

N-Expert 专家系统在无公害菠菜生产中的应用

陈清^{1,2}, 张宏彦¹, 张晓晟¹, 李晓林¹, Liebig H P²

(1. 中国农业大学植物营养系, 北京 100094; 2. 德国 Hohenheim 大学蔬菜研究所(370), Stuttgart D-70593)

摘要: 根据无公害蔬菜生长的要求, 通过应用德国的氮素专家系统, 在引入保证蔬菜的目标产量所要求的土壤最低 N_{min} 残留量(N_{min} 缓冲值)概念的基础上, 以传统的氮素投入为对照, 对秋季露地菠菜的氮素施肥进行推荐。这表明在不断优化参数的基础上, N-Expert 专家系统不仅能够减少肥料的用量, 不影响作物产量, 而且对提高菠菜的品质和进行蔬菜可持续生产方面有很好的作用。

关键词: 菠菜; 氮素专家系统; 施肥推荐

中图分类号: S636.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2002)04-0128-07

传统的蔬菜生产大多采用大水漫灌和频繁冲肥的方式, 考虑到蔬菜根系分布较浅, 这种方式虽然可以及时向表层土壤供应水分和养分, 及时弥补根系吸收能力的不足^[1], 但传统的水肥投入不仅会造成水肥资源的浪费、经济效益下降, 而且对人类健康和生态环境带来不利的影响^[2]。由于无公害蔬菜不仅要求收获产品的硝酸盐含量不能超过规定标准。对地下水硝酸盐的含量也有严格的限制(张丽华等, 1997), 因此, 在保证土地氮素残留量和产品硝酸盐累积数量符合规定的前提下, 如何合理运筹氮肥的施用就成了问题的关键。了解菜田土壤中氮素的去向对合理施用氮素十分重要, 但目前我国这方面的研究工作并不系统。在无公害蔬菜的养分精确管理方面“KNS 系统^[3,4]和 20 世纪 90 年代初期在欧洲应用的 N-Expert 计算机施肥专家系统^[5,6]可能会对我国无公害蔬菜生产有很好的借鉴^[7]。在预测作物氮素吸收的基础上, 提出保证蔬菜作物正常生长的最低土壤无机氮残留值(即 N_{min} 缓冲值)的理论, 同时根据经验方程估算氮素的矿化和损失, 以氮素输入与输出平衡的角度及在不影响蔬菜产量的品质的前提下, 为蔬菜的限制性施肥措施提供了参考。本试验的目的是根据 N-Expert 氮素专家系统原理及参数的基础上, 结合华北地区露地蔬菜的生产特点, 从作物产量、品质及环境效应方面对秋季菠菜的生长进行推荐、反馈验证并部分地修正模型参数, 为菠菜的无公害生产提供科学依据。

1 材料和方法

试验于 1999 年及 2000 年秋季在北京海淀区东北旺乡蔬菜试验地进行, 初始土壤有机

收稿日期: 2001-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(3023250); 国家重点基础研究规划项目(G1999011808); 德国教育科技部(BM BF)中德合作项目“提高华北地区农业生产力的研究”(1998-2001)资助

作者简介: 陈清(1968-), 男, 讲师, 博士, 主要从事蔬菜营养与施肥方面的研究工作。

质、全氮、Olsen-P、 $\text{NH}_4\text{AG-K}$ 含量分别为 17.1 g/kg, 0.43 g/kg, 58 mg/kg, 132 mg/kg。菠菜品种为菠杂 18 号, 每年 9 月初播种, 种植密度约为 85 万株/ hm^2 , 10 月下旬收获。

1.1 模型的结构及有关参数

由于过去所采用的专家系统进行氮素推荐的计算过程比较复杂, 限制了它在生产中的应用, 针对这种情况, N-Expert 专家系统在计算施肥量所涉及的诸多因素中采用经验性模型, 力求简单, 在多点试验的基础上修正参数, 完善系统的推荐工作。设定在 100% 的灌溉保证率而且没有氮素淋洗损失的情况下, 根据氮素供应的表观平衡原理及目标产量, 推导出施肥模型的一般表达式为:

$$N_{\text{吸收}} + N_{\text{min缓冲值}} + N_{\text{损失}} = N_{\text{施肥}} + N_{\text{土壤矿化}} + N_{\text{有机肥矿化}} + N_{\text{残茬}} \quad (1)$$

