植物营养与肥料学报 2000,6(2):233～240
Plant Nutrition and Fertilizer Science

灌溉施肥的研究和应用

李伏生，陆申年
（广西大学农学院，广西南宁 530005）

摘要：本文论述了近代灌溉施肥的原理、管理及应用等方面的研究进展。着重讨论了灌溉施肥的方法，水分与养分在土壤的分布特点，作物最佳养分供应的影响因素，肥料的选择和用量，灌溉频率以及设施选用等。

关键词：灌溉施肥；滴灌；注入速率
中图分类号：S275　　**文献标识码**：A　**文章编号**：1008-505X(2000)02-0233-08

肥料随同灌溉水进入田间的过程叫做灌溉施肥(fertigation)。即滴灌、地下滴灌等在灌水的同时，按照作物生长各个阶段对养分的需要和气候条件等准确将肥料补加和均匀施在根系附近，被根系直接吸收利用。灌溉施肥是定量供给作物水分和养分及维持土壤适宜水分和养分浓度的有效方法[1～3]。在农业先进国家如以色列，75%～80%的灌溉地采用灌溉施肥方式[4]。这种方法不仅用于田间施肥，而且用于温室基质无土栽培作物施肥[5]，由于肥料准确和均匀施在根系周围并按作物需肥特点供应，肥料利用率高。如甘蔗滴灌施肥对N的利用率达75%～80%，常规施肥只有40%[6]。灌溉施肥可节省肥料用量和控制肥料的入渗深度，减轻施肥对环境的污染[7,8]；而且可调节水的入渗速率，灌水均匀，不产生地面径流和减轻土壤板结，减少土表蒸发和渗漏损失，使灌溉水利用率可达90% 以上。但灌溉施肥投资较高，需要肥料注入器和肥料罐以及防止灌溉水回流到清洁水的装置[2,10]等设备，而且要用防锈材料保护设备的易腐蚀部分。灌溉施肥只适合用液体肥料和可溶性肥料，以防堵塞滴头。而且在湿润土壤边缘有盐分积聚和根系数量与体积减少现象[2]。

1　灌溉施肥的水分和养分在土壤中分布特点

滴灌的特点是水从点水源进入土壤，然后向各个方向扩散。土壤类型、滴头流量和每次灌溉的水量等均会影响水分在土壤中分布。对一种土壤来说，滴头流量的增加会引起水湿润土壤垂直深度变浅，以滴头为圆心的半径变大。如果给定灌溉水量和滴头流量，则砂土中水分湿润深度比壤土要深，但半径变小[1,11]。由于灌溉施肥频率高，土壤水分含量变化不大，有利于作物吸收水分和养分，可提高肥料的利用率，特别是磷[2,10]。

随着从滴头到湿润边缘距离增加，不被吸附的离子如NO_3^-浓度也随之增加。壤土的湿润区域其离子浓度梯度比砂土要大，滴头流量大的比流量小的浓度梯度大。而吸附态养分在土壤中的移动性比非吸附态养分要低得多，养分在粘土比砂土易被吸附，因而养分在质地细的土壤的移动性比质地粗的土壤要慢。据研究，NO_3^-和水分在土壤中分布相似，而磷

收稿日期：1999-05-04
基金项目：广西大学基金资助(科基金1701)。
作者简介：李伏生(1963—)，男，湖南祁阳人，副教授，主要从事植物营养学方面研究。

在砂土和粘土的分布分别是距滴头 11cm 和 6cm[12]。增加滴头流量，离滴头越远，NO_3^- 浓度越高，易积聚在湿润土壤边缘，但磷并不增加。如用盐水灌溉时，在湿润土壤边缘盐分很快积聚到有害作物生长的浓度[1,2,10]。在滴灌条件下，尽管土壤交换性钾量很高，但作物最大钾吸收时期，仍要通过灌溉水补充钾[13]。由于交换性钾从土壤固相进入溶液影响着作物对钾的吸收，当施用钾肥后，土壤中溶液钾的浓度提高，使钾的吸收量增加。

