

福建主要蔬菜氮磷钾营养特性及其施肥指标体系研究

I . 需肥动态模型及其特征参数分析

章明清¹, 李娟¹, 孔庆波¹, 姚宝全²

(1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013;
2. 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福建 福州 350003)

摘 要: 采用盆栽和田间试验以及回归分析方法, 建立供试蔬菜根长增长模型和氮磷钾累积吸收动态模型。结果表明, 在一个种植周期中, 空心菜和苋菜根长增长以及空心菜、茼蒿、白萝卜和大白菜氮磷钾累积吸收动态均呈现“S”型特征, 2个根长增长模型和30个不同处理的蔬菜氮磷钾累积吸收动态模型均达到统计显著水平。根据根长增长模型和养分累积吸收动态模型, 可得到蔬菜根长增长常数 l_0 、养分吸收常数 k 、最大养分吸收速率 In_{max} 及其时间 t_{max} 、最大养分吸收量 U_{max} 及其时间 t_c 等根系养分吸收特征参数; 施肥对 k 、 In_{max} 和 U_{max} 有明显的正效应; t_{max} 值和 t_c 值主要由品种的营养特性决定, 受施肥的影响很小; 达到最大养分吸收速率时的肥料利用效率最高, 是确定最佳追肥时间的依据; 最大养分吸收量出现在生育后期, 在生育中后期应追施适量的肥料, 以满足蔬菜高产对养分的需要。

关键词: 蔬菜; 根系; 养分; 吸收; 模型

中图分类号: S 512.106.1

文献标识码: A

Nutrients and NPK Fertilization for Major Vegetables in Fujian

I . Dynamic Absorption and Parameters of NPK Fertilization

ZHANG Ming qing¹, LI Juan¹, KONG Qing bo¹, YAO Bao quan²

(1. Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China;
2. Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: Nitrogen, phosphor and potassium are essential elements for vegetable fertilization. Pot and field experiments were conducted using root length to correlate with cumulative NPK absorption to establish a mathematical model by regression analysis. The results showed that, within a growth period, the curves of root length increase and NPK absorption of water spinach, lettuce, radish and Chinese cabbage were all in an "S" shape. Two root growth models for the water spinach and 30 NPK cumulative absorption models for the pot and field experiments all reached a statistical significance level. Based on the models, the following indices could be obtained: root length increase constant (l_0), nutrient absorption constant (k), maximum NPK absorption rate (In_{max}), and time (t_{max}) and maximum NPK absorption amount (U_{max}) and time (t_c). Results showed that the fertilization had significant positive effect on k , In_{max} and U_{max} . But t_{max} and t_c were determined largely by the vegetables' nutrition characteristics and little by the fertilization. The fertilization was most effective at In_{max} , and therefore, In_{max} should be the base for top dressing NPK applications. U_{max} appeared during late growth stage. And, fertilization during the mid to late growth period ought to provide the needed nutrients for the vegetables.

Key words: vegetable; root; nutrient; absorption; model

蔬菜氮磷钾需肥特性是科学施肥的主要依据之一。了解和掌握养分需求动态, 有助于制定合理的施肥量和肥料分配方案, 促进蔬菜生长发育和提高产量。蔬菜主要通过根系吸收得到生长发育所需养分, 因此, 研究蔬菜需肥特性就涉及到根系生长及

其吸收能力两个方面。以根长作为根系增长的指标, Mengel D B 等^[1]、冯广龙等^[2]、张喜英等^[3]、王绍中等^[4]、杨青华等^[5]、Stephe D 等^[6]和 Amos B 等^[7]的研究表明, 一个种植周期中, 在植物生长前期根长增长缓慢, 但在旺盛生长的中期, 根长随

收稿日期: 2010- 11- 11 初稿; 2011- 04- 06 修改稿

作者简介: 章明清 (1963-), 男, 研究员, 博士, 从事平衡施肥和施肥与环境研究 (E mail: Zhangmq2001@163.com)

基金项目: 国际植物营养研究所合作项目 (Fujian 09); 福建省科技计划重点项目 (2008Y0023)