其中: $N_{\text{吸收}}$: 平均目标产量条件下的氮素吸收量 (kg/hm^2 , 下同); $N_{\text{min缓冲值}}$: 当作物在正常生长的情况下, 收获时根层土壤的最低 N_{min} 残留量; $N_{\text{损失}}$: 与氮素供应和推荐时间有关的氮素损失量; $N_{\text{施肥}}$: 化学氮素的推荐用量; $N_{\text{土壤矿化}}$: 来自土壤有机质的氮素矿化数量; $N_{\text{有机肥矿化}}$: 来自施用有机肥的氮素矿化数量; $N_{\text{残茬}}$: 来自前茬作物残茬的氮素矿化数量。

1.2 试验处理

试验共设 3 个施氮水平和 3 种不同的灌溉量, 每处理重复 3 次。水分因子为主处理, 随机区组排列, 在每个水分处理小区内采用裂区设计, 小区面积为 144 m^2 。在蔬菜轮作试验过程中, 小区位置不变。3 种灌水水平分别为: a) 传统水分处理(W1); b) 当根层土壤含水量降至植物有效水含量(= 田间持水量 - 萎蔫系数)的 50% 时开始灌溉, 以灌至植物有效水含量(PESW)的 80% 为准(W2); c) 当根层土壤含水量降至植物有效水含量的 60% 时开始灌溉, 以灌至植物有效水含量的 90% 为准(W3)。各处理的灌水量及试验期间降雨量见表 1。灌溉采用微喷系统进行, 喷灌均匀度(CU)为 86%。W2 和 W3 处理的土壤含水量由埋在土壤 120 cm 深的时域反射仪(TDR)测定, 每两天测定一次 23 cm 和 45 cm 深处的土壤体积含水量。

3 个氮素水平分别为: a) 根据北京市的施肥调查结果而确定的传统氮素处理, 以 N1 表示; b) 根据无公害蔬菜平衡施肥模型推荐的施氮量, 以 N2 表示; c) 经济施氮量(根据无公害蔬菜平衡施肥模型推荐施氮量的 80%), 以 N3 表示(表 1)。在 1999 年菠菜播种前由于灌溉措施对播前土壤根层的无机氮含量没有影响, 因此不同水分处理条件下的推荐氮素数量相同, 但在 2000 年的试验中则对不同水分处理分别进行考虑。氮肥品种为有机肥和尿素。试验期间每一处理所施的磷钾肥量相同。在 1999 年菠菜试验前撒施活性有机肥 5 000 kg/hm^2 (含 17 g/kg N; 41 g/kg P_2O_5 和 22.9 g/kg K_2O), 而在 2000 年的菠菜试验前, 没有施用有机肥, 只施 K_2O 149 kg/hm^2 (氯化钾) 和 P_2O_5 52

表 1 露地菠菜试验中传统处理和推荐处理的氮素施用量和灌溉数量

处理	灌溉数量* (mm)		施氮水平(kg/hm^2)	
	1999	2000	1999	2000
W1	175	128		
N1			309	339
N2			82	82
N3			66	72
W2	80	89		
N1			309	339
N2			82	84
N3			66	55**
W3	85	128		
N1			309	339
N2			82	95
N3			66	77

注: * 1999 年和 2000 年菠菜生长期间的降雨量为 66 mm 和 68 mm; ** 由于土壤 N_{min} 残留量的测定存在测定误差, 因此 N3 处理的推荐量没有严格为相同灌溉条件下的 N2 处理的推荐量

kg/hm²(重钙)用作基肥。

1.3 测定项目

每季蔬菜播种或移栽前、关键生育期、收获后采样测定不同土层的土壤 N_{min}含量。分别在各小区内分 0~30 cm、30~60 cm 两层随机采 6 点混合土样,装入封口袋内密封,并放冰盒内保存,将土样迅速带回室内,及时过 5 mm 筛,迅速混匀,称 20 g 左右新鲜土样于铝盒中,在 105 °C 下烘干 24 h,测定土壤重量含水量;同时准确称取 18.00 g 新鲜土样于塑料瓶中,加入 150 mL 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 溶液浸提^[7],振荡 1 h 后,过滤,滤液用连续流动分析仪(TRAACS 2000)测定浸提液中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度,计算各土层中的 N_{min}含量。