2 作物最佳养分供应的影响因素

2.1 在整个生育期内，作物干物质合成速率和体内养分最适浓度决定最佳产量和品质的日养分吸收速率

养分吸收速率[Q(t)]定义为给定养分最低日施用数量，以保持土壤稳定的养分供应。实际施肥的数量还应考虑肥料利用率(EF＜1)，因而施肥数量为 Q(t)/EF。在滴灌施肥条件下，EF 可大于 0.8[6,14]。养分日吸收速率决定于作物种类和气候条件，但与土壤性质和灌溉技术无关[9]。不同作物对养分吸收速率及吸收高峰差异很大，即使同一作物不同品种之间差异也很大。在许多情况下，作物吸收养分函数并不是线性的，在作物生长临界期变化很大。如忽视作物对养分吸收短期内变化，施肥可能过量，引起土壤盐分积累，降低作物对其它元素的吸收和污染环境；而施肥量不足，又会导致土壤养分耗竭和吸收率下降。

氮肥施用应按作物的生长发育时期进行；而磷、钾肥用量可根据土壤速效性磷、钾值的大小来确定。

2.2 在整个生育期内，作物光合作用不受影响时的水分日吸收速率

蒸腾作用决定于气象因素和植物特性[15,16]。实际灌水量往往要超过作物蒸腾量，这是由于灌溉水的消耗除蒸腾之外，还包括表土水分蒸发和淋洗根系附近盐分对水的需要。日耗水量可用潜在蒸腾蒸发量乘以作物系数[15]或蒸发皿(A 皿)法[2,17~19]来估算。如用 A 皿法估计作物的日灌水量，番茄在整个生育期内灌水量约是用 A 皿法测定蒸发量[17,18]的 0.4～0.75 倍(k 值)。多数蔬菜的 k 值是 0.75，甘蔗 0.90，葡萄和落叶果树 0.50，柑桔、鳄梨以及亚热带果树 0.60，香蕉、木瓜和热带果树 0.70 等[2]。

2.3 植物最佳根重(或根长)以及根系在土壤中最优分布

在灌溉施肥条件下，水、肥利用率的提高与水和肥料在根系附近分布有关。高产番茄，甜椒，网纹甜瓜和甜玉米的根系分布在 40cm 范围内，这与滴灌条件下水分和肥料的分布基本一致[9,13]。因此，保持土壤溶液养分最佳浓度，以保证植物按 Q(t)的要求吸收养分。

3 养分吸收通量与灌溉水和土壤溶液中养分浓度的关系

养分吸收速率是土体的养分吸收通量与根表面积(或根长)的乘积。吸收通量 F[mol/根长(cm)/时间(s)]由根表面土壤溶液的养分浓度 Cr(mol/L)决定，用下面米氏方程来计算：

$$F = F_{max}C_r/(K_m + C_r) \quad (1)$$

式中最大吸收通量 F_{max}[mol/根长(cm)/时间(s)]和米氏常数 K_m[mol/L]均是植物参数。米氏公式较好地描述了大多数养分的吸收通量和根表处养分浓度之间的函数关系，还可用

于确定灌溉水中某些养分临界浓度。

对于不易被土壤吸附的养分如 NO_3^-,灌溉水养分浓度(C_w)大致为土壤溶液的养分浓度(C_b),但不是根表土壤溶液的养分浓度(C_r);而易被土壤吸附养分如 P、K 等,C_w 则应由土壤固相对养分的吸附强弱决定。C_r 和 C_b 之间的差异是由于根附近的养分耗竭快,而养分从土体向根表的迁移慢的缘故。C_w 和 C_b 之间的差异则可通过提高灌溉施肥的频率而缩小。为了简化计算,假设溶液浓度稳定和不考虑质流,则可用下式描述 C_r 和 C_b 之间的关系[20]:

$$C_b = C_r[1 + S/(K_m + C_r)] \tag{2}$$

式中 $S = F_{max} \times \ln(b/a)/(6.28D)$,其中 b,a 分别为根与根之间平均距离及根半径(cm),D 是土壤中养分的有效扩散系数(cm^2/s)。D 可用下述公式计算:

$$D = KD_0\exp(\alpha\theta) \tag{3}$$

式中 D_0 是养分在纯水中扩散系数,θ 是容积含水量,α(约为 10)和 K(约为 0.001～0.005)均是与土壤有关的常数。随着土壤表面积的增加,K 值降低。在正常的灌溉施肥条件下,S 值大约在 $0.01K_m$ 和 $100K_m$ 之间变动。

设番茄 a=0.04cm,b=0.2cm,$D=2.7\times10^{-6}cm^2/s$(砂土)和 $F_{max}(NO_3)=4.2\times10^{-14}$ mol/(cm·s),$K_m(NO_3)=2.58\times10^{-4}$mol/L,计算出 $S\approx4.0\times10^{-6}$mol/L,可见 $S<K_m$。如假定 $C_r=K_m$,则方程 2 估算的 C_b/C_r 的比率约等于 1。再接受 $C_w=C_b$,C_w 能很好地估算根表面的 NO_3^- 的浓度。对高 F_{max}和低 D(如易被土壤吸附的养分 P 和 K),计算出 $S>K_m$,接受 $C_r=K_m$,则方程 2 估算的 $C_b=0.5S$,比 C_r 高很多。如 $S=4\times10^{-3}$mol/L,为保证根表面 K_m 值,灌溉水中的 P 浓度约为 2×10^{-3}mol/L。由于在上面估计中是假设土壤中质流等于零,因而实际 C_b 值比估算的要少。

C(=Q(t)/日灌水率)应当与前述估算 C_b 相等。当作物耗水量高和根系分布有限时,C 可能太低而不能满足作物对养分的需要,此时养分供应数量应高于 Q(t)以维持养分浓度达到所需的 C_b,不过这样做会造成肥料浪费。为避免其不利影响,应种植根系发达的作物,这样较低的 C_r 就可以维持所需求的 Q(t)。由于根系体积增大后,作物对水和养分有较大的缓冲性和不能迅速地消耗或积累养分,因而很难在作物临界时期对肥料准确控制供应,且其对养分和水分利用率要比根系分布有限制的作物低。

4　肥料选择

灌溉施肥所用的肥料应全部是水溶性的化合物。氮肥有 NH_4NO_3,$Ca(NO_3)_2$,NH_4Cl,$(NH_4)_2SO_4$,$CO(NH_2)_2$ 以及各种含氮的溶液等;磷肥有 H_3PO_4;钾肥包括 KCl,K_2SO_4;复合肥如 KNO_3,$NH_4H_2PO_4$,$(NH_4)_2HPO_4$,KH_2PO_4 和 K_2HPO_4 等或选择根据最佳养分吸收量确定的不同 N、P、K 比率水溶性混合肥料。微量元素肥料应是水溶性或螯合态的化合物。

不同肥料对灌溉水及土壤的 pH 值影响不同。灌溉水 pH 值不能高于 7.5,pH 高时会在管道中及滴头上形成钙、镁的碳酸盐和磷酸盐沉淀,且高 pH 会降低锌、铁、磷等对作物的有效性。灌溉施肥不宜用氨水,因氨水注入灌溉系统时,将会使灌溉水的 pH 值高于 7.5。而硝酸和磷酸的施用,使灌溉水的 pH 值降低到 4～5,这样的 pH 值有利于维持磷和微量元