时间呈线性增加, 并达到最大值; 在植物进入成熟衰老期后, 根长就开始减少, 整个生育期呈现“S”型特点。在养分吸收动态方面, 邹娟等^[8]对油菜氮磷钾吸收、蒋工颖等^[9]对大豆氮磷钾吸收、郑志明等^[10]对水稻氮吸收以及续勇波等^[11]对萝卜氮磷钾吸收研究都表明, 随着生育期的推移, 植株氮磷钾累积量不断增加, 到成熟期达到最大, 此后则呈下降趋势, 与根长增长一样, 整个生育期亦呈现“S”型特征。但是, 目前根据这种动态特征建立模型以供定量施肥分析的研究报道还很少。

本文根据近年来蔬菜盆栽和田间试验结果, 探讨蔬菜一个种植周期的根长增长和氮磷钾吸收特性, 建立根长增长模型和根系养分吸收动态模型, 以期以供试蔬菜需肥特性分析和中后期养分管理提供依据。

1 材料与 方法

1.1 盆栽试验

于 2005 年 5~6 月和 2007 年 4~6 月分别在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室进行空心菜和茼蒿盆栽试验。试验设氮磷钾平衡施肥处理。空心菜施肥量分别为每盆 N 0.5 g、P₂O₅ 0.3 g 和 K₂O 0.4 g, 茼蒿施肥量分别为每盆 N 0.8 g、P₂O₅ 0.6 g 和 K₂O 0.8 g, 供试土壤为灰黄泥土, 理化性状见表 1。在盆栽试验前 2 个月, 取各供试土壤 200 kg 并在自然状态下风干, 然后粉碎土壤, 过 3 mm 筛, 去除小石头等杂物。选择 23 cm×17 cm 的塑料盆, 每盆装土 2.5 kg, 重复 15 盆。试验所用氮磷钾肥料分别为化学纯的尿素 (N 46%)、KH₂PO₄ (P₂O₅ 52.2%, K₂O 34.5%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。在播种前 5 d, 肥料溶于去离子水后喷施于每盆土壤中并充分混合均匀, 用去离子水浇灌供试土壤并保持土壤呈湿润状态。5 d 后每盆播种种子 20 粒, 齐苗后进行间苗, 每盆保持 12 株。在试验期间, 用去离子水浇灌, 土壤保持湿润状态。空心菜种植周期为 45 d, 茼蒿种植周期为 64 d。

1.2 田间试验

本课题研究采用氮磷钾 5 个或 6 个水平的田间试验, 但本文涉及到的试验只有 4 个处理, 即①不施氮 (N₀P₁K₁); ②不施磷 (N₁P₀K₁); ③不施钾 (N₁P₁K₀); ④平衡施肥 (N₁P₁K₁)。每个试验点均采用随机区组排列, 3 次重复, 小区面积 20 m²。选择肥力均匀的代表性土壤作为试验田, 供试土壤分别为灰泥土、灰黄泥土和灰沙土等, 供试蔬菜为空心菜、茼蒿、大白菜和白萝卜。

平衡施肥的推荐施肥量 (N-P₂O₅-K₂O, kg·hm⁻²) 分别为空心菜 150-45-105、茼蒿 150-60-180、大白菜 225-90-270 和白萝卜 225-90-225。肥料选用尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (K₂O 60%)。50% 氮钾肥和全部磷肥做基肥施用, 余下的氮钾肥分 2 次做追肥施用。试验在供试蔬菜当地正常大田种植季节内进行, 选用当地大面积种植的品种。其他栽培管理措施与大田生产一致。空心菜氮肥试验点的生长期 56 d, 磷钾肥试验点则为 50 d; 白萝卜和大白菜氮磷钾平衡施肥试验的生长期分别为 56 d 和 99 d; 茼蒿氮磷肥试验点的生长期为 95 d, 钾肥试验点则为 106 d。

