 表明在低 N 土壤上 N 肥可显著地提高茼蒿的产量。另外, N2、N3、N4、N5 处理之间, 茼蒿产量表现为 N3>N4>N2=N5; 相对于 N1 处理, 各施 N 处理茼蒿产量分别提高了 11.6%、25.1%、18.6% 和 10.4%。说明当农户习惯 N 肥用量减少 40% 时不但没有影响茼蒿产量, 反而达到最高水平。然而高 N 处理下茼蒿产量却出现下降的情况。

表 4 不同 N 水平下茼蒿的产量

Table 4 Yields of lettuce in different treatments

处理	产量 (t/hm ²)	增产量 (t/hm ²)	增产率 (%)
N0	52.92 d	—	—
N1	55.13 d	0	0
N2	61.55 c	6.42	11.6
N3	68.99 a	13.86	25.1
N4	65.40 b	10.27	18.6
N5	60.84 c	5.71	10.4

注: 增产量 = 施 N 区产量 - 不施 N 区产量; 增产率 = (施 N 区产量 - 不施 N 区产量)/不施 N 区产量。

2.4 不同氮肥用量对茼蒿氮素表观利用率的影响

根据公式: N 肥表观利用率 (%) = (施 N 区吸 N 量 - 不施 N 区吸 N 量) / 施 N 量 × 100, 计算不同处理化肥 N 利用率。由图 1 表明, N3 处理下茼蒿地上部 N 肥利用率达到 38.14%, 显著高于其他处理, 说明在设施条件下, 如果 N 肥投入量合理, 仍然能够取得较高的 N 肥利用率。N2、N4、N5 处理之间差异不显著, 分别为 17.77%、22.00% 和 13.11%, 其中以农民习惯施 N 水平下 N 肥利用率最低。说明在适宜的 N 肥用量下, 随着施 N 量的增加, 茼蒿的 N 素利用

率提高, 但超过一定量后, 茼蒿的 N 肥利用率与施 N 量之间存在明显负相关, 这与肖时运等^[16]的茼蒿盆栽试验研究结果一致。值得注意的是, 农民习惯施 N 量的 N 肥表观利用率很低, 只有 13.11%, 施入的大量 N 肥没有得到充分利用, 这样既浪费了肥料资源, 同时对环境造成较大的压力。

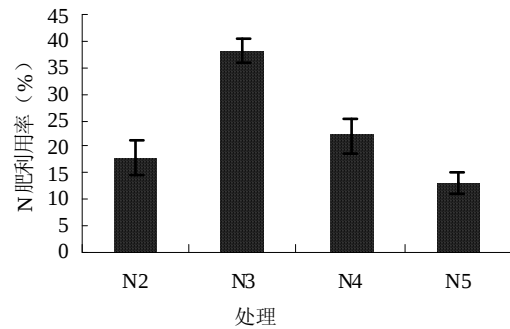


图 1 不同施 N 处理对茼蒿 N 肥利用率的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on N use efficiency

2.5 不同氮肥用量对茼蒿茎硝酸盐和 Vc 含量的影响

由表 5 可以看出, N1 处理下的茼蒿茎硝酸盐含量显著高于不施肥对照处理 (N0), 说明除了 N、P、K 也是影响蔬菜品质的因子之一。与 N1 处理相比, 施 N 处理的茼蒿茎硝酸盐含量增加了 0.16%~52.4%, 表明在低 N 土壤上 N 肥可明显地提高茼蒿茎中的硝酸盐含量。且 N2、N3、N4、N5 施肥处理之间存在极显著差异, 表明在试验设计的 N 素浓度范围内, 茼蒿茎中的硝酸盐含量与 N 素浓度呈显著正相关, 当施 N 量最大时 (N5 处理), 硝酸盐含量也最高, 高达 1 291.94 mg/kg。

Vc 是蔬菜的一个重要品质指标, 蔬菜中 Vc 含量高低与人们健康有密切关系。表 5 表明, 施 N 处理的茼蒿茎中的 Vc 含量显著高于对照, 各处理中以 N3 处理下 Vc 含量最高, 达到 35.93 mg/kg, 与不施 N 对照 (N1) 相比, 增加了 58.3%。施 N 量超过 N3 水平后, 茼蒿茎中的 Vc 含量趋于下降。但 N4 和 N5 处理间无差异, 表明在高 N 水平下, 茼蒿茎中的 Vc 含量降低不明显。

表 5 不同处理的茼蒿茎硝酸盐和 Vc 的含量

Table 5 Effects of different treatments on Vc and nitrate contents in stems of lettuce

品质成分	N0	N1	N2	N3	N4	N5
硝酸盐 (mg/kg)	783.46 e	847.94 d	849.26 d	1 056.01 c	1 121.73 b	1291.94 a
Vc (mg/kg)	18.4 c	22.7b c	31.83 ab	35.93 a	30.6 ab	29.83 ab

