第 40 卷 第 5 期
2003 年 9 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 5
Sep., 2003

作物有效土壤营养面积研究*

韩秉进 陈 渊 孟 凯 赵殿臣
(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150040)

摘 要 提出作物有效营养面积新概念, 并用回归理论对此进行试验研究。通过玉米、甜菜试验研究, 建立植株个体营养面积与产量关系的模型, 优化解析出玉米有效营养面积为 0.335 m^2 (57.9 cm × 57.9 cm); 甜菜有效营养面积为 0.358 m^2 (53.4cm × 67 cm)。据此阐明目前生产上广泛采用 67~ 70 cm 的垄作, 已超过玉米、甜菜的有效株行距, 造成土壤等资源的浪费。采用 55 cm 的垄种植甜菜比 67 cm 的常规垄增产 19.8%。

关键词 有效土壤营养面积, 最佳土壤营养面积, 个体, 群体, 产量
中图分类号 S158.3

作物产量的构成是由个体与群体决定的。为了获取高产就必须在充分了解该作物个体生产潜力的基础上, 采取有效措施, 发挥群体优势, 获取高产。为了最大限度地发挥个体和群体的生产力, 各种技术措施都有其有效范围和最佳点, 就土壤而言, 同样也存在有效营养面积和最佳营养面积。有效土壤营养面积是指作物个体产量最高时的个体临界土壤营养面积, 即在当地生产水平(品种、施肥、气候等) 条件下, 随着作物个体土壤营养面积的逐渐增大, 个体产量也会逐渐提高, 当营养面积达到一定程度时, 再增大营养面积, 个体产量也不再提高, 这时的土壤营养面积叫做作物的有效土壤营养面积。最佳土壤营养面积是指作物群体产量最高时的个体临界营养面积, 即随着作物个体营养面积的增大, 单位面积内的群体产量也会随个体产量的提高而逐渐提高, 当个体营养面积达到一定程度时, 再增大营养面积, 群体产量却因群体数量的减少不但不再升高反而会下降, 这时的个体营养面积叫做作物的最佳土壤营养面积(图 1)。

采用优良品种和为作物创造良好的生态环境, 是作物高产的必要条件。本项研究是鉴于北方垄作区几十年来, 尽管品种几经更新换代, 产量也有很大的提高, 可一直不变的是垄型 67~ 70 cm。现行垄距是否充分利用了土壤养分和空间资源? 或说现行株行距是否限制了作物的生长发育, 从而影响了群体产量。即当前的株行距是否是作物最佳的株行距? 当地生产水平(品种、施肥、气候等) 条件下, 为了充分发挥土壤肥力和肥料营养的作用, 株行距很重要, 个体与群体的协调增长才能达到高产。原则上株行距都不应大于有效营养面积半径 R 的 2 倍, 即 $2R$ 是行、株距的上限。最好是在最佳营养面积半径 r 的 2 倍范围内。但迄今为止, 以往无数的密度研究多是为适应现有农机具, 在现有垄作条件下布置不同株距的试验, 并且仅从群体产量出发, 求出最佳密度[1,2]。关于作物不同栽培方式的株行距试验研究, 日本的野村信史[3] 曾在甜菜作物上做过常规垄幅、窄行垄和正方形栽培对比试验, 结果是缩小行距, 加大株距的正方形种植, 由于植株分布合理, 获得高产。徐文富等人[4] 报道, 玉米采用 45 cm 行距种植, 比现行 70 cm 垄作增产 11.5% ~ 15.8%。刘忠堂等人[5] 的大豆窄行密植试验, 通过缩窄行距增加大豆密度, 也获得高产。但以往的研究多是注重群体产量, 而设计的一些有限处理的密度试验, 根本未能涉及作物个体的生产潜力。很少有从作物自身需要出发, 设计既适合作物个体生长发育, 又有利于群体产量形成