1.3 取样及测定方法

田间试验实施前, 取耕层基础土样用常规方法^[12]测定土壤主要理化性状 (表 1)。在试验期间, 依不同品种生育期长短取植株样品 5~7 次。盆栽试验每次取 2 盆, 最后一次收获取 3 盆; 田间试验则每次取 1 m² 的植株样品。依生育期长短确定取样时间间隔, 齐苗后约 15 d 为第 1 次取样, 以后每隔 10~15 d 取样 1 次, 直至收获, 同一个试验取样时间间隔相同。取植株样品时即刻称取鲜重, 带回实验室烘干称取烘干重。用常规方法^[12]即 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 分别用蒸馏法、钒钼黄比色法和火焰光度计法测定植株氮、磷、钾含量。

盆栽试验每次取样时, 用水仔细冲洗干净根系黏着的土壤, 然后用吸水纸吸干水分, 即刻称取根系鲜重。由于植物根通常都作为圆柱体处理, 因而可用平均根半径 (0.02 cm) 和比重 (1.0 g·cm⁻³) 计算根系长度。试验数据采用 MATLAB 软件进行统计分析。

1.4 蔬菜根长增长和氮磷钾吸收模拟模型

1.4.1 根长增长模型的建立 根据国内外作物根长增长具有“S”型特征的研究结果^[11-7], 可用如下简洁的数学模型来表达:

$$\frac{dL(t)}{dt} = l_0 t \left(1 - \frac{t}{T}\right) \tag{1}$$

其中, $L(t)$ 是指在时间 t 时的根长 (cm·pot⁻¹), $dL(t)/dt$ 是根长的增长速率 (cm·d⁻¹·pot⁻¹, d 表示“天”), t 是指植物生长时间 (d), 以播种时开始计算。 T 是试验期间最大根长时间 (d), l_0 是根长的内在增长率 (cm·d⁻²·pot⁻¹), 简称根长增长常数。对 (1) 式积分, 即得根长增长模型:

$$L(t) = \frac{1}{2} l_0 t^2 \left(1 - \frac{2}{3T} t\right) \tag{2}$$

对一个种植周期而言, (2) 式的数学分析表明, 当 $t = T$ 时, 根长达到最大值 L_{\max} ; 且当 $t = 0.5T$ 时, 根长增长速率 RV_{\max} 达到最大值, 即 $RV_{\max} = l_0T/4$ 。

表 1 蔬菜各供试土壤主要理化性状
Table 1 Main physical and chemical properties of tested soils

试验	作物及试验内容	土壤类型	pH	有机质 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	Olsen - P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)
盆栽试验	空心菜氮磷钾试验	灰黄泥土	6.8	18.9	143.1	86.3	112.1
	苋菜氮磷钾试验	灰黄泥土	5.9	15.6	157.4	46.5	138.9
田间试验	空心菜氮肥试验	灰黄泥土	5.8	18.3	126.7	75.4	60.8
	空心菜磷钾肥试验	灰泥土	4.7	13.4	109.9	49.4	102.5
	茼蒿氮磷肥试验	灰泥土	5.2	18.2	135.8	37.2	85.0
	茼蒿钾肥试验	灰泥土	5.4	16.9	161.4	61.9	35.6
	白萝卜平衡施肥试验	灰沙泥土	4.9	21.5	127.6	104.2	17.9
	大白菜平衡施肥试验	灰沙土	6.2	9.6	142.5	111.2	120.3

1.4.2 氮磷钾吸收动态模型的建立 根系养分吸收量不仅与根长有关, 还与根系对养分的吸收能力密切相关。鉴于根长增长动态和养分吸收动态共有的“S”曲线特征, 在无其他障碍因子时假设植物群体平均的单位根表面积养分吸收速率 $\beta(t)$ (g · cm⁻² d⁻¹) 与根系生长同步, 则 $\beta(t)$ 可用下式表达:

$$\beta(t) = \beta_0 t (1 - \frac{t}{T}) \tag{4}$$

式中的 β_0 是根系吸收力常数 (g · cm⁻² d⁻²)。不同根段吸收的养分向地上部转移的贡献差异很小^[13], 因而根系养分吸收速率等于根系总表面积 $S(t)$ 和单位根表面积养分吸收速率 $\beta(t)$ 的乘积, 而 $S(t) = 2\pi r_0 L(t)$ 。根据 (2) 式和 (4) 式得到根系养分吸收动态模型:

$$U(t) = kt^4 (\frac{1}{4} - \frac{1}{3T}t + \frac{1}{9T^2}t^2) \tag{5}$$

式中 $U(t)$ 为作物养分吸收量 (g · pot⁻¹, g · m⁻²); k 为根系养分吸收常数, 且 $k = \pi r_0 \beta_0 l_0$ 。因此, 可根据盆栽或田间试验在不同生育期的供试作物养分吸收量的测定值来估计 k 、 T 参数。特别当 $t = T$ 时, 养分最大吸收量可由下式计算: $U_{\max} = 0.02778kT^4$ 。令 (6) 式的二阶导数等于 0, 可求得最大养分吸收速率 ln_{\max} 及其出现的时间 t_{\max} 。即: $ln_{\max} = 0.0550kT^3$ 和 $t_{\max} = 0.6838T$ 。

2 结果与分析

2.1 根长增长模拟模型

根据种植周期为 45 d 的空心菜和 64 d 的苋菜根系鲜重的测定结果计算根长, 用 (2) 式模型对

根长及其对应的种植时间进行回归分析, 得空心菜根长增长模型的 l_0 为 103.45, T 为 41.105, F 值为 61.5^{**} (“^{**}”表示极显著水平); 苋菜根长增长模型的 l_0 为 31.257, T 为 66.451, F 值为 1043.3^{**}, 图 1 是根长模拟效果。结果表明, 空心菜播种后到 40 d 左右和苋菜播种后到 50 d 左右, 根长增长类似指数式, 而空心菜大致第 15~40 d 和苋菜大致在 20~50 d 之间, 则以线性形式增长, 但整个种植周期则满足“S”型特征, 说明 (2) 式模型能较好地反映了种植周期内的根长增长动态。

2.2 氮磷钾吸收动态模拟模型

2.2.1 盆栽条件下蔬菜氮磷钾吸收模拟效果 根据盆栽空心菜不同生育期的氮磷钾吸收量与对应种植时间, 分别对 (5) 式模型进行回归分析, 结果见表 2。6 个回归模型的 F 值均达到统计显著水平, 表明 (5) 式能很好地反映盆栽条件下空心菜和苋菜在不同生长期的氮磷钾吸收动态。空心菜氮磷钾累积吸收动态模型中的 T 值平均为 45.1 d, 苋菜则为 61.6 d, 与根长增长模型确定的 T 值差异很小, 说明上述建模的假设是可行的。

2.2.2 田间条件下氮磷钾吸收模拟效果 根据不同生育期氮磷钾吸收量与对应种植时间对 (5) 式进行回归分析, 结果见表 3, 大白菜和茼蒿氮磷钾处理的养分吸收量模拟效果见图 2。结果表明, 4 种供试蔬菜的 24 个回归模型的 F 值均达到显著水平。分析表明, 大白菜平衡施肥处理在生长期内, 磷素吸收一直处于上升状态, 导致 T 值明显大于生长期, 但其他 23 个模型的 T 值基本落在供试蔬

