

菜园土壤不同施肥模式下小青菜生长和品质 及其生态化学计量学特征^①

袁 伟^{1,2,3,4}, 董元华^{1,2*}, 王 辉^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 中国科学院南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008; 3 中国科学院研究生院,

北京 100049; 4 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 南京 210014)

摘 要: 利用盆栽试验研究了不同施肥处理对小青菜生长和品质的影响, 并在此基础上利用生态化学计量学方法研究了小青菜生长和品质与其生态化学计量学特征之间的相关关系。结果表明在盆栽的条件下施氮量为 180 kg/hm²是小青菜生长较为合适的水平, 能达到节氮保产的效果。在氮水平为 180 kg/hm²下, 有机无机肥配施模式 1 (含有氨基酸肥料) 提高了小青菜地上部的生长、碳浓度、光合速率、可溶性总糖、蔗糖、游离氨基酸含量和根系鲜重, 且这些指标与其地上部 C/N (碳氮比) 和 C/P (碳磷比) 之间存在显著正相关关系, 而与施肥模式中 C/N 和 C/P 之间存在正相关趋势, 但相关关系不显著。此外, 有机无机肥配施模式 1 降低了小青菜的地上部硝酸盐含量, 且该指标与其地上部和施肥模式中 N/P (氮磷比)、C/N、C/P 和 P/K (磷钾比) 之间均不存在相关关系。因此, 有机无机肥配施模式 1 促进了小青菜地上部和根系生长, 提高了光合速率, 改善了小青菜地上部的品质, 是一种科学的施肥措施。

关键词: 生态化学计量学; 有机无机配施模式; 氨基酸态氮; 小青菜; 生长; 品质

中图分类号: S141

小青菜具有生长快、生长期短、根系弱、复种指数高等特点, 因此需肥量较大 (尤其是氮肥)。菜农单纯追求经济效益, 忽视环境和生态效益, 长期大量施用 N 肥, 造成小青菜产量和品质降低, 给人类生存的环境和自身健康带来了多方面的影响和危害^[1-4]。近年来一些学者已经应用生态化学计量学研究施肥对植物生长的影响, 但多集中在森林、草原和湿地植物^[5-8], 对陆地生态系统研究较少。尽管生态化学计量学的发展和完善为研究养分供应平衡和植物体内元素组成平衡提供了新的思路和研究手段, 但是目前这方面的研究大多都只研究了植物体内元素化学计量比与单一因素的相关关系, 没有从更广的角度如土壤-肥料-植物一体化, 系统研究植物体内元素化学计量比与体内多因素如产量、品质、生理生化指标的相关关系规律。然而, 研究陆地生态系统中不同施肥模式条件下小青菜产量和品质与其地上部和其施肥模式中 N/P、C/N、C/P、P/K 相关关系规律, 可以反映小青菜对施肥后土

壤养分的响应和适应机制, 并能根据小青菜的响应和适应情况判断施肥的合理性和调整优化施肥措施。因此, 本研究通过盆栽试验, 研究了不同 N 肥用量下小青菜生长, 希望找出小青菜能正常生长的较低 N 肥用量, 然后在此 N 肥用量基础上采用盆栽试验, 研究了 5 种处理 (不施肥对照, 有机无机肥配施模式 1, 有机无机肥配施模式 2, 有机肥施肥模式, 无机肥施肥模式) 下小青菜生长和品质与地上部和其施肥模式中 N/P、C/N、C/P、P/K 关系, 旨在进一步验证大田条件下蔬菜生态计量学特征的结果, 以期能为科学施肥和养地用地的研究工作奠定一些基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小青菜 (*Brassica chinensis* L.) 品种为暑绿, 直播 30 天后采收。

1.2 试验地点

①基金项目: 国家农业科技成果转化资金项目 (2009GB24910540) 和江苏省科技项目 (BE2009698) 资助。

* 通讯作者 (yhdong@issas.ac.cn)

作者简介: 袁伟 (1979—), 女, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染与生态修复。E-mail: jaasyw@yahoo.com.cn

