

国外学者访华报告

关于小麦高产及用计算机确定氮肥用量*

P. B. Tinker

小麦是英国主要的粮食作物,面积200万公顷,年产量8500万吨。

首先要问的第一个问题是小麦的最高产量能达到多少?

第二个问题是引起产量波动的原因是什么?为什么达到最高产量的机会非常少?

目前英国小麦的平均产量是6吨/公顷。图1是估算数字,从1200年到1800年产量增加很慢,1800年以后产量迅速上升,上面一条曲线是有些人在较大面积上获得的最高产量记录,下面一条是平均产量曲线,可以看出两者之间的差异。用过去经典方法来解释最高产量和实际产量之间的差异是没有什么意义的,洛桑试验站的创始人所进行的试验,只能说明加进一个处理,产量能增加多少,而不能回答最高产量和平均产量是多少。

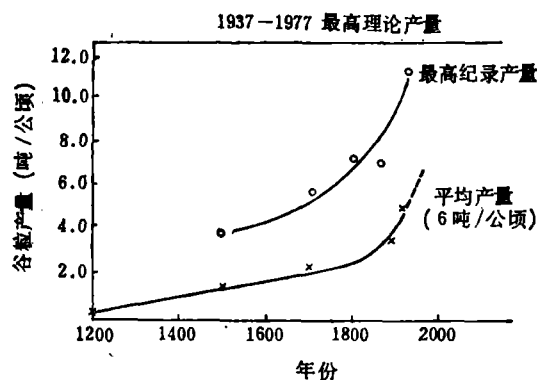


图1 英国小麦产量的历史发展趋势

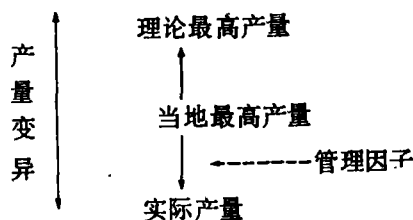
表1是本人二十多年前在甜菜上进行的试验,一个是施氮的,一个是不施氮的,可以看出产量波动很大,但并不能说明为什么有这么大的波动。要弄清其原因,必须有另外的方法。首先要考虑到理论上的最高产量决定于遗传特性和气候条件所能达到的最高产量,这种最高产量由于当地条件的限制,使它下降了。这些因子是农民在当年无法控制的,另外一个因子是管理因子,这是农民可以控制的。我们的任务就是要探

* 本文是英国洛桑试验站副站长、植物营养化学研究室主任Tinker博士访问南京土壤所时所做的学术报告的一部分,由孙秀廷根据记录整理而成。

表1 甜菜的田间试验结果(吨/公顷)

未施氮产量	施氮产量
4.3	6.2
4.6	7.5
6.3	6.4
6.8	8.5
4.4	4.6
3.9	5.0
3.5	8.4
3.0	5.8
4.9	8.4
4.2	5.5
4.0	7.0
3.9	5.2
6.6	6.9
7.1	8.7
6.2	7.7

明最高产量和实际产量之间差异的原因。



关于最高产量问题,可以从以下三方面得到信息:

第一是光的辐射和植物生理特性;

第二是研究所有影响产量的因子;

第三是找到一个管理得比较好的田块,接近于最高产量。

通过这样三个途径估算最高产量为13.6吨/公顷。这个估算是比较粗的,如果农民得到的产量高于这个估算数字,那么植物生理学家就要进行另外的计算来加以修正。1977年由洛桑试验站资助的农业委员会开始从五个方面来研究产量变异的原因:

首先是作物生产模式。植物生理学家、微生物学家和土壤学家联合起来进行这样一个研究,这个问题太复杂,不准备详细来谈。到目前为止,能达到的一

点是光照和温度对作物生长的关系，把光照和温度这些因子代入模式中来预测最高产量比较成功，这一点是很重要的。根据具体地点的辐射和光照条件来预测可能达到的最高产量指标，这样就可以避免去做那些不可能达到的事情。

第二点是详细研究作物不同生长阶段的叶面积、植物含氮量等各种因子，再将这些因子纳入上述模式中。但是达到高产并不是固定的某一个模式，比如达到最高产量每平方米的穗数从400—800个，变幅很大，没有确切的穗数，通常是400—450穗。

以上两点讲得比较简单，下面三点讲得详细一

些。

图2中左边的曲线是1978年英国肥料公司资助的试验，管理比较精细，最高产量为5.26吨/公顷，变异系数为24%，这是一个正态分布曲线；另一个试验，其目的是要达到10吨产量/公顷，因此定名为十吨俱乐部，达到10吨产量就有奖。这个产量并不是农民报的，一定要自己亲自测定的，得到的产量分布曲线也是正态分布曲线，两个曲线的变异系数都是24%，这是令人惊讶的。通过大量施肥和精心管理并没有缩小这种变异。另外还可以看到小部分试验可以达到很高的产量，得到的结论是没有哪一个点具有固定的限制因子