素的有效性。但加入酸性物质不宜过多，否则会因 pH 值过低伤害根系和导致土壤溶液中的铝、锰的浓度增加，对作物产生毒害。

灌溉水中 NH_4^+/NO_3^- 比率大小也影响土壤 pH 值，尤其是影响根—土界面处 pH 值。当吸收铵态氮(NH_4^+-N)为主时，根系分泌出 H^+ 酸化土壤；当吸收硝态氮(NO_3^--N)为主时，根系排出 OH^- 使土壤 pH 升高[21]。土壤中由于施入 NH_4^+-N 或 NO_3^--N，会引起 pH 值在 ±1.5左右波动[22]。对于番茄和玫瑰花，当溶液的 NH_4^+/NO_3^- 比率在 1:4 和 1:3 之间，营养液 pH 保持稳定[23]。用岩棉作基质种植网纹甜瓜，用 NH_4^+-N 作唯一氮源时，淋洗液的 pH 由流动培养溶液 pH 接近 7 下降到 4 左右[9]。低温时，NH_4^+-N 比 NO_3^--N 好，由于低温降低 NO_3^--N 向地上部运输，减少作物可利用的氮量；而高温时 NO_3^- N 则是更好的氮源[24]。当根区温度高于 30℃时，番茄、草莓不宜施用 NH_4^+-N，因为高 NH_4^+-N 会使根系坏死[25,26]。有研究指出，施用 NH_4^+-N 导致砂土酸化是灌溉施肥对作物的重要潜在限制因素[27]。酸化会提高土壤中有毒元素如铝、锰的可溶性，并造成 Ca, Mg, K 的淋失，K 尤为严重[28]。大多数蔬菜虽为喜硝作物，如配施适量的 NH_4^+-N，对提高产量和降低体内硝酸盐的含量有良好的作用。

铵态氮在通气良好的土壤上易被硝化细菌转化为硝态氮。硝化速率取决于土壤温度，pH 及含水量等。在 25℃和田间持水量时，铵态氮的一半被硝化约在二周内完成[29]；而低温、酸性土壤，每日供应铵态氮会导致其在土壤中积累[24]。当施氮量超过作物吸收量时，应多施一些铵态氮肥，以减少土壤氮的淋溶损失。尿素也很容易随灌溉水移动，在土壤中的分布与硝态氮类似。在 25℃时尿素可在几天内被土壤中的脲酶水解成 NH_4^+-N，导致土壤 pH 值的升高，从而降低土壤中磷对作物的有效性[4,30]。此外，石灰性土壤施用较多尿素时，对某些对氨敏感的作物是有害的[24]。

磷在土壤中的移动非常缓慢，通过灌溉水连续施用磷肥(正磷酸盐)优于磷肥一次足量施用作基肥[29]。磷肥作基肥时，磷被土壤吸附和固定，影响作物对磷的吸收[30]。通过灌溉水连续施用磷肥，磷在土壤中固定量显著减少，使土壤溶液中磷浓度高于作基肥施用[24,32]，从而磷肥的利用率提高。但磷肥通过灌溉水施肥时，必须注意防止肥料之间及肥料和灌溉水中成分发生化学反应，以免因在管中形成沉淀(如磷酸钙，碳酸钙，硫酸钙)而造成灌溉系统阻塞[33]。因此，磷酸、磷酸一铵等是较好的磷肥。因为 $H_2PO_4^-$ 与钙和镁形成的化合物溶解度远比 HPO_4^{2-} 与钙和镁的化合物溶解度高。由于磷和微量元素与其它肥料易形成沉淀，应单独通过灌溉水施用，或将全部磷肥和微肥用作基肥集中沟施或条施。通常灌溉施肥时，将全部氮肥和钾肥的 20%～40%用作基肥，其余通过灌溉水施用。