在每季作物收获前,从各小区中随机选取样方 3.84 m²,取样方内所有植株的地上部分,称其鲜重后,用清水洗净晾干,在 70 °C 条件下烘干,称重,计算产量。将干样粉碎后的用开氏法测定植株全氮含量。在 2000 年 10 月 12 日菠菜收获前,对 W2N1、W2N2 处理及在 W2 水分处理条件下的未施肥对照区(W2N0 处理)的菠菜叶柄和叶片汁液中的硝酸盐浓度进行全天候监测,从每小区中选取具有代表性植株 30 株,清洗表面后用吸水纸吸干,取植株的可食部位,剪碎并混匀,用压汁钳压汁,汁液稀释后,用反射仪测定其中的硝酸盐浓度^[8]。

2 结果与分析

2.1 模型参数及施肥量的确定

2.1.1 氮素吸收 根据 N-Expert 氮素专家系统的目标产量,秋季菠菜地上部的氮素吸收量为 113 kg/hm²,因此在 1999 年菠菜播种前对菠菜整个生育期推荐时采用该值;但根据试验的反馈结果,在 2000 年的试验中,考虑到华北地区的菠菜种植和氮素累积特点,预测从播种至播后 20 d、播后 20 d 至 35 d、播后 35 d 至 50 d 的菠菜地上部植株氮素累积量分别为 3、25、61 kg/hm²,与 1999 年相比,预测的秋季菠菜地上部的氮素目标吸收量减少 24 kg/hm²,但通过延迟收获,2000 年田间菠菜氮素吸收量达到氮素专家系统目标氮素吸收量。

2.1.2 N_{min}缓冲值 在 N-Expert 系统中大部分蔬菜的 N_{min}残留临界值这个指标是根据肥料试验结果得到的,其意义是在不影响蔬菜生长的条件下,氮素推荐末期或作物收获时根层土壤无机氮素最低残留的值。它取决于植物的种类,特别是对于生长速率较快的菠菜可能需要较高数量的 N_{min}残留,因此 1999 年在菠菜的整个生育期采用 50 kg/hm²N,而在 2000 年的试验中期进行了部分的调整。

2.1.3 氮素损失 由于氮素损失过程十分复杂,N-Expert 系统只采用一个简单的经验性回归模型来预测氮素损失,该模型来自多点试验,比较适用于依据土壤氮素水平和作物种植时间长短来估计氮素损失。

$$N_{\text{损失}} = 0.02 \times \text{生长周数} \times \text{氮素供应量(即氮素推荐量、土壤 } N_{\text{min}} \text{ 残留量和各种途径的氮素矿化量之和)}$$
 (2)

2.1.4 来自土壤有机质的氮素释放 在该模型中,对于华北地区的壤质土,每周的氮素矿化量估计为 4~5 kg/hm²。

2.1.5 来自有机肥及作物残茬的氮素释放 由于有机肥的氮素矿化特点比较复杂,因此在

1999 年的有机肥的氮素投入 (85 kg/hm^2) 未加考虑, 同时在菠菜的试验中没有考虑到作物残茬的氮素供应。

表 2 根据简单的模型计算 1999 年和 2000 年秋季菠菜所需要的化学氮素数量 kg/hm^2

模型组分	1999		2000		
播种后天数(d)	- 4~ 33	34~ 48	0~ 20	21~ 35	36~ 50
预测的氮素供应	195*		67	91	118
氮素吸收	113		3	25	61
N_{\min} 缓冲值	50		60	60	50
氮素损失	32		4	6	7
来自施入有机肥的氮素释放	0		0	0	0
来自土壤有机质的氮素释放	20		10	7	10

注: * 对整个生育期进行推荐后分施

2.2 作物的产量反应及氮素吸收

菠菜干物质累积的结果表明(表 3), 在相同的灌溉措施下, 传统氮素处理的菠菜干物质累积明显高于推荐氮素处理, 但这种差异只是在传统的较高灌水量情况下或在传统氮素投入与 80% 的推荐氮素投入之间才达到显著性水平。由于 1999 年菠菜收获日期较早及在菠菜生长中期叶片轻微感染病害, 因此各个处理的菠菜地上部干物质累积量明显低于氮素专家系统的目标产量 ($2\ 200 \text{ kg/hm}^2$ 干物重)。同平衡灌溉处理相比, 传统的灌溉措施对作物的生长有一定的影响。在相同的氮素处理条件下, 传统的灌溉措施明显造成菠菜减产, 这与传统灌溉措施对根层土壤的无机氮素的过度淋洗而造成有效氮素供应不足有关。