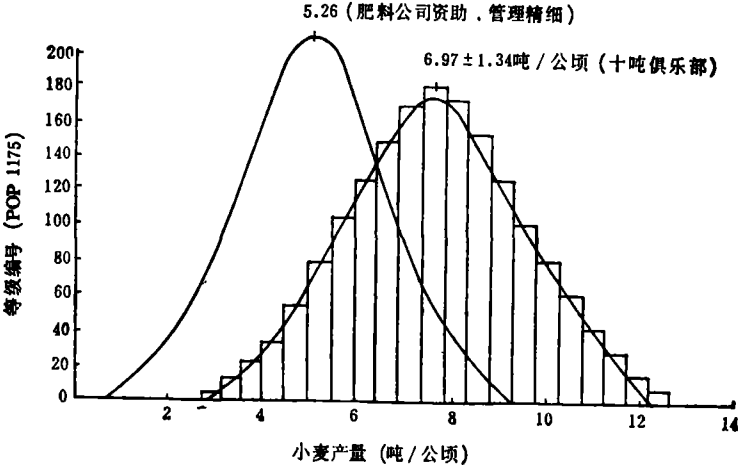


图2 英国肥料公司和十吨俱乐部试验的产量分布曲线

表 2 测试因子及其对产量的影响(吨/公顷)

水 平 1	产 量	水 平 2	产 量
(1) 穴播，密度：2.54×10厘米 ²	9.68	条播，行距10厘米，播种量同左	9.61
(2) 早播，9月21日	9.72	迟播，10月13日	9.57
(3) N肥用量：160公斤 N/公顷	9.91	N肥用量：250公斤N/公顷	9.83
(4) N肥一次施用(4月6日)	9.50	N肥分次施用(3月12日，4月6日)	9.79
(5) 灌溉，125毫米	9.53	不灌溉	9.76
(6) 秋施杀虫剂5公斤/公顷	9.77	不施杀虫剂	9.52
(7) 夏喷杀蚜虫剂0.14公斤/公顷 (6月26日，7月17日)	10.30	不喷杀蚜虫剂	8.99
(8) 喷施杀真菌剂4公斤/公顷 (5月30日，6月26日)	10.13	不喷杀真菌剂	9.16

使你不能达到10吨以上的产量。

表2是各种因子对小麦产量的影响，除了杀蚜剂“Pirimicarb”和杀真菌剂“Cosmic”对产量有明显影响外，其他各因子如播种方式和播种期、氮肥用量和施肥次数以及灌溉等都没有明显影响。表3是在洛桑和沃伯恩两地进行的试验，可以看到播种期对小麦产量有明显的影

响，9月15日播种的比10月30日播种的分别高0.66吨和1.56吨/公顷；不同的氮肥用量和施用时间对产量没有显著的影响；灌溉和分次施肥在不同质地的土壤上，效果不同，如洛桑为粘壤土，灌溉和分次施肥效果比较差，而沃伯恩为沙壤土，灌溉和分次施肥的效果都比较好。表4是在不同土壤上所得到的产量结果。

影响小麦产量的因子除土系和作物品种外，还有

表 3

各种因子对产量的影响(吨/公顷)

测 试 因 子	洛 桑	沃 伯 恩
(1) 播种期: 9月15—16日 10月30—31日	9.45 8.79(-0.66)	9.40 7.84(-1.56)
(2) 施N量(公斤N/公顷): (洛)80, (沃)150 (洛)150, (沃)220	9.15 9.09(-0.06)	8.43 8.81(+0.38)
(3) 一次施肥 分次施肥	9.18 9.07(-0.11)	8.38 8.86(+0.48)
(4) 施肥时期: 早施 迟施	9.03 9.21(+0.18)	8.70 8.54(-0.16)
(5) 灌溉: 不灌 全灌	9.28 8.96(-0.32)	8.25 8.99(+0.74)
(6) 杀虫剂(5公斤/公顷): 用 不用	8.96 9.28(+0.32)	8.23 9.01(+0.78)

一个前茬问题, 如果前茬是大麦, 则后作易生全蚀病, 而影响到产量, 无论氮肥水平或播种期对小麦的产量影响都比较大; 如果前茬是燕麦, 氮肥用量和播种时间对小麦产量影响都不大; 如果前作是马铃薯, 则小麦产量要低些, 但差异不大。总的来说, 前作要是禾谷类作物, 则土壤中残留的氮很少, 这是造成后作产量总是比较低的原因, 但燕麦例外(表5)。