试验在中国科学院南京土壤研究所 209 室室内进行。供试土壤为南京郊外菜园土壤，供试土壤基本化学性质见表 1。

1.3 试验设计

试验一：参考全国N肥用量范围（180.5 ~ 416.9 kg/hm²），设 7 个施N处理（表 2），每处理重复 4 次。

试验二：在试验一所得适宜施N量下，设 5 个施肥模式处理，分别用I、II、III、IV、V（表 3），每个处理 4 次重复，随机排列。供试肥料养分含量、肥料种类、施肥方式和施肥量见表 3。肥料中C、N、P、K元素之间的含量摩尔分子比值见表 4。盆子的体积 =（上底面积 0.0027 m²+下底面积 0.0011 m²）×高 0.125 m/2。

表 1 供试土壤的基本化学性质
Table 1 Basic chemical properties of tested soils

PH	EC	有机 C	全 N	全 P	全 K
(1 : 2.5)	(mS/cm)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
6.90	0.084	14.63	1.35	0.34	6.96

表 2 试验一各处理的 N 肥用量（g/kg 土）
Table 2 The different nitrogen fertilizer treatments in experiment one

施肥量	处理						
	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6
基肥 N 量	—	0.65	2.70	5.40	0.64	2.69	5.39
追肥 N 量	—	—	—	—	0.01	0.01	0.01
总 N 含量	—	0.65	2.70	5.40	0.65	2.70	5.40
总 P 含量	—	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
总 K 含量	—	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
总 N/P	—	5.91	24.91	49.82	5.91	24.91	49.82

注：N/P 为含量摩尔比。

表 3 不同施肥模式中肥料种类、养分含量、施肥方式及施用量
Table 3 Fertilizer types, nutrient contents, and applied methods and rates of the different fertilization treatements

处理			施肥量	N 养分含量	折合为 N	P ₂ O ₅ 养分含量	折合为P ₂ O ₅	K ₂ O养分含量	折合为K ₂ O
			(g/kg 土)	(g/kg)	(g/kg 土)	(g/kg)	(g/kg 土)	(g/kg)	(g/kg 土)
不施肥对照 (I)			—	—	—	—	—	—	—
有机无机肥配施模式 1 (II)	基肥	植物氨基酸复合肥	1.20	89.23	0.64	79.94	0.54	93.16	0.46
		精致有机肥	19.44	19.43		20.40		14.59	
		植物氨基酸冲施肥	0.98	167.20		53.40		70.66	
		追肥 植物氨基酸液肥 (2 次)	0.01	108.63		40.81		51.18	
有机肥施肥模式 (III)	基肥	精致有机肥	33.34	19.43	0.64	20.40	0.68	14.59	0.48
无机肥施肥模式 (IV)	基肥	尿素	1.06	460	0.64	—	0.62	—	0.90
		硝酸钾	1.12	140		—		460	
		磷酸二氢钾	1.30	—		480		300	
有机无机肥配施模式 2 (V)	基肥	有机-无机复合肥	7.20	90	0.64	30	0.22	30	0.22

注：在有机无机肥配施模式 1 中 C 含量为 8.10 g/kg 土，有机肥施肥模式中 C 含量为 12.98 g/kg 土，无机肥施肥模式中 C 含量为 0.22 g/kg 土，有机无机肥配施模式 2 中 C 含量为 1.90 g/kg 土。

表4 不同施肥模式中N、P、C、K含量摩尔分子比值
Table 4 The ratio of N、P、C、K of the different fertilization treatments

处理	N/P	C/N	C/P	P/K
不施肥模式 (I)	0	0	0	0
有机无机肥配施模式 1 (II)	6.04	14.59	88.08	0.78
有机施肥模式 (III)	4.83	23.35	112.78	0.92
无机施肥模式 (IV)	5.26	0.39	2.07	0.46
有机无机肥配施模式 2 (V)	15.21	3.42	51.96	0.66