此外，干旱地区土壤施用肥料要注意其成分不造成盐分积累。一般当灌溉水的电导率(EC)超过 1.44mS/cm 和 2.88mS/cm 时，将会引起中等程度和严重的盐害[30]。如作物最大养分吸收期，灌溉水中氮、钾浓度可达到 15～20mmol/L，相对应的电导率为 1.5～2.0mS/cm，在这种情况下，尤其是灌溉水中 EC>1mS/cm 时，应降低因施氮、钾所带入的陪伴离子如 Cl^-、SO_4^{2-} 的数量。例如，KCl 含较多的 Cl^-，就应当用 KNO_3 或 K_2HPO_4 来代替；用 NH_4NO_3 和 $CO(NH_2)_2$ 也比用 $(NH_4)_2SO_4$ 好。$NaNO_3$ 和 NaH_2PO_4 所含的 Na^+ 会降低土壤导水率[34]和危害植物生长[21]，不宜施用。

5　灌溉施肥的频率

肥料注入滴灌系统的频率因情况不同而不同。一般注入频率为一天一次,两天一次或每周一次。选择何种决定于系统设计、土壤类型和农户偏爱。研究发现,注入频率对作物供应养分的数量没有什么差别[17]。用计算机控制的滴灌系统,可以每天一次供应水肥。多雨季节或灌水多时,与一次注入较多肥料(注入次数少)相比,注入肥料次数多(如一天一次),可以减少土壤养分的淋溶损失。如果淋溶损失不大的话,一周一次就足够,以保证养分不发生淋溶损失和满足根系的最佳养分需求为准。

蔬菜作物在生长期内养分注入速率很少调整。对大多数蔬菜作物来说,在整个生长时期内,养分供应速率只需改变4～5次;而对生长期短和生长较快的蔬菜,注入速率只要3～4次变化即可[17]。也有报道,养分注入速率要多次改变[9]。养分注入土壤的实际时间要使注入土壤的养分均匀。适宜的养分注入时间约是15～20min,接着用水冲洗15～20min。砂土上种植番茄,每次灌水施肥适宜时间为45min(幼苗期)～1.5 h(生长旺盛期)[17],如果每次灌水时间超过1.5h,将会发生养分淋失到根系区域以外。

6　土壤—植物系统水分和养分的监测

作物养分最适吸收量是最佳干物质产量(ODM)和养分最佳浓度(ONC)之积。通过测定作物干物重及养分含量,并分别将其与作物临界时期最佳值对比,就能判断出作物的生长状况和养分吸收量是否符合其所需。对任何偏离ODM和ONC的情况,需及时矫正养分和水分。作物体内水分状况可通过直接测定叶水势或其他方法进行估计,以判断作物是否需要灌水。

作物干物重和养分全量的测定,一个生长季节1～2次,一般应在取样后2～3天完成。以免造成测定误差,影响养分及时补给而降低产量。另一方法是测定作物组织或器官(如叶柄、叶鞘)的养分浓度如NO_3^-,无机磷等,来判断作物养分状况。这种方法可在田间进行,即将叶柄或叶鞘直接压榨或用蒸馏水浸提,测定硝态氮以及P、K等元素含量,并与作物相应生长期内的正常养分浓度对比,以确定作物是否施肥。

土壤溶液的养分浓度决定于施肥数量,土壤固相对养分的吸附强弱和含水量等。土壤含水量过低,会影响养分的吸收;但灌水过多,则会造成土壤缺氧,危害作物生长。同时,水分过多会使养分淋失,污染地下水,因而应定期测定土壤水分含量或土水势。田间土壤水分状况可用张力计测定土水势。在滴灌条件下,建议砂土(15～20cm土层)的土水势为－8～－15kPa,粘土为－10～－30kPa[17,35]。用中子仪或时域反射仪等测定土壤含水量,指示土壤水分变化情况。

土壤养分测定可用于确定其实际浓度和最适浓度之间的差异,根据其差异进行施肥矫正,以保证作物正常生长的土壤养分浓度。可在根系附近的土壤一个或数个部位定期取样,按常规法测定其可溶性和吸附态养分;也可用直接长期埋入土壤的真空杯装置采集土壤溶液,然后分析溶液中养分浓度。