十吨产量俱乐部的工作表明, 对同一土壤类型, 不同地点的产量潜力也有很大差异, 我们想知道某一点产量的潜力是不是因土壤类型不同而不同, 进行了如下的试验(图3)。这个试验只进行了两年, 有些点上两年的产量差异比较大, 只有两年的结果, 不大可信。

表 4 不同土壤对小麦产量的影响(吨/公顷)

试验地点及土壤	年 份			
	1980	1981	1982	1983
洛桑——粘壤土	10.92	9.74	8.71	10.36
沃伯恩——沙壤土	9.09	10.02	8.97	9.26
萨克斯蒙特罕——粘壤土	10.14	10.91	10.66	11.36
亥克顿——粘土	10.51	11.41	10.17	9.58
比林顿——粘土	8.62	10.16*	7.63*	10.06
曼尔顿——粘土	6.73*	8.60*	8.21*	8.12*

* 前作为小麦或大麦

表 5

种植三季作物之后小麦的产量(吨/公顷)

前 作	燕 麦			大 麦			马 铃 薯		
播 种 期	22/9	平均	22/10	22/9	平均	22/10	22/9	平均	22/9
早 施 氮 肥									
N ₁	8.35	8.25	8.15	4.67	4.96	5.25	7.85	7.50	7.15
N ₂	8.66	8.80	8.93	6.16	6.22	6.28	7.87	7.82	7.76
迟 施 氮 肥									
N ₁	7.66	7.78	7.90	4.71	4.81	4.91	7.64	7.26	6.88
N ₂	8.11	8.35	8.60	4.36	4.60	4.83	8.26	7.91	7.56

表6是通过统计, 把不同因子的变异量计算出来, 十吨俱乐部的土壤是根据质地来分的, 这些变异系数都不大。很有意思的一点是由土壤所引起的变异比较大, 这说明土系对作物产量的影响是比较大的, 而作物品种也引起变异量的一定波动。降雨、灌溉对产量没有太大的影响, 而土壤水分越缺乏, 产量越高, 因为英国

的气候条件很湿润(表7)。

下面再讲一讲由施肥可能引起的混乱, 施磷量取决于磷指标, 土壤磷指标低的, 磷肥效果好, 反之, 土壤磷的指标高的, 磷肥效果差。用Olson法, 即NaHCO₃提取的磷做指标, 图4是一个典型的曲线, 当P > 20 ppm时, 磷肥对产量就没有影响。这也是十吨产量俱

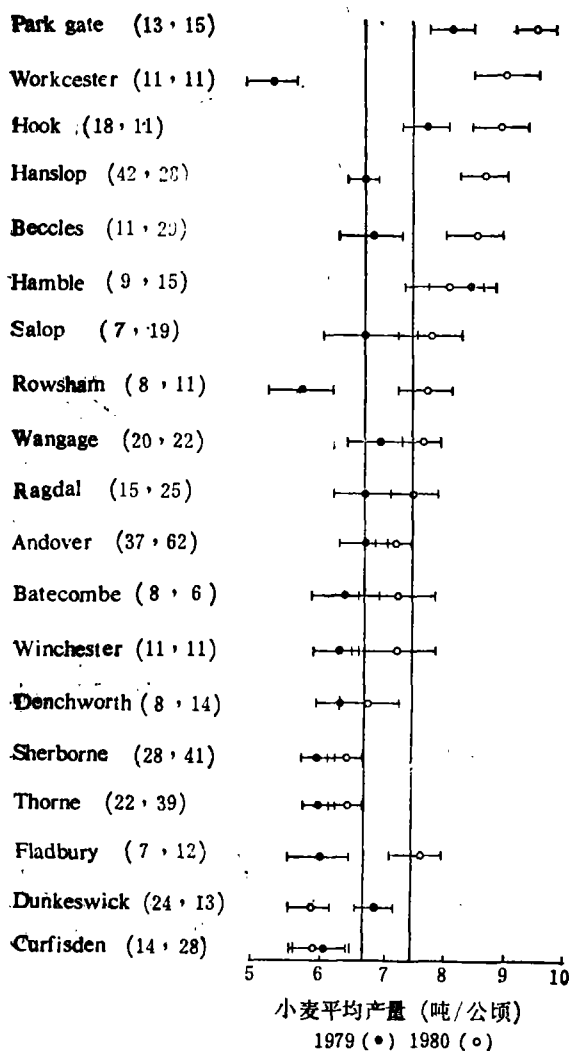


图3 最普通土系平均小麦产量比较

乐部得到的结果。这里所说的磷的指标，不是磷的含量，而是以等级来划分的，指标低的，施磷量高，指标高的，施磷量低，得到的产量从6.8吨到7.1吨/公顷，差异不大。加入磷肥越少，产量反而越高，钾的情况也是这样，这是由于英国耕地长期以来大量施肥的缘故。(表8)。