表 3 不同灌溉条件下传统氮素处理与推荐处理对秋季菠菜干物质累积、氮素吸收的影响

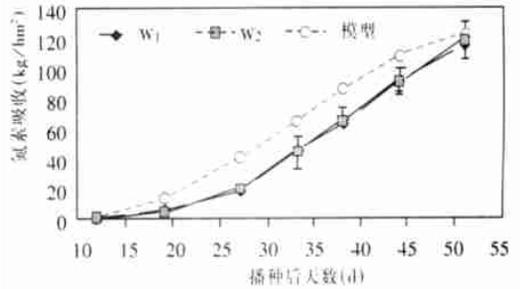
灌溉水平(mm)	氮素投入 ($\text{kg/hm}^2\text{N}$)	N_{\min} 残留量*	干物质累积 (kg/hm^2)	氮素吸收 (kg/hm^2)				
1999 年	W1	N1	309	87	1 434	abc	72.4	ab
	175	N2	82	53	1 249	bc	59.8	bc
		N3	66	56	1 055	c	51.9	c
		W2	N1	309	106	1 694	a	87.0
	80	N2	82	62	1 553	a	76.1	ab
		N3	66	63	1 474	ab	71.4	abc
		W3	N1	309	91	1 561	ab	79.9
	85	N2	82	61	1 449	abc	71.7	abc
		N3	66	48	1 391	abc	68.1	abc
2000 年		W1	N1	339	87	2 866	a	136.0
	128	N2	82	53	2 616	a	117.1	abc
		N3	72	56	2 806	a	118.9	abc
		W2	N1	339	106	2 933	a	137.8
	89	N2	84	62	2 680	a	121.0	abc
		N3	55	63	2 578	a	119.1	abc
		W3	N1	339	91	2 850	a	134.2
	128	N2	95	61	2 747	a	105.4	c
		N3	77	48	2 595	a	111.5	bc

注: * 播前 0~ 30 cm 土壤的 N_{\min} 残留量; ** 根据 Duncan 检验差异达 0.05 显著性水平

同 1999 年的试验结果相比较, 在保证菠菜正常生长的情况下, 通过延迟收获期, 调整氮素投入结构和数量, 使得不同水分和氮素处理对菠菜的干物质累积没有显著的影响, 各个处理的菠菜地上部干物质累积量符合氮素专家系统的目标产量。从氮素吸收数量上来看, 尽

管1999年试验反馈修改的目标氮素吸收量只有89 kg/hm²，但受病害的影响和收获过早等原因，修正的目标氮素吸收量偏低。同氮素专家系统数据库所给出的氮素吸收累积曲线相比，整个作物生长期植株对氮素的实际吸收数量明显低于氮素专家系统中的模拟值，而且在试验观察期间，氮素吸收速率并未像模拟模型那样出现下降的趋势，这可能与两地的气候差异有关。氮素专家系统的数据库中所给出的主要蔬菜作物的氮素吸收累积曲线可以用一元二次经验性方程或指数方程^[9]来表示，而且可对其气候因子进行修正，但从试验结果中发现，作物在生长过程中模拟曲线与实际的氮素吸收数值产生很大差异。因此，在氮素专家系统推广应用的过程中应当对原有的氮素吸收曲线进行参数校正。而实际上通过延迟2000年菠菜收获时期，菠菜的氮素吸收数量最后也接近于原来的氮素专家系统的目标氮素吸收数量(图1)。

从图1的结果还可以发现，在整个生长过程中，前期作物对氮素吸收量很小，例如在菠菜播后20 d，其实际的氮素吸收数量还不及目标吸收量的10%，但在菠菜生长的后期，作物的氮素吸收速率增长很快，每天的氮素吸收数量可达到4~7 kg/hm²。由于作物吸收累积氮素的差异与生长的气候条件关系很大，因此氮素专家系统的应用首先应当对特定的地区气候条件下蔬菜的养分吸收规律有详细的了解。