菜生长期内, 结果显示, (5) 式养分吸收动态模型能够很好地反映供试蔬菜在田间条件下的氮磷钾吸

收动态, 且不受土壤类型的影响。

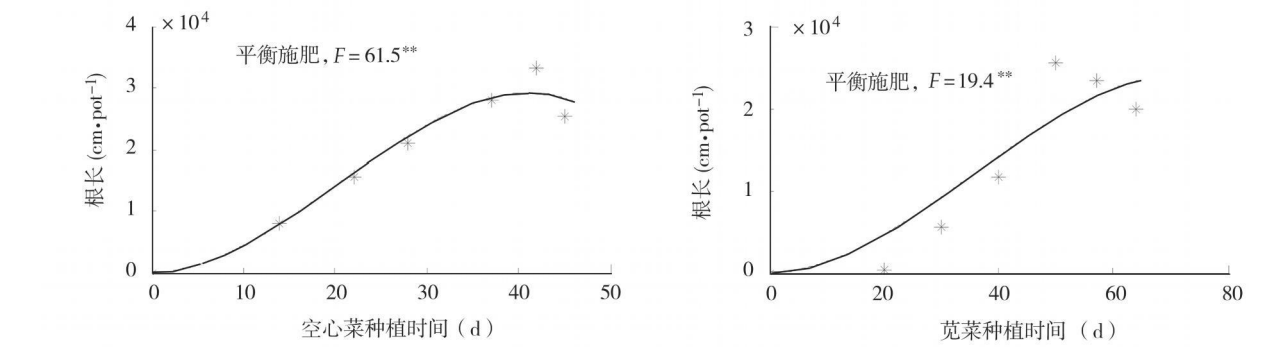


图 1 空心菜和苋菜根长增长模拟结果

Fig 1 Simulated root growth of water spinach and edible amaranth

注: “*” 为实测值。

表 2 空心菜和苋菜氮磷钾累积吸收动态的模型参数						
Table 2 Parameters in cumulative NPK absorption models for water spinach and edible amaranth						
养分	空心菜			苋菜		
	$k (\times 10^{-7})$	T	F 值	$k (\times 10^{-6})$	T	F 值
N	60.418	39.212	261.9**	1.6183	64.021	71.6**
P	7.4165	51.883	92.9**	0.2798	63.452	72.1**
K	84.337	44.331	1043.3**	2.5862	57.236	28.1**

表 3 供试蔬菜一个种植周期的氮 磷钾吸收动态的回归分析											
Table 3 Regression analysis on cumulative NPK absorption for selected vegetables within a growth period											
蔬菜	处理	养分	模型参数及其 F 值			蔬菜	处理	养分	模型参数及其 F 值		
			k	T	F 值				k	T	F 值
空心菜	(1) $N_0P_1K_1$	N	1.5768e 5	49.374	24.1**	白萝卜	(1) $N_0P_1K_1$	N	0.9447 e 6	51.525	49.3**
	(2) $N_1P_0K_1$	P	1.6828e 5	39.961	20.5**		(2) $N_1P_0K_1$	P	0.2274 e 5	49.028	98.1**
	(3) $N_1P_1K_0$	K	2.1705e 4	46.642	51.8**		(3) $N_1P_1K_0$	K	0.7877 e 5	57.027	27.0**
	(4) $N_1P_1K_1$	N	4.6475e 5	48.467	11.8**		(4) $N_1P_1K_1$	N	1.8125 e 5	68.092	453.6**
		P	1.2903e 5	44.473	65.0**			P	0.2400 e 5	55.315	52.4**
		K	2.5654e 4	46.782	78.0**			K	2.0664 e 5	64.239	798.0**
大白菜	(1) $N_0P_1K_1$	N	1.1128e 6	99.556	49.0**	莴苣	(1) $N_0P_1K_1$	N	2.9765e 6	94.377	177.7**
	(2) $N_1P_0K_1$	P	3.3518e 7	98.327	42.1**		(2) $N_1P_0K_1$	P	3.8367e 7	105.43	15371**
	(3) $N_1P_1K_0$	K	2.9595e 6	99.772	86.4**		(3) $N_1P_1K_0$	K	2.4209e 7	110.89	99.9**
	(4) $N_1P_1K_1$	N	5.3276e 6	102.79	25.1**		(4) $N_1P_1K_1$	N	2.9025e 6	103.33	115.1**
		P	3.6135e 7	183.05	162.1**			P	5.1639e 7	103.30	4908.5**
		K	7.5138e 6	121.27	67.5**			K	1.1792e 6	114.52	42.5**

注: ** 养分吸收量的计量单位为 g·m⁻²; 时间为 d。

2 3 田间条件下供试蔬菜氮磷钾吸收特性的定量分析

2 3 1 最大养分吸收速率及其时间 (5) 式模型可

计算得到供试蔬菜最大养分吸收速率及其出现的时间等根系养分吸收特征参数, 结果见表 4。与缺素区相比, 平衡施肥大都提高了供试蔬菜对相应氮、

磷、钾养分的最大吸收速率。平均而言,平衡施肥条件下氮磷钾最大吸收速率分别为(0.2448 ± 0.0496) $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 、(0.0554 ± 0.0303) $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和(0.8410 ± 0.8174) $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,钾素最大吸收速率大于氮素,氮素大于磷素。但不同蔬菜品种对氮磷钾最大吸收速率也有明显的差别,氮素变化幅度为 $0.1761 \sim 0.2857 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,白萝卜最