达到十吨产量的指标，植物从土壤吸收的养分的数量是很大的，但是至今并不认为磷、钾肥的施用是造成产量差异的原因。

研究计划只进行了一半，下一步还要把氮和水分的因子都加进去，在更多的土壤类型上进行工作，如果政府能给予更多的经费的话。从这些结果直接得到的结论是：英国大多数土壤是能够达到10吨/公顷以上的产量的，有些土壤比较稳产，某些因子的变动对产量影响不很大，而有些土壤对环境因子要求则比较

表6 根据土壤和其他因子统计的小麦产量变异性%

因子	1979	1980
土系	18.3	18.7
作物品种	5.5	11.5
前作	7.8	5.3
播种期	3.5	1.2
十吨产量俱乐部土壤分类	2.9	4.0

表7 根据降雨量和土壤水分最大亏缺值统计的小麦产量变异性(%)

因子	1979	1980	79+80
冬季降雨总量(10月—3月)	0.0	0.4	0.0
夏季降雨总量(4月—7月)	0.0	1.5	2.0
冬季和夏季降雨总量	0.7	0.0	3.2
土壤水分最大亏缺	0.4	6.4	9.2

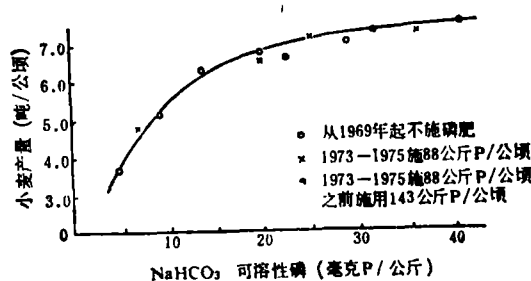


图4 萨克斯蒙特平的冬小麦产量

表8 土壤磷、钾指数 (1978)

土壤磷指数	作物编号	前作三年平均P ₂ O ₅ 公斤/公顷	基础含量P ₂ O ₅ 公斤/公顷	穗数/米 ²	产量吨/公顷
0—1	42	46	61	478	6.8
1—2	160	51	52	482	6.8
2—3	374	55	53	494	6.9
3以上	440	56	53	487	7.1

土壤钾指数	作物编号	前作三年平均K ₂ O公斤/公顷	基础含量K ₂ O公斤/公顷	穗数/米 ²	产量吨/公顷
0—1	47	57	51	483	6.9
1—2	396	63	47	491	6.9
2—3	425	65	44	486	7.1
3以上	149	63	37	496	7.0

表9 用电子计算机确定N肥需要量

时 间	信 息	活 动
秋天	土壤 NO_3^- -N含量 水分亏缺情况	—
冬天	降雨量, 温度	—
三月	作物含N量 作物生长发育 土系或土壤类型	计算机首次运算 是否需要追施N肥?
四月	降雨量 温度 作物生长发育 计划作物生长量 平均夏季气候	计算机第二次运算 最后追施N肥

严, 稍有变化, 对产量就有影响。我们强调作物轮作的必要性, 同时也要指出土系的重要性。

下面谈谈如何用电子计算机确定氮肥用量问题。大家都知道, 氮是获得高产的最重要元素, 但也是最难控制的因素, 因为土壤中的氮是很复杂的。目前英国的氮肥施用量每年是120万吨, 主要施在小麦上, 平均是130公斤N/公顷, 有些农民施氮量高达250—300公斤/公顷, 从这里也可以看出施氮的重要性, 但是必须考虑到氮肥的经济效益, 氮肥用量高, 势必影响到经济效益。

图5表示1945年二次大战以来氮肥用量和产量之

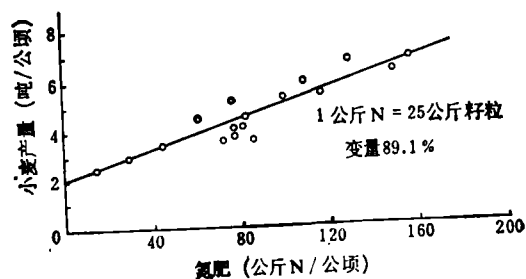


图5 氮肥用量和产量的关系

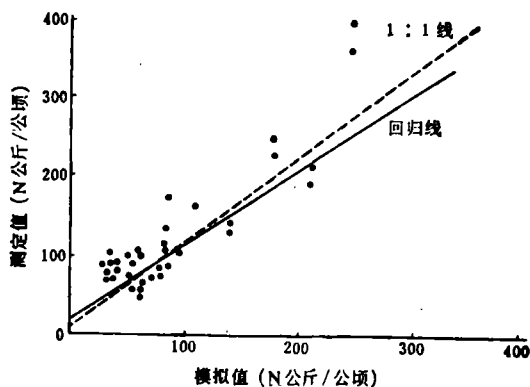


图6 90厘米土层中矿质氮 (NH_4^+ + NO_3^-)