1.4 供试肥料

试验一中所用的肥料品种为：有机无机复合肥、有机肥、尿素、磷酸二氢钾、植物氨基酸液肥、氯化钾（含K₂O 600 g/kg，其他各肥料的养分含量见表3）。N1、N2、N3 所用的肥料品种相同，分别是：有机无机复合肥+有机肥+尿素+磷酸二氢钾+氯化钾；N4、N5、N6 所用的肥料品种相同，分别是：有机无机复合肥+有机肥+尿素+磷酸二氢钾+氯化钾+植物氨基酸液肥。除了植物氨基酸液肥（小青菜生长全过程喷施两次，秧苗长至1~1.5 cm喷施第一次，采收前的一个星期喷施第二次）作为追肥喷施，其他肥料均作为基肥一次性施用。试验二所用的肥料品种见表3。

1.5 测定项目与方法

土壤化学性状的测定：土壤pH用酸度计测定（土水比1:2.5）；土壤电导率用1:5土水比浸提，浸提液在10 000/min下高速离心，离心后的浸提液采用电导仪测定；土壤全N、全P和全K按常规分析方法测定^[9]；土壤有机碳（TOC）采用重铬酸钾容量法测定^[10]。小青菜地上部鲜、干重的测定：处理的小青菜采收后，用蒸馏水洗净，分别称鲜重；105℃下杀青30 min，60℃烘干至恒重后，称干重。不同施肥模式中养分含量的测定：全N、全P和全K按常规分析方法测定^[9]；C含量，即TOC含量采用沸水浴重铬酸钾法测定^[11]。小青菜地

上部养分含量和生理生化指标的测定：全N、全P和全K按常规分析方法测定^[8]；TOC采用重铬酸钾-外加热法测定^[12]；净光合速率用LI-6400（USA）光合测定仪测定；可溶性总糖和蔗糖含量采用蒽酮比色法测定^[13]；游离氨基酸含量采用茚三酮比色法测定^[13]；硝酸盐采用分光光度法测定^[14]；NR（硝酸还原酶）活性采用Aslam和 Huffaker的方法测定^[15]；GS（谷氨酰胺合成酶）活性采用Taira等方法测定^[16]。本文N/P、C/N、C/P和P/K化学计量比均分别为N、P、C和K含量摩尔分子比。

1.6 统计方法

所有数据采用SPSS13.0统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥用量下小青菜的生长

由图1结果显示，N1、N2、N3、N4、N5和N6六个处理小青菜地上部干鲜重显著高于对照N0，但6个处理之间差异不显著。小青菜在施N量为180 kg/hm²时生长良好，在施N量为750 kg/hm²和1 500 kg/hm²下小青菜的地上部干鲜重并没有随着施N量的增加而增加。这些研究结果表明在满足小青菜生长的基本施肥量后，小青菜的生长并不再受施肥量多少的影响，而可能只靠其体内生物学机制来调控。

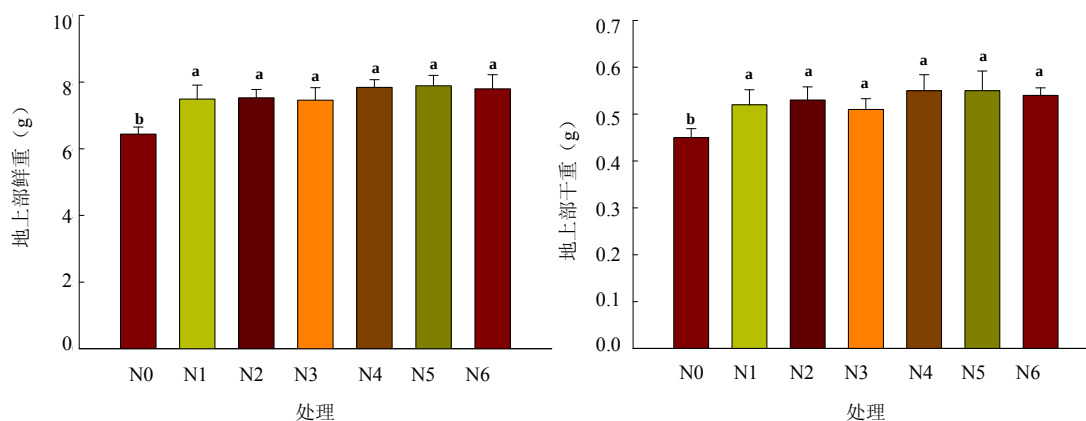


图1 不同N肥用量下小青菜地上部干鲜重

Fig.1 The dry weight and fresh weight of greengrocery shoot under different nitrogen treatments