* 国家"九五"科技攻关项目(96-004-02-06)、中国科学院创新工程项目(KZCXI-Y-CA-04 和 KZCXZ-SW-416) 资助
收稿日期: 2002-03-15; 收到修改稿日期: 2003-03-26

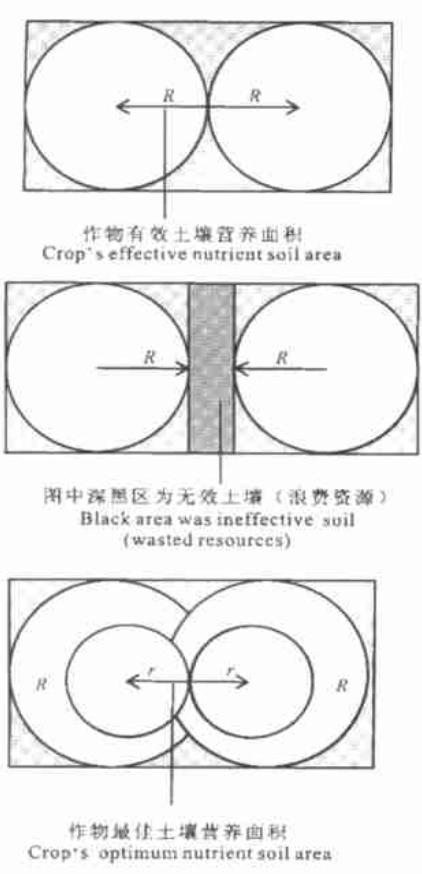

图 1 作物有效土壤营养面积图示

Fig. 1 Crop's effective nutrient soil area

的株行距试验。因此，很难(或说根本不可能)获得作物有效营养面积的数据。更未见"作物有效营养面积"概念与研究的报道。该项研究，是在当地生产条件(自然、品种、施肥)下，从作物需求出发，主要研究作物个体发育所需土壤的有效范围(即有效土壤营养面积)。理论上阐明不同土壤营养面积与作物个体产量的关系，不同土壤营养面积与作物群体产量的关系；实践上检验现行株行距的合理性或为确定新的株行距提供理论依据。确定作物合理的布局，以达到最大限度地利用土壤肥力、肥料营养及空间资源，最终达到增加作物产量的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地点及土壤状况

试验设在中国科学院海伦农业生态实验站。试验地的土壤类型为湿润均腐土，是松嫩平原中代表性很强的土类，前茬小麦，有机质 48.4 g kg^{-1}，全氮 2.36 g kg^{-1}，全磷 1.64 g kg^{-1}，全钾 23.8 g kg^{-1}，速效氮 179.7 mg kg^{-1}，速效磷 49.3 mg kg^{-1}，速效钾 230.6 mg kg^{-1}。

1.2 设计与研究方法

研究方法有两种：一种是单纯基础理论研究；另一种是理论结合生产实际的应用研究。

(1) 理论研究：要求在平作、全层施肥条件下进行。确定作物最大营养面积及最佳营养面积。此项研究不是从适应现有农机具而确定株行距，而是从作物需要出发而确定新的株行距。

(2) 应用研究：在常规垄作、现有生产措施条件下进行。验证现有株行距是否合理，并确定在现有生产条件下作物的合理株行距。这是一种理论与实践结合的研究方法。在现有常规垄作条件下研究作物个体营养面积，这样就简化为不同株距对作物个体产量和群体产量影响的研究。但它不同于简单的密度试验(设计思想不同)，密度试验设计多考虑生产实用从稀至密，选出群体产量最高的最佳密度，即株距，很难得到(或者说根本得不到)个体的有效营养面积的数据。