数据取自剑桥ADAS(1984)

间的关系, 随着氮肥用量的增加, 产量也显著提高, 这条线表示每增加1公斤N, 增产谷粒25公斤。在作这个计算时曾经想到, 可能由于施肥量增加, 增产效率

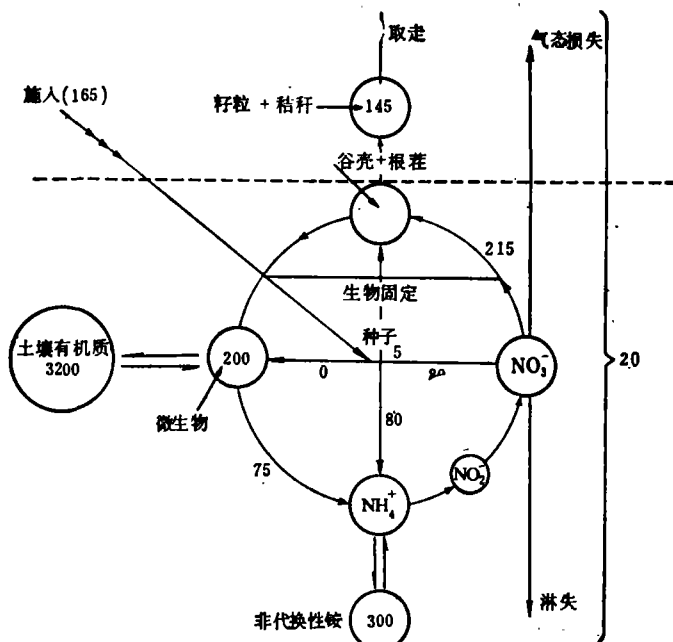


图7 麦田氮素循环示意图

会下降,但是结果并不是这样,施肥量增加,增产效果并未下降,仍然是每公斤N增产25公斤谷粒。因此没有理由认为现在氮肥的施肥效率比过去就低。只是在施肥量高时,成本很高,环境污染问题也大,因此氮肥用量不要超过一定的范围。问题在于如何告诉农民在每一田块确定特定的用量,现在的做法还是很粗放的,这里介绍的方法属平衡系统,在西欧用得比较普遍,象法国、挪威、荷兰等。首先要测定作物需要的最高氮量,减去春天1米深土层中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量,减去春天作物体内的氮量,再减去夏季土壤中产生的矿质氮量,即为所需要施入的氮肥用量。这是一种简化的概念,实际上在每一项里都有许多系数要求出来。最困难的一点是春天土壤中矿质氮的确定。如果要达到8吨/公顷的产量,则需要175—200公斤矿质氮/公顷,而夏季土壤中产生的矿质氮只有30—40公斤/公顷,相比之下这部分矿质氮的重要性就不大,主要是土壤剖面中的矿质氮。这个方法(指测定1米土层中的矿质氮的方法)是在黄土区建立起来的。图6纵坐标代表矿质氮的测定值,横坐标是模拟值,两者之间有很好的相关。这是从一个土壤上得到的结果,这个土壤比较容易采样,水分比较容易控制。但是把土壤从田间转移到实验室会遇到一系列问题, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 很容易发生变化,必须在低温条件下保存,实施起来比较困难。因此决定用电子计算机模拟的办法。

图7是麦田氮素循环的例子,图中数字是特定条件下的测定结果,不要去管它。首先要确定这么大的生物量需要多少氮,然后预测土壤氮素矿化和生物固定作用,还要预测淋洗损失,这样我们就可以得到需要施入的氮量。下面讲三个问题:氮素矿化、淋洗和作物吸收。

关于氮的矿化——用下述一级反应方程式:

氮素矿化简单方程式

$$1. \text{零级反应} \quad N_t = kt + N_0$$

$$2. \text{方根} \quad N_t = R\sqrt{t + N_0}$$

$$3. \text{一级反应} \quad N_t = N_0(1 - e^{-kt})$$

预测土壤矿化,式中有个温度系数,目前土壤氮素矿化速率是在实验室用培养方法进行的,我们希望将来做到不要对每个土壤进行测定,而是用预测的方法得到氮素矿化速率的数据。

关于淋洗——这是个经典的描述淋洗的方程式:

移动方程式

$$\text{水} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D_w \frac{d\theta}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left(K \frac{d\psi}{dx} \right)$$

$$\text{溶质} \quad \frac{dc}{dt} = \frac{d}{dt} \left(D^* \frac{dc}{dx} \right) - \frac{d(uc_1)}{dx}$$