7 灌溉施肥的应用

7.1 灌溉施肥系统的专用设备

滴灌系统专用设备包括滴头、过滤器、施肥装置等。

滴头的种类很多,有发丝管、管式滴头、孔口滴头、膜片式多孔毛管和双壁管(或称滴管带)等。对于宽行大间距果园和条播作物,一般可使用流量为4～8 L/h的单出口滴头或流量为2～8 L/h的多出口滴头。田间毛管线上滴头之间距取决于土壤类型和作物种类,一般滴头的间距为20～30cm适合于甜椒、草莓,黄瓜、甜瓜和卷心菜等株距短的作物;间距40cm适合于番茄、西瓜、南瓜、茄子等株距长的作物[17]。

过滤器是滴灌系统中的关键设备之一,其作用是把灌溉水中固体颗粒、有机物质、微生物及化学沉淀物等各种污物和杂质清除掉,以防止滴头阻塞而影响灌水施肥效果。常用的过滤器有筛网过滤器、砂砾石过滤器、离心式过滤器等。如用井水灌溉,可选用筛网过滤器以滤掉井水中砂或石灰石;如用池塘水、河水、水库水或湖水等灌溉,可选用砂砾石过滤器以清除细砂和水中的飘浮物、藻类、细菌、幼虫。在施肥装置之后应安装二级过滤器,以避免灌溉水中因加入肥料形成沉淀阻碍滴头[1,2,10]。

向滴灌系统注入可溶性肥料溶液的装置称为施肥装置。常用的有文丘里注入器,水力、电力、内燃机等驱动的注入泵,压差式施肥罐等。施肥装置的选择决定于设备的使用年限,注入肥料的准确度,注入肥料速率及化学物质如酸对滴灌系统的腐蚀性大小等[17]。其效率取决于肥料罐的容量,用水稀释肥料的稀释度,稀释度的精确程度,装置的可移动性以及设备的成本及其控制面积等[2]。注入泵或文丘里注入器是将开敞式肥料罐的肥料溶液注入滴灌系统中;而压差式施肥罐是肥料罐(由金属制成,有保护涂层)与滴灌管道并联联接,使进水管口和出水管口之间产生压差,使部分灌溉水从进水管进入肥料罐,再从出水管将经过稀释的营养液注入灌溉水中。使用时必须要保证肥水不向主管网回流,可使首部枢扭安装在较高处或用一个单向阀(逆止阀或真空破坏阀)。

7.2 灌溉施肥的控制

对于单个灌溉周期,一般只需将所需的肥液量注入肥料罐即可;如采用水力、电力驱动的注入泵,可单独设定施肥量。对连续灌溉,每个灌溉周期的施肥量由控制器控制,也可用单独计量表进行,通过计量表计量注入泵输出的肥料溶液。

若在灌溉周期的一部分时间里施用化肥,可分三阶段进行控制。第一阶段表土先用无肥的水湿润;第二阶段将肥料和水一同施入土中,第三阶段用水冲洗系统使肥料分配到所需的土层。对于易腐蚀的铝管,施肥结束后还要用清水加以清洗。

7.3 肥料用量的表示方法和计算

肥料用量的计算

(1) 每立方米水的肥料用量(A),用克/立方米表示:

$$A(g/m^3) = 所需养分浓度(mg/L)/肥料中养分含量(\%)$$

(2)每立方米水的肥料体积(Vw),用升/立方米表示:

$$V(L/m^3) = 所需养分浓度(mg/L)/[肥料中养分含量(\%) \times 液体肥料密度(kg/L)]$$

(3)单位面积的肥料重量(W),用千克/公顷表示:

$$W(kg/hm^2) = 养分需要量(kg/hm^2)/肥料中养分含量(\%)$$

(4)单位面积的肥料体积(VA),用升/公顷表示(适用于液体肥料):

$$VA(L/hm^2) = 肥料重量(kg/hm^2)/液体肥料的密度(kg/L)$$

(5)复合肥料用量的计算:

如灌溉水的 N 浓度为 60mg/L, P_2O_5 浓度为 40mg/L,先用液体磷酸铵(8-24-0,比重 1.3),即达到供磷数量 40mg/L 所需液体磷酸铵为:40(mg/L)/24% = 167g/m^3,所用体积为 167/1.3 = 128mL/m^3;167g/m^3 液体磷酸铵提供的 N 量为 167×8% = 13g/m^3,不足的 N 量(47mg/L)可用液体硝酸铵(含 N 21%,密度 1.3kg/L)补足。即:47(mg/L)/(21%×1.3) = 172mL/m^3。因此,水中应加入液体磷酸铵 128mL/m^3,液体硝酸铵 172mL/m^3。

参考文献

[1] Dasberg S and Bresler E. Drip irrigation manual[M]. International irrigation information center. Publication No.9, Bet Dagan, Israel, 1985.

[2] Goldberg D, Gornat B and Rimon D. Drip irrigation principles, design and agricultural practices[M]. Drip irrigation scientific publications, Kfar Shmariahu, Israel, 1976.

[3] Neilsen D, Parchomchuk P *et al*. Using soil solution monitoring to determine the effects of irrigation management and fertigation on nitrogen availability in high density apple orchards[J]. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 1998, 123(4):706~713.

[4] Sneh M. The history of fertigation in Israel[A]. *In*: Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation Proc. [C]. Haifa, Israel, 1995, 1~10.

[5] Sonneveld C. Fertigation in the greenhouse industry[A]. *In*: Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation Proc. [C]. Haifa, Israel, 1995, 121~140.

[6] Ng Kee Kwong KF and Deville J. Application of ^{15}N-lablled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in mauritius. Fertilizer research, 1994, 39:223~228.

[7] Alva A K, Paramasivam S. Nitrogen management for high yield and quality of citrus in sandy soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62 (5):1335~1342.

[8] Alva A K, Paramasivam S and Graham W D. Impact of nitrogen management practices on nutritional status and yield of valencia orange trees and groundwater nitrate[J]. J. Environ. Qual., 1998, 27(4):904~910.

[9] Scaife A and Bar-Yosef B. Nutrient and fertilizer management in field grown vegetables[R]. IPI-bulletin No.13, 1995. 66~89.

[10] Shani M and Sapir E. Fertilization in irrigation[R]. Extension Service, Ministry of Agriculture, Israel, 1986.

[11] Bresler E. Trickle-drip irrigation: principles and applications to soil-water management[J]. Adv. Agron., 1977, 29: 343~393.

[12] Bar-Yosef B and Sheikholsami M R. Distribution of water and ions in soils irrigated and fertilized form a trickle source [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. Proc., 1976, 40:575~582.

[13] Bar-Yosef B and Sagiv B. Potassium supply to field crops grown under drip irrigation and fertilization[A]. Proc. K Symposium[C]. International Potash Institute, Pretoria, 1985. 185~188.

[14] Shvah Y and Waldman M. Advances in management of fertilizer application and the resulting effect on the pollution load in soil[A]. *In*: Bar-Yosef B, Barrow N J and Goldshmid J (eds.). Inorganic contaminants in the Vadose Zone[M]. Springer-Verlag, New York, 1989. 179~189.

[15] Hatfield J L and Fuchs M. Evapotranspiration models[A]. *In*: Hoffman GJ, Howell TA and Solomon KH (eds.). Management of farm irrigation systems[M]. ASAE monograph, Amer. Soc. Agri. Engineer. St. Joseph, MI, 1990. 44~59.

[16] Stanhill G. Water use efficiency[J]. Adv. Agron., 1985, 39: 53~85.