1.2.1 试验处理 (1) 理论研究：在平作区株行距按正方形设置营养面积为①0.11；②0.14；③0.17；④0.22；⑤0.36(m^2株$^{-1}$)。相当于株行距 33×33、37×37、41×41、47×47、60×60 cm^2。小区面积 40.2 m^2。随机区组，三次重复。(2) 应用研究：在常规垄作区(垄幅 67 cm)垄上设置株距 A，16.7 cm；B，25 cm；C，33.3 cm；D，41.6 cm 四个处理。即土壤营养面积分别为 16.7×67 cm^2、25×67 cm^2、33.3×67 cm^2、41.6×67 cm^2。为了研究不同肥力条件下对作物有效土壤营养面积的影响，试验在无肥区(代表瘠薄土壤)和施肥区(代表中高施肥水平土壤)同时进行。10 垄区，区长 10 m，小区面积 66.7 m^2。

指示作物：平作区为玉米，垄作区为甜菜。

1.2.2 主要栽培措施 作物品种采用当地主栽品种，施肥采用当地最佳施肥配方和用量。玉米品种为海育 6，每 hm^2 施 N 120 kg、P_2O_5 50 kg。甜菜品种为甜研 303，施肥区每 hm^2 施肥料 N 127.5 kg、P_2O_5 49.5 kg、K_2O 49.5 kg。施肥方法是在播种前将肥料一次性施入，玉米平作区是用 24 行播种机将肥料均匀播入田中；甜菜垄作区是在上年结合秋起垄整地一次性分层深施做底肥。播种方法是按设计人工等距离拉线浇水掩种。

1.2.3 调查项目及方法 生育期定期取样，测定生物重、根重、含糖率、叶面积指数等生态指标和净

光合速率等。每次连续取 5 株取其平均值。叶面积采用打孔称重法[6], 含糖率采用手持锤度计测定。小区及示范区最终产量为随机取样 3 点, 每点 10 m^2 产量的平均值。本文因篇幅所限, 略去生育期动态变化分析, 仅就最终经济产量性状部分进行归纳。

2　结果与分析

2.1　平作区(玉米)

2.1.1　不同土壤营养面积对玉米单株经济产量的影响　直观分析: 由图 2 可以看出不同土壤营养面积的玉米单株产量达到 106~ 249 g, 随营养面积的增大而升高, 但处理 ④(0.22 m^2) 与处理 ⑤(0.36 m^2) 差距已不大, 表明试验设计中的不同土壤营养面积处理已达到或接近玉米的有效土壤营养面积。单位面积内产量除营养面积较大的处理 ⑤较低外, 其余处理都较高, 表明在一定的营养面积范围内玉米个体产量与群体产量的自身调节能力也是很强的。

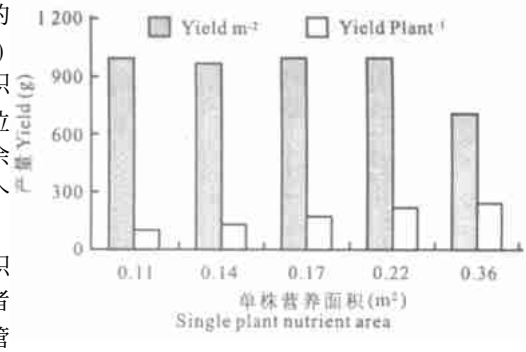

图 2　不同土壤营养面积的玉米产量

Fig. 2　Corn yield in relation to nutrient area

优化解析[7~ 9]: 为了模拟单株产量与营养面积的关系, 经过多种模型建立回归方程进行比较, 笔者认为用二次抛物线模型模拟较好。其优点在于尽管生产实际中单株产量不会随土壤营养面积增大而下降, 但确存在最大值, 即使土壤营养面积再增大, 单株产量也不再上升的顶点(最大值)。我们完全可以利用这个顶点以前的曲线部分来模拟推断出玉米的最大土壤营养面积(有效营养面积)。这样做还可以大大减少试验处理, 增加试验的准确性。

$$y = -81.60 + 1\,984.03x - 2\,957.02x^2 \qquad (n = 5,\ r = 0.995\,9^{**}) \tag{1}$$