W1: 传统的水分处理; W2: 控制土壤含水量为植物有效水的50%~80%; 模型来自氮素专家系统。

图1 2000年试验中推荐处理的菠菜吸收氮素的特点及其与氮素专家系统的结果比较

2.3 对环境的影响和安全性评估

由于菠菜属于浅根系作物，80%的根系分布在表层0~15 cm范围，只有不到5%的根系分布在30 cm以下^[6]，因此我们对菠菜收获时0~30 cm的根层土壤N_{min}的残留量与其目标值进行比较(表4)。结果表明，在三个灌溉处理中，每个推荐氮素处理(N2和N3)的根层土壤N_{min}的残留量低于或接近于N_{min}缓冲值，50 kg/hm²；相反对于传统的氮素处理(N1)，收获时土壤N_{min}的残留量约为200 kg/hm²，明显高于推荐氮素处理。比较表1中传统和推荐氮素处理的养分投入量可以发现，在获得相同产量的情况下，传统氮素处理比推荐氮素处理每公顷多投入了200 kg氮素，在这些多投入的氮素中，有近3/5~4/5是累积在表层土壤中的。高量N_{min}残留意味着对地下水污染的可能性增加，特别是在传统灌溉下，氮素淋洗的可能性急剧增加。针对这种情况，Guillard认为菜田60 cm以下土层中的无机氮被再利用的可能性很小，在灌水量较大的条件下这部分氮素必然会继续向下淋洗，最终污染地下水^[10]。宝德俊等的研究表明，每季施氮量大于225 kg/hm²时，40~60 cm土层硝态氮累积明显，150 cm

表4 菠菜收获后0~30 cm根层土壤无机氮素的残留量与N_{min}缓冲值的比较(2000年) kg/hm²

	W1			W2			W3		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
土壤无机氮素的残留量	195.2	44.2	31.7	222.2	41.8	51.3	199.3	51.8	49.1
	±37.3	±23.3	±12.7	±66.3	±17.8	±9.2	±93.9	±22.6	±11.2

注: * 目标N_{min}缓冲值为50 kg/hm²; 根系深度30 cm

处土壤渗滤液中硝态氮浓度最高达 100 mg/L, 所以地下水硝酸盐含量超标与氮素的过量施用有密切的关系^[11]。从菠菜收获的土壤 N_{min} 残留量来看, 传统施肥措施对地下水硝酸盐污染的可能性远远高于采用氮素专家系统进行的限制性施肥措施。

在收获前期对一天内菠菜可食部分的硝酸盐浓度进行监测, 测定结果表明(图 2), 在控制土壤含水量为植物有效水含量(PESW)的 50%~80% 的情况下, 菠菜叶片的硝酸盐含量均随施氮量的增加而明显升高, 传统的氮素(N1)处理的植株叶片硝酸盐含量最高, 几乎是推荐氮素处理(N2)的 2 倍。在 W2 处理中设置了裂区进行不施氮处理(N0), 比较一天中监测硝酸盐的结果可以发现, 在推荐的氮素处理和未施肥的对照处理之间菠菜叶片的硝酸盐含量没有显著性差异, 而且皆低于安全蔬菜生产的硝酸盐限量标准; 相反, 传统的氮素投入水平导致收获菠菜的叶片硝酸盐含量超标。这表明, 采用氮素专家系统进行限制性施用氮素明显减少了可食部分硝酸盐累积的危险性。不仅如此, 氮素供应水平的高低明显地影响了植株硝酸盐的吸收和积累, 分析菠菜叶柄汁液硝酸盐含量和植株的维生素 C 含量可以发现二者呈负相关关系, 对于菠菜来说过量的氮素供应会导致可食部分维生素 C 含量的降低。