[17] Hochmuth G J. Fertigation of vegetable crops in Florida[A]. *In*: Dahlia Greidinger International Symposium on Ferti-

gation Proc.[C]. Haifa Israel, 1995. 199～214.

[18] Locascio S J, Olson S M and Rhoads F M. Water quantity and time of N and K application for trickle-irrigated tomatoes [J]. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 1989, 114:265～268.

[19] Locasico S J and Smajstrla A G. Water application scheduling by pan evaporation for drip irrigated tomato[J]. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 1996, 121(1):63～68.

[20] Olsen S R and Kemper W D. Movement of nutrients to plant roots[J]. Adv. Agron., 1968, 20:91～151.

[21] Mengel K and Kirkby E A. Principles of plant nutrition (4th ed.)[M]. International Potash Institute, Bern, Switzerland, 1987.

[22] Barber S A. Soil nutrient bio-availability[M]. Wiley-Interscience, New York, 1984.

[23] Fein A, Zwibell M, Rylski I, Zamir N and Levav N. The effect of ammonium/nitrate ratio in the nutrient solution on tomato yield and quality[J]. Acta Hort., 1979, 98:149～160.

[24] Kafkafi U. Combined irrigation and fertilization in arid zones[J]. Israel J. of Plant Sci., 1994, 42:301～320.

[25] Ganmore-Neumann, Ruth and Kafkafi U. Root temperature and percentage NO_3/NH_4 effect on tomato plant development Ⅰ. Morphology and growth[J]. Agron. J., 1980, 72:758～761.

[26] Ganmore-Neumann, Ruth and Kafkafi U. The effect of root temperature and NO_3/NH_4 on strawberry plants. Ⅰ. Growth, flowering and root development[J]. Agron. J., 1983, 75: 941～947.

[27] Neilsen G H and Parchomchuk P et al. Response of apple trees to fertigation-induced soil acidification[J]. Can. J. Plant Sci., 1994, 74:347～351.

[28] Parchomchuk P, Neilsen G H and Hogue E J. Effects of drip fertigation of NH_4-N and P on soil pH and cation leaching [J]. Can. J. Soil Sci., 1993, 73:157～164.

[29] Stanford G and Epstein E. Nitrogen mineralization and water relations in soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1974, 38:103～103.

[30] Bar-Yosef B. *Fertilization under drip irrigation[A]. In: Palgrave DA. (ed.). Fluid fertilizer science and technology* [M]. Marcel Dekker, Inc, NY, 1991. 285～329.

[31] Bar-Yosef B, Sagiv B and Markovitch T. Sweet corn response to surface and subsurface trickle P fertigation[J]. Agron. J., 1989, 74:640～644.

[32] Bar-Yosef B, Sagiv B, Markovitch T and Levkovitch I. Phosphorus placement effects on sweet corn growth, uptake and yield[A]. *In*: Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation Proc.[C]. Haifa, Israel, 1995. 141～154.

[33] Bar-Yosef B and Imas P. Tomato response to phosphorus nutrition via drip fertigation[A]. Proc. Fifth Intern. Microirrigation Cong.[C]. Orlando, Fl. American Soc. Agric. Engineers, 1995. 200～208.

[34] Bresler E, McNeal B L and Carter D L. Saline and sodic soils[M]. Springer-Verlag, New York, 1982.

[35] Thompson T L and Doerge T A. Nitrogen and water rates for subsurface trickle-irrigated Romaine lettuce[J]. HortScience, 1995, 30(6):1233～1237.

Study on the fertigation and its application

LI Fu-sheng, LU Shen-nian

(*Faculty of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi* 530005)

Abstract: In this paper, recent research pregress on the principle, management and application of fertigation was discussed. Fertigation method, distribution characteristics of moisture and nutrients in soil, the factors affecting optimal nutrient supply to crops, fertilizers selection and amounts, irrigation frequency and equipments of fetigetion were mainly introduced.

Key words: fertigation; drip irrigation; injection rate