式中 y ——单株产量(g), x ——单株营养面积(m^2)。通过方程式优化解析出平作区玉米有效土壤营养面积为 0.335 m^2。将有效营养面积转化后得知, 57.9 cm 是该产区玉米的有效株行距。由此可见, 当前生产中广泛运用的 67~ 70 cm 垄种植玉米, 已造成土壤资源的浪费。

群体产量: 单位面积内产量有随营养面积增大而减少的趋势。

$$y = 774.0 + 2\,578.8x - 7\,749.7x^2 \qquad (n = 5,\ r = 0.994\,2^{*}) \tag{2}$$

式中 y ——平方米产量(g), x ——单株营养面积(m^2)。通过方程式优化解析出平作区玉米最佳营养面积为 0.166 m^2, 即最佳株行距为 40.8 cm。

2.1.2　不同土壤营养面积对植株个体经济产量构成因素的影响　由表1可见, 试验设计范围内, 不

表 1　不同营养面积与个体产量构成因素的相关性(r)分析

Table 1　Analysis of correlation between nutrient area and the yield-forming factors of individual plant

营养面积 Nutrient area (m^2)	穗长 Spike length (cm)	穗粗 Ear wide (cm)	穗粒重 Ear grain weight (g)	百粒重 100- grain weight (g)
0.11	18.5	4.5	126.0	29.3
0.14	20.5	4.6	148.8	33.1
0.17	23.7	4.8	200.0	33.5
0.22	23.5	5.0	225.5	36.4
0.36	25.1	5.2	258.0	40.0
r	0.833 9	0.957 5*	0.916 1*	0.955 6*

*　表示相关系数达到 5% 显著水平

同营养面积与个体产量构成因素(穗长、穗粗、穗粒重、百粒重)均呈正相关。其中与穗粗、穗粒重、百粒重相关达到显著水准。这进一步表明植株营养面积是影响植株产量的重要因子。另外据田间调查,营养面积较大的0.36 m^2 区20%的植株结出双穗。这表明玉米产量的自身调节形式,除了穗长、穗粗、百粒重外,稀植情况下,结双穗也是一种自身调节形式。但尽管0.36 m^2 区玉米植株通过增加穗粒重、结双穗竭力提高单株产量,以此调节群体产量,终因单位面积内的群体株数不足,仍与其它处理的群体产量差异显著。这同时也表明60 cm×60 cm(0.36 m^2)这样的株行距已超出了玉米自身能够调节的株行距范围。

2.1.3 不同土壤营养面积对土壤水分的影响 试验表明,生育各时期,随着玉米个体营养面积的减小,0~40 cm土壤水分也减少(表2)。这表明植株群体多,水分蒸腾量大,使得土壤水分减少(间接说明7月中间~9月中间玉米田的蒸腾量>蒸发量)。同时也表明作物有效土壤营养面积内,能够充分利用土壤水分。

表2 土壤营养面积对土壤水分的影响

Table 2 Effects of nutrient area on soil water ($cm^3\ cm^{-3}$)

营养面积 Nutrient area(m^2)	7月15日 July 15	8月15日 Aug. 15	9月15日 Sep. 15	平均 Mean
0.11	0.209	0.302	0.245	0.252
0.14	0.189	0.303	0.254	0.249
0.17	0.199	0.331	0.259	0.263
0.22	0.239	0.342	0.235	0.272
0.36	0.230	0.307	0.263	0.267

2.2 垄作区(甜菜)

2.2.1 不同土壤营养面积对甜菜单株根重的影响 试验设计中的各处理表现出(图3),土壤营养面积越大,单株根重越大。但无肥区D、C单株根重已差异不大,表明D已达到或接近有效营养面积临界值;施肥区D、C单株根重仍有较大差异,表明D远未达到有效营养面积临界值。