但是这个方程式很难实际应用,所用的导水系数和扩散系数变异都很大。所采用的方法是色层预测法,水和溶质在土壤中移动,就好象在色层柱中移动一样,溶质可分为两部分,一部分是可以移动的,另一部分是不可移动的,当水分进入并向下移动时,溶质也跟着向下运动,也可侧向的向颗粒内部运动(图8),达到一定张力时,则移动和不移动两部分处于平衡状态。对大多数土壤来说,移动和不移动的张力界限大约在0.58巴,当土壤比较粘重,颗粒比较大时,移动达不到平衡状态,所以模式里有一个换算因子。

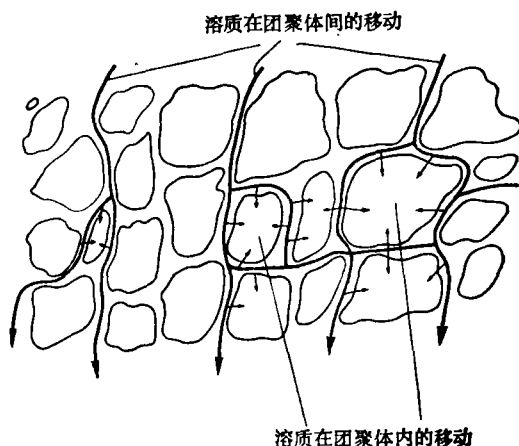


图8 溶质在团集体中的移动示意图

关于作物吸收——从图9可以看到,在3月中旬以前,小麦的生长量很小,大概只吸收20公斤N/公顷,3月中以后,温度升高,小麦生长加快,吸收N量迅速增加,因此我们的工作不仅是确定施肥数量,而且要确定施肥时期,要确定N肥需要量,得算出这时期作物达到的干重是多少。下列公式是在无限制因子条件下得出的,不是100%满意的,我们面对的问题是农民管理水平,有的比较好,有的比较差,不可能都是理想条件,因此需要根据田间测定值,对公式加以修正。

作物生

地上部干物重增量(W)

$$\frac{dw}{dx} = \frac{K_2 W}{K_1 + W}$$

x = 高温时间或水分蒸发累积量

$K_1 \approx 1$ 吨/公顷

K_2 决定于作物品种和气候

下面用试验结果来说明这些过程是怎样发生的。图10下部的曲线代表洛桑地90厘米土层中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量,实线是早播的(9月15日),虚线是迟播的(10月31日)。上部曲线表示小麦茎中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量作为当时小麦营养的指标,它只表示当时小麦的营养状况,并

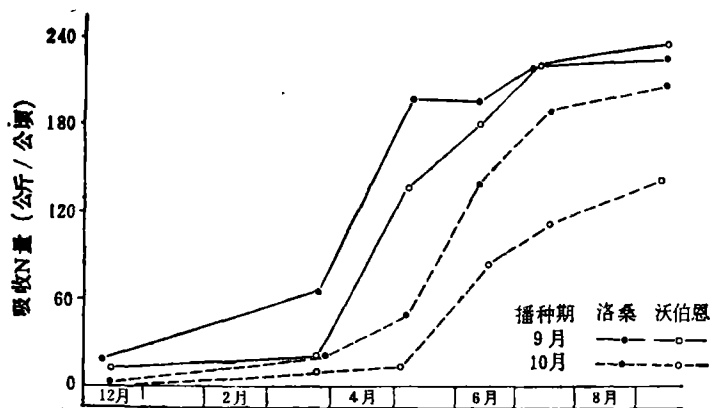


图9 小麦不同时期吸收的氮量

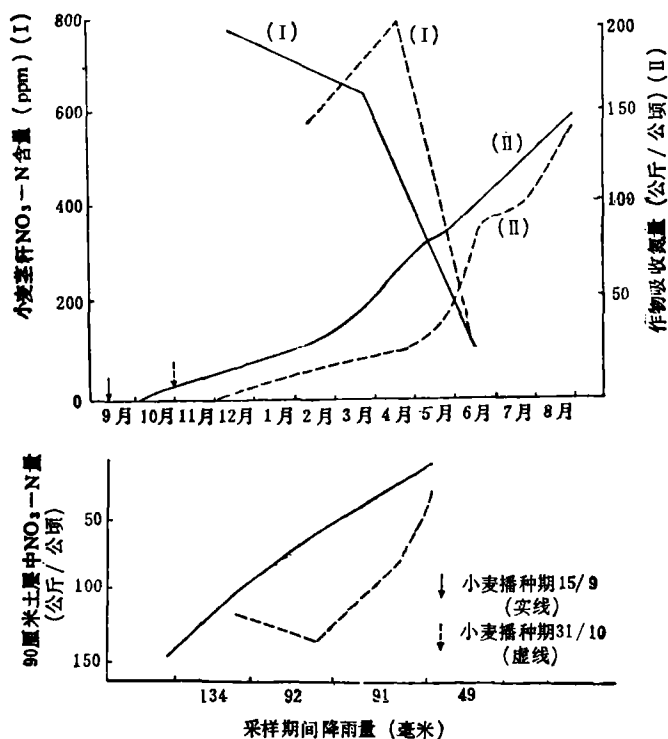


图10 洛桑点土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量与小麦茎秆 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量、作物吸氮量之间的关系(1980)