2.2 不同施肥模式下小青菜（盆栽）的生长

表 5 的结果显示：小青菜地上部 N、P、C、K 含量均是对照处理 I 的结果最低；II 处理的小青菜地上部 C（碳）含量显著高于 III、IV 和 V 3 种处理；小青菜地上部 N、P、K 含量在 II、III、IV 和 V 4 种处理之间均无显著差异。表 6 的结果表明：在 5 种处理中，小青菜地上部鲜重、氨基酸含量、硝酸盐含量、可溶性总

糖、蔗糖和净光合速率均是对照处理 I 的结果最低，且处理 I 的这些指标均显著低于其他 4 个处理。有机无机肥配施模式 1（II）显著提高了小青菜地上部鲜重、氨基酸含量、可溶性总糖、蔗糖和净光合速率，而降低了小青菜地上部硝酸盐含量。这些结果进一步表明有机无机肥配施模式 1 可促进小青菜的生长和改善其品质。

表 5 不同施肥模式下小青菜地上部 N、P、K、C 含量（盆栽）

Table 5 The content of N、P、K、C in greengrocery shoot under the different fertilization treatments

处理	N 含量 (g/kg)	P 含量 (g/kg)	K 含量 (g/kg)	C 含量 (g/kg)
I	45.41 ± 1.34 b	5.05 ± 0.23 b	21.36 ± 0.89 b	253.13 ± 10.19 c
II	54.86 ± 2.17 a	5.62 ± 0.34 a	25.41 ± 1.12 a	355.42 ± 13.29 a
III	52.22 ± 2.28 a	5.71 ± 0.27 a	24.72 ± 1.09 a	313.24 ± 15.43 b
IV	53.15 ± 2.31 a	5.45 ± 0.36 ab	25.39 ± 0.92 a	309.91 ± 14.22 b
V	54.47 ± 2.22 a	5.66 ± 0.19 a	25.45 ± 1.15 a	321.78 ± 13.87 b

表 6 不同施肥模式下小青菜地上部鲜重、氨基酸含量、硝酸盐含量、可溶性总糖、蔗糖和净光合速率（盆栽）

Table 6 The content of fresh weight, free amino acids, nitrate, soluble sugar, sucrose and Pn in greengrocery shoot under the different fertilization treatments

处理	鲜重 (g)	游离氨基酸 (mg/100g FW)	硝酸盐含量 (mg/kg FW)	可溶性总糖 (%)	蔗糖 (%)	净光合速率 Pn (CO ₂ μmol/(m ² ·s))
I	6.43 ± 0.34 c	5.22 ± 0.24 c	712.34 ± 23.14 c	7.34 ± 0.22 c	1.43 ± 0.043 c	17.79 ± 0.62 c
II	8.24 ± 0.26 a	6.46 ± 0.28 a	995.21 ± 30.27 b	8.52 ± 0.38 a	2.28 ± 0.070 a	20.84 ± 0.93 a
III	7.18 ± 0.25 b	5.74 ± 0.21 b	1 104.43 ± 45.46 a	8.13 ± 0.46 b	1.89 ± 0.12 b	18.92 ± 0.51 bc
IV	7.24 ± 0.31 b	5.83 ± 0.25 b	1 146.74 ± 52.31 a	8.16 ± 0.51 b	1.83 ± 0.067 b	18.81 ± 0.76 bc
V	7.58 ± 0.38 b	6.02 ± 0.12 b	1 139.29 ± 39.92 a	8.24 ± 0.27 b	1.95 ± 0.090 b	19.13 ± 0.48 b

2.3 不同施肥模式处理对小青菜根系鲜重的影响

图 2 结果显示小青菜根系鲜重是不施肥模式（I）的结果最低，有机无机肥配施模式 1（II）最高，其他 3 个处理间差异不显著。这结果表明有机无机肥配施模式 1 可促进了小青菜的根系生长。