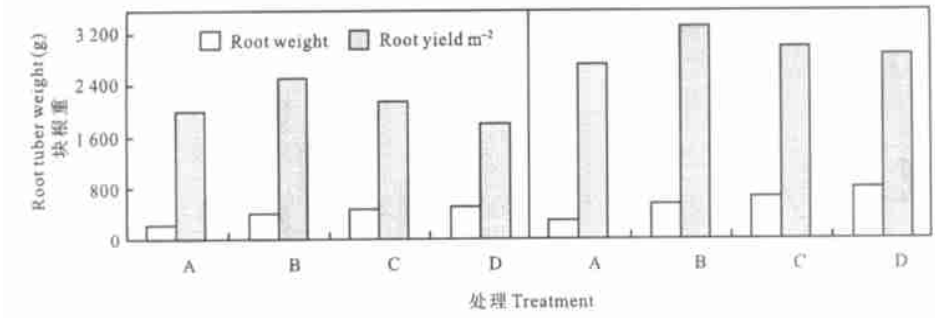

图3 无肥区(左)和施肥区(右)不同处理根重

Fig. 3 Root tuber weight of fertilizer-free plot (left) and fertilized plot (right) in different treatments

优化解析:无肥区单株根重与株距(土壤营养面积)模型 $y=-381.2+46.69x-0.6169x^2$($n=4$, $r=0.9911$),优化解析出株距最大值 $x_{max}=b/(-2c)=37.8$(cm)(即有效营养面积为37.8 cm×67 cm=0.253 m^2);施肥区单株根重与株距(土壤营养面积)模型 $y=-292.76+42.67x-0.3992x^2$($n=4$, $r=0.9946$),优化解析出株距最大值 $x_{max}=b/(-2c)=53.4$(cm)(即有效营养面积为53.4 cm×67 cm=0.358 m^2)。由此可见,目前生产上广泛运用的67~70 cm的垄距,已超出了甜菜作物本身要求的有效株行

距 53.4 cm, 造成土壤资源等的浪费。

2.2.2 不同土壤营养面积对甜菜单位面积块根产量的影响　　生育前期(7 月 31 日以前) 表现出营养面积越小, 单位面积内根产量越高, 之后块根进入快速增长期, A 处理因营养面积过小, 植株生长受限制较大, 严重影响了单株产量和群体产量。后期 B、C 处理表现出较高的产量, D 处理产量较低(图 3)。这表明营养面积过大, 尽管个体产量表现高, 但终因个体数少, 群体产量却低。D 产量较低同时也说明试验设计中包括了最佳营养面积范围, 也就是说株距不能大于 D, 即营养面积不能超过 41.6 cm × 67 cm。

优化解析: 单位面积内根产量与株距的关系是典型的二次抛物线型, 符合常规理论与生产实际。无肥区平米根重模型 $y = 66.33 + 169.51x - 3.103x^2$ ($n = 4$, $r = 0.8996$), 模拟推断出株距最大值 $x_{max} = b/(-2c) = 27.3$ (cm)。即最佳营养面积为 27.3 cm × 67 cm(0.183 m^2)。施肥区平米根重模型 $y = 976.67 + 148.5x - 2.504x^2$ ($n = 4$, $r = 0.7995$), 模拟推断出株距最大值 $x_{max} = b/(-2c) = 29.7$ (cm)。即最佳营养面积为 29.7 cm × 67 cm(0.199 m^2)。

2.3 对比与示范

为了验证有效营养面积理论的真实性, 第二年设置了不同规格垄作的 3 次重复小区对比试验和示范。结果表明在相同条件(主要是密度、施肥等) 下, 55 cm 规格垄作区甜菜产量达到 38.8 t hm^{-2}(含糖 22.3°), 比生产常规 67 cm 垄作区 32.4 t hm^{-2}(含糖 22.1°) 显著提高了块根产量, 平均增产 19.8%。示范田也得出相似的结果, 增产 14.7%。这表明按照作物有效土壤营养面积理论配置株行距, 即缩小垄距, 加大株距, 使每个植株占据土壤的营养面积(包含空间、光能) 都在有效范围内, 较充分利用了耕地资源(包含土壤养分、水分等)、光能, 进一步发挥了作物个体的生产潜力, 使群体产量得到显著的提高。