注: 同行不同字母表示不同处理在 $p < 0.05$ 水平下差异显著。

3 讨论与结论

有研究表明, 根的生长状况和活力水平直接影响地上部的生长和营养状况及产量水平^[23]。适量的 N 能促进根系生长, 扩大作物摄取水分和养分的土壤空间, 使作物吸取和运转土壤水分的能力提高^[24]。刘代平等^[25]研究表明, 较高的根系干重、根系体积、一级侧根数、根系活力、根系吸收表面积, 都可能是油菜高效吸收 N 素的可能机理。本实验结果表明, N 素能显著增加茼蒿根干重、根表面积、根体积和根平均直径。但随着施 N 量的增加, 茼蒿根系的生长呈先上升后下降的趋势, 以 N3 (312 kg/hm²) 处理最高。说明 N 对茼蒿根系的促生长作用是有一定范围的, 过高的 N 不但不会进一步改善根系性状, 反而对根系生长产生抑制作用。在茼蒿的不同生育期, N3 (312 kg/hm²) 处理下的茼蒿总根长、根表面积和根体积最大, 根平均直径在收获前没有差异。表明适宜施 N 量对茼蒿根系生长的促进作用, 主要表现在根长和根系吸收表面积上的增加, 使茼蒿根系的吸水、保肥能力明显增强, 最终导致根产量和地上部生物量的增加。

另外, 本研究结果表明, 在太湖地区大棚栽培条件下, N3 (312 kg/hm²) 处理下的茼蒿产量最高, 达到 68.99 t/hm², 与农民习惯施 N 相比, 增产 25.1%, 表明在农民习惯施肥的基础上当季减 N 40% 不会导致当季作物减产, 然而高 N 水平处理下茼蒿产量反而出现下降的情况, 这是由于当 N 肥施用过量, 达到产量增加的潜力限度时, 作物过多吸收的养分不仅没有转换成产量, 反而不利于作物生长, 出现产量下降, 同时也造成养分浪费, 这与闵炬等^[26]的研究结果一致。

硝酸盐是蔬菜中的污染成分, 其含量高低是衡量蔬菜品质的重要依据之一。造成蔬菜硝酸盐含量高的主要原因之一是施肥不当。大量的实验表明, 过量施肥会导致叶菜类蔬菜硝酸盐积累超过卫生安全标准^[27-29], 闵炬等^[26]研究表明 N 肥施用过多亦可导致果菜类蔬菜硝酸盐大量积累, 但在根茎类蔬菜中还未发现此类问题。本实验研究结果表明, 农民习惯施 N 量 (520 kg/hm²) 下的茼蒿茎硝酸盐含量高达 1 291.94 kg/hm², 已超过 GB18406.1-2001 农产品安全质量无公害蔬菜根茎类 NO₃⁻ 限定 ≤ 1 200 mg/kg 的安全要求^[30], N4 处理下的硝酸盐含量也接近超标, 当引起重视。

综上所述, 对太湖地区秋季大棚茼蒿整个生长期的根系形态观察, 结果表明, N3 (312 kg/hm²) 处理对茼蒿根系的生长具有显著促进作用, 尤其表现为总根长、根体积和根表面积的增加。N3 处理下的茼蒿产

量最高, 营养品质最佳。因此, 我们推测, 适宜的施 N 量有利于茼蒿根系生长, 增大根系在土壤中的养分吸收空间, 提高根系对养分的充分吸收利用, 从而导致产量和 N 肥利用率的提高, 但具体机制还有待进一步实验探讨。

参考文献:

- [1] 程建峰, 姜东, 潘晓云, 曹卫星, 荆奇, 戴廷波. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收. 土壤学报, 2007, 44(2): 266-272
- [2] Schenk M, Heins B, Steingrobe B. The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization. Plant Soil, 1991, 135: 197-203
- [3] 赵首萍, 施卫明, 赵学强. 不同氮效率水稻品种苗期吸氮效率差异及其机理研究. 土壤, 2006, 38(4): 400-409
- [4] Eghball B, Settini JR, Maranville JW. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. Agron J., 1993, 85: 287-289
- [5] Feil B, Thirapon R, Geisler G. The impact of temperature on seedling root traits of European and tropical corn (*Zeamays* L.) cultivars. Agron Crop Sci., 1991, 166: 81-89
- [6] Stamp P. Chilling Tolerance of Young Plants Demonstrated on the Example of Maize (*Zeamays* L.). Berlin: Verlag Paul Parey, 1985
- [7] Bengough AG, Mullins CE. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. Soil Sci., 1990, 41: 341-358
- [8] 王辉, 董元华, 李德成, 安琼. 不同种植年限大棚蔬菜地土壤养分状况研究. 土壤, 2005, 37(4): 460-464
- [9] 于飞, 周健民, 王火焰, 陈小琴. 不同氮肥对油菜生长和养分吸收的影响. 土壤肥料, 2005(1): 20-22
- [10] 闻玉, 赵翔, 张骁. 水分胁迫下一氧化氮对小麦幼苗根系生长和吸收的影响. 作物学报, 2008, 34(2): 344-348
- [11] 李素梅, 施卫明. 不同氮形态对两种基因型水稻根系形态及氮吸收效率的影响. 土壤, 2007, 39(4): 589-593
- [12] 杨长明, 杨林章, 欧阳竹. 不同养分与水分管理对水稻植株根系形态及其活力的影响. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 82-85
- [13] 彭云峰, 张吴平, 李春俭. 不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较: 模拟与应用. 中国农业科学, 2009, 42(3): 843-853
- [14] 严继勇. 西洋芹 5 号产量构成因素及根重的相关与通径分析. 江苏农业科学, 1992(6): 44-45
- [15] 赵国苹, 虞娜, 刘启, 魏忠平, 张玉龙. 水氮配合对油菜生物量影响的研究. 土壤通报, 2006, 37(2): 298-302

- [16] 肖时运, 刘强, 荣湘民, 谢贵先, 廖育林. 不同施氮水平对茼蒿产量、品质及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 913-917
- [17] 钟攀, 朱洪霞, 董燕, 张玉霞, 李建勇, 王正银, 向华辉, 刘星. 不同土壤和氮磷钾配比对茼蒿的营养效应研究. 土壤, 2007, 39(6): 890-895
- [18] 狄彩霞, 李会合, 王正银, 丁华平, 黎小清, 李清荣, 向华辉, 刘星. 不同肥料组合对茼蒿产量和品质的影响. 土壤学报, 2005, 42(4): 652-659
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [21] 杨兆生, 闫素红, 王俊娟, 梁文科, 李亚兵, 张立桢. 不同类型小麦根系生长发育及分布规律的研究. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 47-50
- [22] 闫素红, 杨兆生, 王俊娟, 李铁庄, 王海峰. 不同类型小麦品种根系生长特性研究. 中国农业科学, 2002, 35(8): 906-910
- [23] 门中华, 李生秀. 硝态氮浓度对冬小麦幼苗根系活力及根际pH值的影响. 安徽农业科学, 2009, 37(1): 92-93
- [24] 李生秀, 李世清, 高亚军, 王喜庆, 贺海香, 杜建军. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 39-45
- [25] 刘代平, 宋海星, 刘强, 荣湘民, 彭建伟, 谢桂先, 刘浩荣. 油菜根系形态和生理特性与其氮效率的关系. 土壤, 2008, 40(5): 765-769
- [26] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 151-157
- [27] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝煊. 施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及模拟土柱氮磷淋失的影响. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 68-73
- [28] 王翠红, 唐建初, 刘钦云, 黄启为, 张杨珠, 黄运湘, 冯跃华. NPK 肥不同配比对萝卜产量及硝酸盐含量的影响. 生态与农村环境学报, 2006, 22(4): 62-66
- [29] 柏彦超, 高敏芳, 王娟娟, 倪梅娟, 钱晓晴, 丁峰, 邹忠. IFC 化肥增效剂对盆栽小白菜的生物效应和环境效应. 生态与农村环境学报, 2007, 23(4): 83-85, 89
- [30] 国家质量监督检验检疫总局. 农产品安全质量国家标准. 北京: 中国标准出版社, 2001: 1-4

Effects of Different N Rates on Root Morphology, Yield and Fruit Quality of Lettuce Cultivated in Plastic Greenhouse

LU Kou-ping^{1,2}, XIE Yin-feng¹, MIN Ju², SHI Wei-ming²

(¹ College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

² Research Center of Non-point Source Pollution Control, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Field experiments were carried out to study the effects of different N rates on dynamic changes of root morphological characteristics and the yield and quality of lettuce cultivated in plastic greenhouse. The results showed that as compared with farmer habitual N usage, 40% reduction of N fertilizer input enhanced significantly lettuce root growth, mainly in increasing the root surface area, volume and total root length greatly; but the promotion of nitrogen fertilizer on root diameter was only observed in the late stages of growth. The highest yield and vitamin C contents were obtained in the treatment of 40% reduction of N fertilizer input. Furthermore, nitrate contents of lettuce increased with increase of N fertilizer input. With farmer habitual N usage, nitrate content of lettuce reached as high as 1 291.9 mg/kg and exceeded the safety standard of safety and quality of agricultural products for root vegetables.

Key words: Taihu Lake region, Greenhouse vegetable, Nitrogenous fertilizer, Root system, Yield, Quality