小而莴苣最大,差异1.6倍;磷素变化幅度为 $0.0269 \sim 0.0891 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,白萝卜最小,而大白菜最大,差异3.3倍;钾素变化幅度为 $0.1021 \sim 0.9258 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,莴苣最小,而大白菜最大,差异9.1倍。结果表明,不同蔬菜品种由于营养特性和土壤肥力水平等因素的差异,氮磷钾利用效率有明显差别。

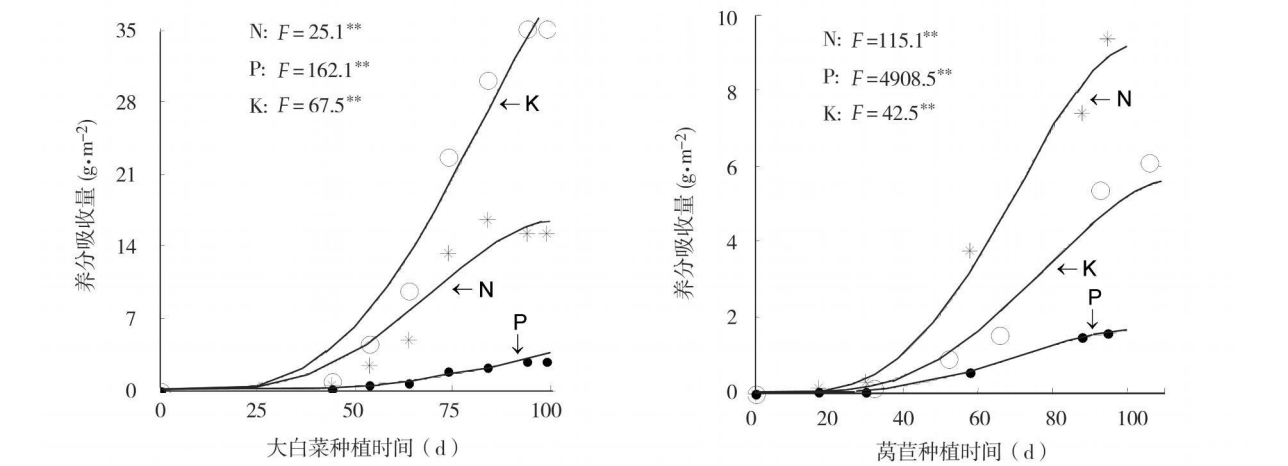


图 2 田间条件下大白菜和莴苣氮磷钾吸收动态模拟效果

Fig 2 Simulated cumulative NPK absorption models for Chinese cabbage and lettuce under field conditions

注: “○, *, ·” 为实测值。

Table 4 NPK absorption of selected vegetables within a growth period													
蔬菜	处理	养分	最大吸收速率		最大吸收量		蔬菜	处理	养分	最大吸收速率		最大吸收量	
			速率	时间	吸收量	时间				速率	时间	吸收量	时间
			In_{max}	t_{max}	U_{max}	t_c				In_{max}	t_{max}	U_{max}	t_c
空心菜	(1) $N_0P_1K_1$	N	0.0885	32.1	2.5025	50.6	白萝卜	(1) $N_0P_1K_1$	N	0.0985	41.3	3.8241	67.6
	(2) $N_1P_0K_1$	P	0.0840	29.8	1.3135	38.8		(2) $N_1P_0K_1$	P	0.0195	37.6	0.6436	59.4
	(3) $N_1P_1K_0$	K	1.7117	34.1	30.472	44.3		(3) $N_1P_1K_0$	K	0.2963	41.9	4.1880	49.4
	(4) $N_1P_1K_1$	N	0.2416	31.4	6.8555	50.2		(4) $N_1P_1K_1$	N	0.1761	37.2	5.8184	59.2
		P	0.0726	31.7	1.4510	43.7			P	0.0269	35.8	0.7784	54.5
		K	1.9546	33.1	36.814	44.1			K	0.3813	40.8	8.9642	54.6
莴苣	(1) $N_0P_1K_1$	N	0.1838	66.0	6.7699	87.4	大白菜	(1) $N_0P_1K_1$	N	0.0631	73.4	2.5695	97.1
	(2) $N_1P_0K_1$	P	0.0252	71.6	1.2935	103.5		(2) $N_1P_0K_1$	P	0.0687	75.3	2.7582	98.4
	(3) $N_1P_1K_0$	K	0.0240	75.9	1.0000	100.1		(3) $N_1P_1K_0$	K	0.6902	75.4	27.673	98.4
	(4) $N_1P_1K_1$	N	0.2857	67.6	9.6392	86.8		(4) $N_1P_1K_1$	N	0.2759	71.1	11.536	95.8
		P	0.0329	69.7	1.5834	99.4			P	0.0891	82.8	3.5675	105.4
		K	0.1021	74.9	4.6449	101.9			K	0.9258	75.3	35.670	97.3