3 结论与讨论

1. 有效营养面积: 黑龙江产区玉米有效营养面积为 0.335 m^2, 即有效株行距为 57.9 cm; 甜菜有效营养面积为 0.253~ 0.358 m^2[(37.8~ 53.4) cm × 67 cm], 即有效株行距为 37.8~ 53.4 cm。无肥区(或土壤肥力低的土壤) 作物植株个体有较小的有效土壤营养面积, 施肥区(或土壤肥力高的土壤) 作物植株个体要求有较大的有效土壤营养面积。

2. 最佳营养面积: 玉米最佳营养面积为 0.166 m^2, 即最佳株行距为 41 cm × 41 cm; 甜菜最佳营养面积为 0.183~ 0.199 m^2[(27.3~ 29.7) cm × 67 cm], 即最佳株距为 27.3~ 29.7 cm。

3. 目前生产上广泛采用 67~ 70 cm 的垄作, 已超出玉米有效土壤面积要求的株行距(57.9 cm), 也超出甜菜有效土壤营养面积要求的株行距(53.4 cm), 造成土壤资源等的浪费。采用 50~ 60 cm 的垄作种植玉米、甜菜更为合适。采用 55cm 的垄种植甜菜比 67 cm 的常规垄增产 19.8%。作物有效土壤营养面积理论, 不仅有其理论价值, 更有其应用价值。在不同生态区布点试验研究, 按照作物有效土壤营养面积理论配置株行距, 一定能够推进种植制度的改革, 进一步提高现有耕地资源的有效利用, 可大范围、大幅度地提高作物产量。

参考文献

1. 黄开健, 杨华铨, 谭华, 等. 秋玉米高产栽培技术的最佳密度和施肥量研究. 玉米科学, 2001, 9(1): 57 ~ 59
2. 孙国庆, 江绍明, 何立臣, 等. 甜菜 303 在北安垦区最佳密度试验简报. 中国糖料, 1999, (1): 28 ~ 29
3. 野村 信史. テンサイの栽培法が収量, 品質に及ぼす影響. てん菜研究会報, 1986, 28: 81 ~ 85
4. 徐文富, 潘文清. 玉米窄行密植技术的研究与应用. 黑龙江农业科学, 1993, (6): 34 ~ 37
5. 刘忠堂, 何志宏, 魏冀西, 等. 大豆窄行密植高产栽培技术引进试验与嫁接Ⅱ. 平作窄行密植高产栽培技术的增产效果. 黑龙江农业科学, 1998, (1): 27 ~ 29
6. 赵增煜. 常用农业科学试验法. 北京: 农业出版社, 1986
7. 陶勤南. 回归分析与回归设计. 北京农业科学(专集), 1984, 1 ~ 55
8. 马育华. 试验统计. 北京: 农业出版社, 1982. 513 ~ 554
9. 韩秉进. 松嫩平原黑土区玉米生产氮磷配合肥效优化模型的研究. 土壤学报, 1998, 35(3): 392 ~ 397

STUDY ON CROP' S EFFECTIVE NUTRIENT SOIL AREAS

Han Bing-jin Chen Yuan Meng Kai Zhao Dian-chen
(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Summary

A new concept of Effective Nutrient Soil Areas (ENSA) was put forward and studied with the regression method. Through conducting experiments with corn and sugar beet, a model of the relationship between ENSA and yield of an individual crop was established. By using the model, an optimal ENSA of corn was worked out as 0.335 m^2 (57.9 cm × 57.9 cm) and that of sugar beet as 0.358 m^2 (53.4 cm × 67 cm). Therefore, for corn and sugar beet the ridge planting method of 67~ 70 cm in spacing, which is applied widely in the current production, is wasting soil resources, because the plant has a space larger than the ENSA of the crop. The results of the narrower space tests with the new theory show that their yields are about 19.8% higher than those of the normal ridge planting method.

Key words Effective nutrient soil area, Optimal nutrient soil area, Individual, Colony, Yield