不能告诉你以后会发生什么情况。图下部的虚线的前段向下,表示 $\text{NO}_3\text{-N}$ 有积累,同时又有吸收和淋洗,其差值比植物吸收之间的差值大,表明有淋洗作用。只要土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高,小麦茎中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量也必定高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的减少一部分是由于作物的吸收,一部分是由于淋洗,这时如不施肥就要缺氮,农民就要考虑什么时候需要施用多少氮肥。根据土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量和植物体内的含氮量,用平衡公式就可以算出来。计算机模拟就是要模拟 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量,不需要分析,也不需要推测。图11是沃伯恩土壤中的情况,可以看

到土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 很快就完了,因为土壤很沙,淋洗作用很强烈,和洛桑土壤不一样。在这一点上施肥,作物就迅速吸收。

图12是我们目前用电子计算机进行模拟的基本模式。用一级反应方程式计算土壤氮素矿化,温度和矿化系数都要考虑进去,用模式预测矿化速率来推测土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$,再预测作物生长量,根据生长量就可算出吸收的氮量。另外从气象部门可得到降雨量、蒸发量和夏末缺雨情况,这样就可以算出水分向下移动淋洗情况,知道了水分移动数量和土壤溶液中 $\text{NO}_3\text{-N}$

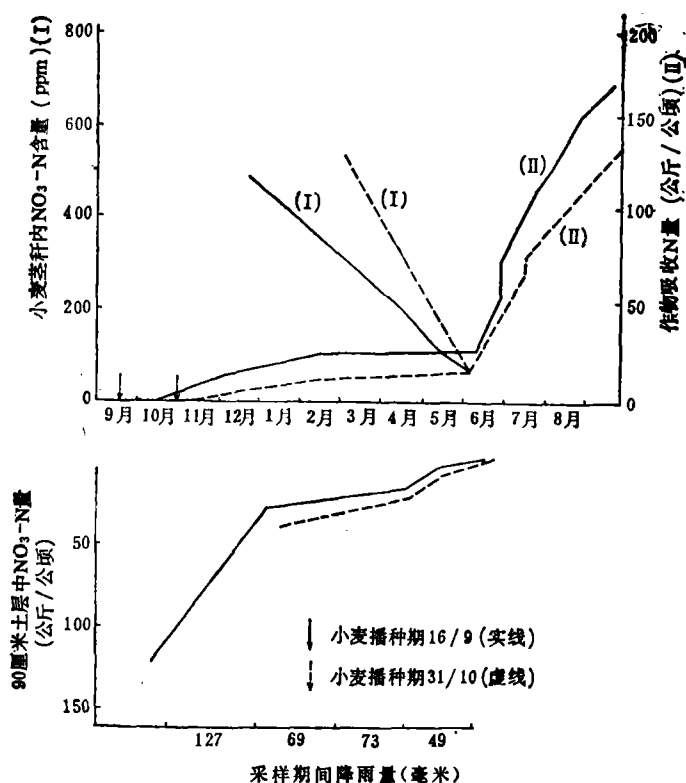


图 11 沃伯恩点土壤中NO₃-N含量与小麦茎秆NO₃-N含量、作物吸氮量之间的关系(1980)

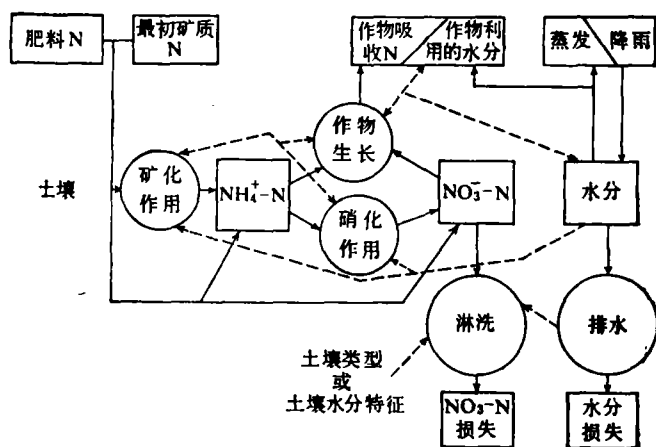


图 12 用计算机进行模拟的基本模式

N的含量, 就可以算出被淋洗的NO₃-N的数量。

至于如何来预测土壤中NO₃-N的含量, 模式是基于这样几点: 从气象部门得到的气象资料、土壤氮素矿化系数和土壤水分条件等。图13是在石灰性土壤上进行的试验, 实线是测定值, 虚线是根据模式计算得来的, 这是洛桑试验站和推广部门共同进行的试验, 推广部门做田间试验, 我们在实验室进行计算机模拟。