注: 吸收速率的计量单位为 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; 吸收量 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 时间为 d。

空心菜氮磷钾最大吸收速率平均为播种后的第 (32.0 ± 1.5) d, 白萝卜平均为播种后的第 (37.9 ± 3.2) d, 莴苣平均为播种后的第 (71.0 ± 3.9) d, 大白菜则为播种后的第 (73.6 ± 4.3) d。结果

表明，在田间条件下，最大养分吸收速率出现时间的变异系数均很小，说明同种蔬菜氮磷钾最大吸收速率的出现时间基本是同步的。由于在植物养分最大吸收速率的生育期里，养分的利用效率最高，因此，最大养分吸收速率时间是确定最佳追肥时间的重要依据。

2.3.2 最大养分吸收量及其出现的时间 根据 (5) 式模型，还可计算得到供试蔬菜最大养分吸收量及其出现的时间等根系养分吸收特征参数，结果见表 4。与缺素区相比，平衡施肥都提高了供试蔬菜对氮磷钾的最大吸收量。平均而言，4 个供试蔬菜氮素最大吸收量为 $(8\,4623 \pm 2\,6080) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $(1\,8451 \pm 1\,2012) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(21\,5233 \pm 17\,0933) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。除莴苣外，钾素最大吸收量明显大于氮素，磷素吸收量最小。不同作物间最大氮磷钾吸收量存在明显差异，氮素变化幅度在 $5\,818.4 \sim 11\,156.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，白萝卜最小而大白菜最大，差异 1.9 倍；磷素变化幅度为 $0\,778.4 \sim 3\,567.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，同样是白萝卜最小，而大白菜最大，差异 4.6 倍；钾素则变化幅度为 $4\,644.9 \sim 36\,814.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，莴苣最小，而空心菜最大，差异 7.9 倍。结果表明，不同蔬菜品种由于氮磷钾营养特性、产量水平和土壤肥力水平等因素的差异，最大氮磷钾吸收量明显不同，结果可为确定施肥量提供参考。

计算表明，空心菜、白萝卜、莴苣和大白菜的氮磷钾最大吸收量出现时间分别为播种后的 $(45.3 \pm 4.5) \text{ d}$ 、 $(56.8 \pm 6.2) \text{ d}$ 、 $(96.5 \pm 7.4) \text{ d}$ 和 $(96.4 \pm 4.5) \text{ d}$ ，表明同种蔬菜的变异系数均很小。结果显示，供试蔬菜的氮磷钾最大吸收量时间也基本是同步的；最大氮磷钾吸收量时间可为中后期追肥时间的确定提供依据。

3 讨论与结论

在总结前人研究结果的基础上，本文提出了蔬菜根长增长模型。盆栽试验表明，空心菜和苋菜在一个种植周期中根长增长呈现“S”型特征。2 个根长增长模型均较好地反映了供试蔬菜在一个种植周期的根长增长动态。该模型具有简洁和待估参数少的优点。