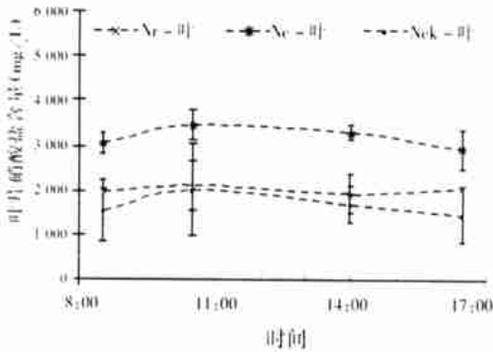


图 2 菠菜收获前主要可食叶片汁液硝酸盐浓度在一天内变化差异

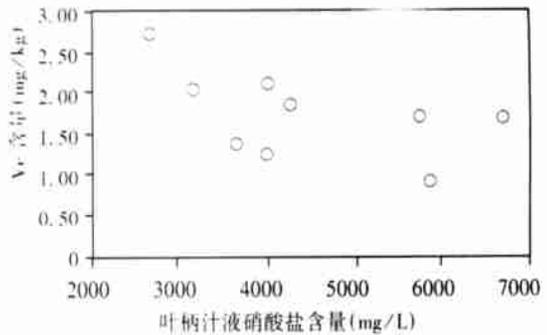


图 3 菠菜叶柄汁液硝酸盐含量与植株 Vc 含量间的关系

3 结论

采用以德国的 N-Expert 氮素推荐系统为理论基础的施肥模型是在累积、分析试验资料的基础上定量了解菜田生态系统中的氮素吸收特点、当季的氮素输入量和损失特点, 并根据以前的研究结果确定目标 N_{min} 缓冲值后对作物某个时期进行量化的氮素推荐。尽管目前缺乏菜田土壤氮素的矿化资料, 但根据 N-Expert 氮素推荐系统中的数据库和大田土壤有机氮素的矿化特点, 在本试验条件下估算每周氮素矿化量为 4~5 kg/hm² 似乎是可行的。从蔬菜收获时根层土壤的 N_{min} 残留量和植株硝酸盐的速测结果来看, 在本试验条件下采用这种“灰箱”方法来估算菜田土壤氮素的输入和输出进行无公害蔬菜的推荐施肥是可行的。从结果来看, 作物的氮素吸收特点及 N_{min} 缓冲值是推荐理论的核心, 因此对于运用该模型理论进行无公害蔬菜的合理施肥需要首先了解与当地气候有关的作物干物质累积特点、氮素吸收规律、 N_{min} 缓冲值及根系分布特点等。但由于我国的蔬菜生产系统比较复杂, 特别是各种各样的有机肥料施用, 使得氮素平衡的估算复杂化。因此为了更加准确、合理进行蔬菜推荐施肥, 进

一步了解氮素损失的过程及数量、菜田土壤有机氮素的释放特点等对于完善 N-Expert 专家系统的参数、提高施肥推荐的准确性具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 王爱平. 配方施肥施用技术[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1991.
- [2] 卢善玲, 周根娣. 上海地区蔬菜硝酸盐含量状况及食用卫生评价[J]. 上海农业科技, 1989, 4: 15- 16.
- [3] Lorenz H P. Kulturbegleitendes N_{min} -Sollwert- (KNS)-System Ministerium f r Landwirtschaft [M]. Weinbau und Forsten. Mainz, 1989.
- [4] Ziegler J, Strohmeier K, Brand T. Nitrogen supply of vegetable based on the ' KNS-System [J]. Acta Hort. 1996, 428, 223- 233. ISHS
- [5] Fink M, Scharpf H C. N-Expert- A decision support system for vegetable fertilization in the field[J]. Acta Horticulturae, 1993, 339: 67- 774.
- [6] Schenk M, Heins B, Steingrobe B. The significance of root development of spinach and kohlrabi for N fertilization[J]. Plant and Soil, 1991, 135: 197- 203.
- [7] 陈 清, 张宏彦, 等. 德国蔬菜生产的氮肥推荐系统[J]. 中国蔬菜, 2000, (6): 55- 57.
- [8] 汤丽玲, 陈 清, 张宏彦, 等. 采用试纸条-反射仪方法快速测定蔬菜硝酸盐含量[J]. 北方园艺, 2001, 5: 9- 10.
- [9] Fink M, Feller C. An empirical model for describing growth and nitrogen uptake of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) [J]. Scientia Horticulturae, 1998, 73: 2- 3, 75- 88.
- [10] Guillard K. Nitrogen utilization of selected cropping system in the U. S. northeast: II Soil profile nitrate distribution and accumulation[J]. Agron J, 1995, 87: 199- 207.
- [11] 宝德俊, 张鸿程, 皇甫湘荣, 等. 潮土硝态氮的淋失及预防措施研究[A]. 陈子明. 氮素产量环境[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 53- 62.

Field Application of N-Expert System on N Recommendation of Autumn Spinach

CHEN Qing^{1, 2}, ZHANG Hong-yan¹, ZHANG Xiao-sheng¹,
LI Xiao-lin¹, Hans-peter Liebig²

(1. Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Institute of Fruit Sciences, Vegetable Sciences and Viticulture(370),
Hohenheim University, Stuttgart D-70593)

Abstract: Optimization in fertilization is very important for A class green vegetable in China. Based on N-Expert system from Germany and the standard requirement of non-polluted vegetable production, the conception of N_{min} buffer value was introduced and validated in autumn spinach in 1999 and 2000. The N-Expert system could be an effective tool for sustainable production.

Key words: Spinach (*Spinacia oleracea* L.); N-Expert system; Fertilizer recommendation