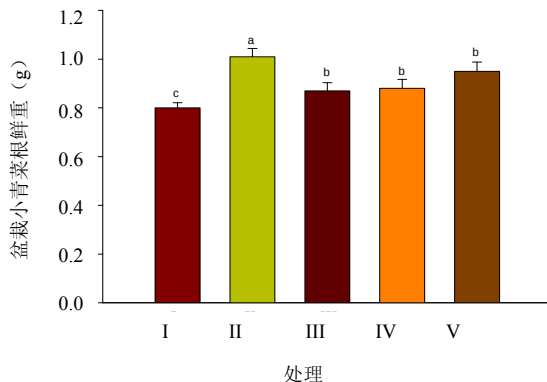


图 2 不同施肥模式下小青菜根系鲜重（盆栽）

Fig.2 The root fresh weight of greengrocery under the different fertilization treatments

2.4 小青菜地上部生长生理指标与其生态化学计量学特征的相关关系

表 7 的结果表明：小青菜地上部鲜重与其地上部 C/N 之间存在显著正相关关系；小青菜地上部光合速率、可溶性总糖、蔗糖含量和根系鲜重与其地上部 C/N 和 C/P 之间均存在显著正相关关系；小青菜地上部游离氨基酸含量与其地上部 N/P、C/N 和 C/P 之间存在显著正相关关系；小青菜地上部硝酸盐含量与其地上部 N/P、C/N、C/P、P/K 之间不存在显著相关关系。小青菜地上部蔗糖含量与其施肥模式中 C/P 之间存在显著正相关关系。小青菜地上部鲜重、游离氨基酸含量、硝酸盐含量、可溶性总糖含量和光合速率与其施肥模式中 N/P、C/N、C/P 和 P/K 之间均不存在显著相关关系。这些结果表明小青菜的生长和品质可能受体内生态化学计量学特征的调控。结合上面的研究结果表明在满足小青菜基本施肥量后，小青菜的生长和品质并不是随着施肥量的提高而提高，而是可能靠其体内生态化学计量学特征来调控。

表7 小青菜生长生理指标与其地上部和施肥模式中生态化学计量学特征的相关系数

Table 7 The correlation between physiology response parameters of greengrocery and ecological stoichiometry characteristics in the greengrocery shoot and different fertilization treatments

		地上部 鲜重	地上部 氨基酸含量	地上部 硝酸盐含量	地上部 可溶性总糖	地上部 蔗糖含量	地上部 光合速率	根系 鲜重
蔬菜地上部	N/P	0.603 9	0.679 1*	0.400 9	0.650 6	0.547 3	0.490 4	0.449 8
	C/N	0.925 2**	0.847 4**	0.128 3	0.725 3*	0.909 4**	0.967 9**	0.772 9*
	C/P	0.765 8	0.784 5*	0.537 3	0.901 9**	0.884 7**	0.893 9**	0.816 1*
	P/K	0.390 2	0.455 3	0.526 0	0.537 0	0.361 0	0.125 1	0.443 9
施肥模式中	N/P	0.015 2	0.012 9	0.110 4	0.000 2	0.001 2	0.013 2	0.103 6
	C/N	0.118 2	0.342 1	0.257 3	0.133 1	0.512 2	0.502 4	0.001 5
	C/P	0.240 3	0.472 9	0.316 6	0.524 0	0.859 5*	0.444 2	0.038 4
	P/K	0.031 3	0.007 7	0.227 6	0.158 7	0.112 7	0.075 0	0.010 6

注： ** 表示在 $p < 0.01$ 水平显著， * 表示在 $p < 0.05$ 水平显著。

3 小结

(1) 在盆栽的条件下，小青菜在施N量为 180 kg/hm²时生长良好，在施N量为 750 kg/hm²和 1 500 kg/hm²下小青菜的地上部干鲜重并没有随着施N量的增加而增加，表明施N量为 180 kg/hm²是小青菜较为合适的水平，能达到节N保产的效果。