本文在根长增长模型基础上建立了蔬菜氮磷钾累积吸收量动态模型。盆栽和田间试验均表明，该模型均能很好地拟合供试蔬菜在一个种植周期的氮磷钾累积吸收量动态，30 个回归模型均达到统计显著水平，且不受土壤类型的影响。养分吸收动态

模型同样具有简洁和待估参数少的优点。实际上，每种蔬菜的生育期大都是已知的，模型中的 T 值大致相当于生育期，实际待估参数只有 1 个即 k 。养分累积吸收量动态模型为作物养分吸收特性的分析提供了定量依据，从模型中可得到根系生长和氮磷钾吸收的特征参数，即根长增长常数 l_0 、根系养分吸收常数 k 、最大养分吸收速率 In_{max} 和时间 t_{max} 以及最大养分吸收量 U_{max} 和时间 t_c 等。

田间试验表明，施肥对 k 、 In_{max} 和 U_{max} 的数值有明显的正效应，但氮磷钾吸收动态特征主要受作物品种营养特性决定，受施肥的影响很小。在平衡施肥条件下，不同蔬菜的氮或磷或钾最大吸收速率和吸收量明显不同，差异 1.6~9.1 倍。除莴苣外，供试蔬菜钾素最大吸收速率明显大于氮素，磷素则最小。同种蔬菜氮磷钾最大吸收速率的出现时间基本同步，最大吸收量时间也基本同步。

田间试验表明，最大养分吸收速率的时间大致在供试蔬菜生长中期，此时，生长旺盛，养分吸收速率大，利用效率高。因此，最大养分吸收速率时间是确定最佳追肥时期的重要依据。在实际应用中，考虑到蔬菜养分吸收和利用有个时间过程，最佳追肥时间应在最大养分吸收速率出现时间的前 5~10 d。养分最大吸收量反映了一定产量水平下的需肥量，对确定合理施肥量有重要参考价值。由于最大氮磷钾吸收量均出现在生育后期，基于同样原因，在供试蔬菜生育中后期应追施适量的氮磷钾肥料，以满足蔬菜高产对养分的需要。

参考文献:

[1] MENGEL D B, BARBER S A. Development and distribution of the corn root system under field conditions [J]. Agronomy Journal, 1974, 66 (2): 341- 344.

[2] 冯广龙, 罗培远. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究 [J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 96- 103.

[3] 张喜英, 袁小良, 韩润娥, 等. 冬小麦根系生长规律及土壤环境条件对其影响的研究 [J]. 生态农业研究, 1994, 2 (3): 62- 68.

[4] 王绍中, 茹天祥. 丘陵红粘土旱地冬小麦根系生长规律的研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21 (2): 175- 190.

[5] 杨青华, 高尔明. 砂姜黑土玉米根系生长发育动态研究 [J]. 作物学报, 2000, 26 (5): 587- 593.

[6] MERRILL S D, TANAKA D L, HANSON J D, et al. Root Length of Eight Crop Species in Haplust Soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66 (2): 913- 923.

[7] AMOS B, WALTERS D T. Maize Root Biomass and Net Rhizodeposited Carbon: An Analysis of the Literature [J]. Soil Sci Am J, 2006, 70: 1489- 1503.

[8] 周娟, 鲁剑巍, 刘锐林, 等. 4 个双低甘蓝型油菜品种干物质

积累及养分吸收动态 [J]. 华中农业大学学报, 2008, 27 (2): 229– 234.

[9] 蒋工颖, 董钻. 大豆养分吸收动态及施肥效果的研究 [J]. 作物学报, 1989, 15 (2): 167– 173.

[10] 郑志明, 严力蛟, 王兆赛, 等. 水稻氮吸收的动态模拟和氮肥管理的数学优化 [J]. 浙江农业大学学报, 1997, 23 (2): 211– 216.

[11] 续勇波, 郑毅, 刘宏斌, 等. 心里美萝卜生长动态和氮磷钾

营养吸收特性 [J]. 云南农业大学学报, 2004, 19 (5): 575– 588.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146– 315.

[13] H. 马斯纳 著, 曹一平, 陆景陵译. 高等植物的矿质营养 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1991: 34– 35.

(责任编辑: 刘新永)