看来这个结果还是相当好的, 当然偏离了一点。这里有一部分土壤从秋天到春天其NO₃-N是增加的, 原因尚不明。因为这段时间降雨较多, NO₃-N应该是降低的, 因此还要进一步研究。

另外一部分工作是这几年所做的, 即氮肥的去向, 用¹⁵N标记的肥料, 施肥后2周、4周、6周等分期对土壤和植株进行采样分析, 结果奇怪地发现施肥后

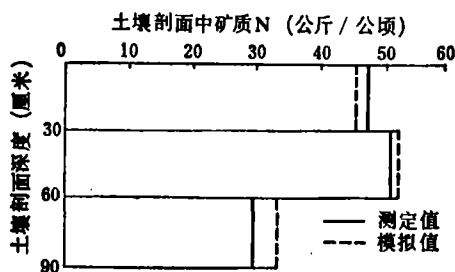


图13 土壤剖面中矿质N测定值和模拟值的比较

4周,即使土壤采样很深, ^{15}N 也很少,都不能完全回收,上层土壤和植株中都没有。我推测这是反硝化作用的结果。根据近几年的试验,N素损失量为8—30%,损失量和施肥后4周的降雨量有很好的相关。我们已经有了很好的办法告诉农民,施到田里的肥料到哪儿去了。

对整个模式还要进一步检验,表9告诉人们,秋

天需要知道水分缺乏情况(可从气象部门得知)。秋天下层土壤中 $\text{NO}_3\text{—N}$ 到了春天肯定会被淋洗掉,因此这部分氮可不考虑;冬天需要从气象部门知道气温和降雨的资料,用电子计算机就可以在任一点、任何时候得到 $\text{NO}_3\text{—N}$ 含量。如果农民及早进行这种预测,就可以即时进行施肥。4月份是主要施用氮肥的季节,这时农民可用计算机进行第二次施肥量的计算。只要知道雨量、温度、作物生长情况以及土壤中 $\text{NO}_3\text{—N}$ 的含量,还有,计划要达到的作物生长量,就可以算出氮肥的需要量。此外还要预测夏季氮素矿化的情况,这意味着需要预测夏季的气象情况,问题是缺乏长期的天气预报。这是到目前为止所做的、向推广部门推荐的工作。气象资料很易得到,计算机进行一次计算也不贵,对施肥有些改进还是划得来的。希望推广部门自己应用计算机进行上述模拟计算,同时也不排除农民进行这样的计算,因为很多农民都拥有自己的微型机。

土壤信息

土壤中钠-钙交换平衡受 碳酸钙和有机质的影响

R. K. Gupta等人在实验室条件下,研究了 CaCO_3 和腐殖物质对土壤的阳离子交换(Ca-Na阳离子对)平衡的影响。

体系的钠饱和度增加,即 Na/Ca 比率增加,提高了阳离子交换量、交换性钠的百分率和土壤体系的pH或碱度。在有 CaCO_3 时这种影响更加显著。在高pH时,腐殖物质中大部分有机官能团活性变强并增大电荷密度和阳离子交换量。非石灰性土壤B的Ca-Na交换等温线介于石灰性土壤A(该线位于上面)和0.01N NaOH处理过的土壤C(该线位于下面)的交换等温线之间。结果表明,含 CaCO_3 的土壤在一定的钠浓度

的平衡液中较去有机质等处理的土壤吸收更多的钠。提高体系的pH而使阳离子交换量增加,这不影响交换等温线的本性,而只影响其历程。选择性系数随偏好离子在土壤复合体上的饱和度(交换相上钠当量分数 $q\text{Na}/q_0$)增加而趋于减小,但当 $q\text{Na}/q_0$ 值在0.3—0.8范围内时,选择性系数似乎保持恒定。Ca-Na交换等温线还表明,Ca是偏好的阳离子,但交换自由能($\Delta G^0_{\text{Ca-Na}}$)是正值。

在有 CaCO_3 的情况下,苏打化速率增大。有机质的加入除给植物和微生物提供养分和能源外,还阻止钠在土壤复合体上的累积,故能抵销 CaCO_3 在土壤苏打化作用中的影响。

在碱土的自然环境中,高交换性钠的百分率和高pH,决定电位的离子(如 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 等)存在,以及土壤粘粒与高电荷的腐殖物质的相互作用都影响土壤中粘粒-有机质复合体的分散和移动。

(刘志光据 Soil Sci., 138: 109—114, 1984)