(2) 在盆栽的条件下，有机无机肥配施模式 1(含有氨基酸肥料)促进小青菜地上部和根系的生长，改善小青菜的品质。

(3) 在盆栽的条件下，小青菜地上部和根系的生长及品质与其地上部 C/N 和 C/P 之间存在显著相关关系且与其施肥模式中 C/N 和 C/P 存在正相关趋势。

(4) 合理搭配肥料促进蔬菜的光合固碳能力和根系生长，进而提高蔬菜体内 C/N、C/P 的值，有利于提高蔬菜的产量和品质，是一种科学的施肥措施。

参考文献：

- [1] 曹志洪. 施肥与水体环境质量—论施肥对环境的影响(2). 土壤, 2003, 35(5): 353–363
- [2] 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
- [3] 庄舜尧, 孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡. 土壤, 1997(2): 80–83
- [4] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. 植物营养和肥料学报, 1995, 1(2): 80–87
- [5] 刘其霞. 人工湿地植物营养元素积累及其生态化学计量学研究(硕士学位论文). 浙江杭州: 浙江大学, 2006: 25–29
- [6] 高三平, 李俊祥, 徐明策. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. 生态学报, 2007, 27(3): 947–952
- [7] Zhang LX, Bai YF, Han XG. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. Acta Botanica Sinica, 2003, 45: 1 009–1 018
- [8] 陈伏生, 胡小飞, 葛刚. 城市地被植物麦冬叶片氮磷化学计量比和养分再吸收效率. 草业学报, 2007, 16(4): 47–54
- [9] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–226
- [10] 李志鹏, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 林凡. 水稻土和湿地土壤有机碳测定的 CNS 元素分析法与湿消化容量法之比较. 土壤, 2008, 40(4): 580–585
- [11] 蔡耕鸣, 梁运献, 罗小红, 李梅, 邓秀汕. 沸水浴重铬酸钾法测定有机无机肥料中有机碳. 西南农业学报, 1999, 12(3): 70–74
- [12] 葛绪广, 王国祥, 李振国, 王文林, 潘国权. 凤眼莲植株碳、氮、磷含量的动态变化. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13 620–13 621
- [13] 汤章城主编. 现代植物生理学实验指南. 上海: 科学出版社, 1999: 91–102
- [14] 李劲峰, 虞贺新. 不同储藏条件下蔬菜硝酸盐及亚硝酸盐的变化. 浙江农业科学, 2008(4): 404–405
- [15] Aslam M, Huffaker RC. Role of nitrate and nitrite in the induction of nitrite reductase in leaves of barley seedlings. Plant Physiology, 1989, 91: 1 152–1 156
- [16] Taira M, Valtersson U, Burkhardt B. Arabidopsis thaliana GLN2-Encoded glutamine synthetase is dual targeted to leaf mitochondria and chloroplasts. Plant Cell, 2004, 16: 2 048–2 058

Growth and Qualities of Greengrocery and Its Ecological Stoichiometry Characteristics Under Different Fertilization

YUAN Wei^{1,2,3,4}, DONG Yuan-hua^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China;

2 *ISSAS-HKBU Joint Laboratory on Soil and Environment, Nanjing 210008, China;* 3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing*

100049, China; 4 *Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*)

Abstract: The growth and qualities of greengrocery was studied under pot conditions, and the correlation between ecological stoichiometry characteristics and growth and qualities of greengrocery was also studied. These results showed that the 180 kg/hm² nitrogen was the best fertilization for greengrocery. The growth, C content, net photosynthetic rate (Pn), the soluble sugar, sucrose, free amino acids content and the root fresh weight in greengrocery showed an increase in the organic fertilizers plus inorganic fertilizers 1 treatment. Moreover, these indicators were significantly correlated with the ratios of C/N, C/P in the shoot of greengrocery. However, the nitrate content in greengrocery showed an decrease in the organic fertilizers plus inorganic fertilizers 1 treatment and had not the correlation with the ratio of N/P, C/N, C/P, P/K in greengrocery shoot and fertilization. These results suggested that we can improve the shoot and root growth, net photosynthetic rate and qualities of greengrocery by using the organic fertilizers plus inorganic fertilizers 1 treatment.

Key words: Ecological stoichiometry, Organic fertilizers plus inorganic fertilizer, Amino acid, Greengrocery, Growth, Quality