

# 采用水肥一体化技术统筹工农业协调发展

安 迪,王亭杰,金 涌

(清华大学化学工程系,北京 100084)

**[摘要]** 我国化肥利用率低,面源污染严重,同时农业耗水量大,水资源短缺问题突出。本文提出一种以水肥一体化滴灌技术为核心的高效设施农业发展方式。通过滴灌技术可以实现养分和水对作物的定量供应,提高化肥利用率并提高灌溉用水效率和作物产量;将过滤后的沼肥沼液与滴灌相结合,可将畜禽粪便和农作物秸秆变废为宝,改善农村生态环境;工业上排放的CO<sub>2</sub>经过无害化处理后,可通入附近的温室大棚,为作物提供碳源;应用和推广水肥一体化滴灌技术,能够拉动聚氯乙烯(PVC)的需求,消化部分PVC的过剩产能,进而拉动氯碱行业。通过滴灌设备租赁、废旧设备回收环节,完善整个产业链条,统筹协调工业农业平衡发展。

**[关键词]** 化肥;节水;利用率;滴灌;PVC

**[中图分类号]** S14 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)05-0120-06

## 1 我国化肥和农业用水利用率低

我国人均耕地面积不足世界平均水平的40%,粮食安全是我国的立国之本。化肥是粮食的“粮食”,是农业生产中最基础和最重要的物质投入,农作物增产的30%~50%来源于化肥的贡献<sup>[1]</sup>。我国化肥消费量大,长期居世界首位。2013年我国化肥施用量为 $5.9119 \times 10^7$  t(折合N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O)<sup>[2]</sup>,约占世界总消费量( $1.867 \times 10^8$  t)的1/3<sup>[3]</sup>,其中约90%是氮肥、磷肥和复合肥,分别为 $2.3942 \times 10^7$  t、 $8.306 \times 10^6$  t和 $2.0575 \times 10^7$  t,其中钾肥施用量为 $6.274 \times 10^6$  t<sup>[2]</sup>。

化肥生产消耗大量天然气、煤炭、磷矿、硫资源和钾资源。然而,我国化肥的利用率很低,氮肥利用率只有30%~35%,磷肥当季利用率仅为10%~25%,钾肥也只有35%~50%<sup>[4]</sup>。如此低的利用率,不仅造成巨大的资源浪费,也带来严重的环境污染。2010年的全国污染源普查公报显示<sup>[5]</sup>,我国水体污染的主要因素是面源污染,湖泊中氮、磷污染

分别有57.2%和67.3%来自于农业面源污染,而来自于化肥的氮、磷污染分别占农业面源污染的59.1%和38.2%。化肥流失已经成为量大、面广、累积的庞大污染源。

农业生产同时消耗大量的水资源。我国是一个水资源严重短缺的国家,人均水资源占有量为 $2713 \text{ m}^3$ ,仅为世界水平的1/4<sup>[6]</sup>。2013年,我国用水总量为 $6.1834 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,其中农业用水占用水总量的63%,工业用水占用水总量的23%,是用水的主要消耗途径,城镇农村居民生活用水以及为维护现有生态系统平衡所需的生态用水比例较低,分别为12%和2%<sup>[2]</sup>。我国农业灌溉大多采用漫灌方式,水的利用率很低,只有40%~50%,而发达国家可达到70%~80%<sup>[6]</sup>。而随着城市和工业的快速发展,水资源供需矛盾日益突出。据统计,全国每年缺水量近 $4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,其中农业每年缺水 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,城市和工业缺水 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,造成工业损失年产值超过2300亿元<sup>[7]</sup>。全国669个城市中,有400多个城市缺水,其中110

**[收稿日期]** 2015-03-19

**[作者简介]** 金涌,1935年出生,男,北京市人,中国工程院院士,清华大学化工系教授,博士生导师,主要从事化学工程及生态化工研究;

E-mail: jiny@mails.tsinghua.edu.cn

个城市严重缺水<sup>[8]</sup>。

提高化肥和水的利用率,特别是灌溉用水效率,不仅是当务之急,也是现代农业和生态环境可持续发展的战略要求。

## 2 水肥一体化滴灌技术

水肥一体化滴灌技术是将灌溉和施肥结合、高效集约的农业灌溉技术。将可溶性的化肥与水配成肥液,通过管道系统将肥液与灌溉水通过管道和滴头喷洒到作物上或滴入植物根系生长发育区,能够定量控制供给作物的水分和养分。水肥一体化滴灌的主要优点包括<sup>[9, 10]</sup>: a.水滴入土壤,能够防止水分径流,减小蒸发面积,降低水分渗漏等,从而有效地提高水的利用率; b.滴灌施肥将肥液直接输送到作物根系最发达、最集中的部位,可充分保证养分的供应和根系的吸收,提高化肥利用率; c.滴灌技术可以根据气候环境、土壤特征和不同作物不同生长阶段对养分的需求,定量调节供给肥液养分的量、种类和比例等,满足作物对水分和养分的需求。

我国耕地面积约为 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,截至2013年年底,全国耕地有效灌溉面积为 $6.3473 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,占全国耕地面积的52.9%,其中喷、滴灌面积 $6.847 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[11]</sup>,仅占有效灌溉面积的10.8%,可见我国大部分灌溉耕地采用耗水量大的传统灌溉方法。美国的有效灌溉面积为 $2.5533 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,但是喷灌和滴灌面积占54.4%左右,欧洲主要国家的喷灌和滴灌面积占有效灌溉面积的比例都达到了80%以上<sup>[12]</sup>,我国在滴灌技术的应用和推广与发达国家相比还有很大差距。

### 2.1 滴灌技术可实现养分的定量供应

化肥利用率低的主要原因是其养分释放速率与作物需求速率不匹配,过量施用化肥,养分流失严重。水肥一体化滴灌技术能够实现向作物供应化肥养分的定量控制,保持土壤中养分浓度在较低的水平,有效抑制养分氮的流失与促使养分磷的固定<sup>[13]</sup>。通过大田实验研究表明,采用水肥一体化滴灌技术可以提高氮、磷、钾化肥的利用率。Kwong等<sup>[14]</sup>研究发现,滴灌条件下甘蔗对氮的利用率可达75%~80%。方剑等<sup>[15]</sup>通过漫灌冲肥的方式对黄瓜施肥,氮肥的利用率只有16.4%,通过滴灌的方式施用氮肥的利用率达到49.3%。郭新正等<sup>[16]</sup>对棉花

进行膜下滴灌显著提高了水和化肥的利用率,其中滴灌施用酸性液体化肥的氮肥利用率为47%~66%,平均为55%。赵玲等<sup>[17]</sup>通过研究发现,壤土和粘土棉田滴灌施用磷肥的利用率分别为32.56%、27.65%,而基施磷肥的利用率分别只有22.32%、20.22%。郭新正等<sup>[16]</sup>研究显示,滴灌磷肥利用率在24%~38%,平均为31%。唐琳<sup>[9]</sup>通过滴灌技术对樱桃番茄施肥,钾肥的利用率为83.38%。尹飞虎等<sup>[18]</sup>对小麦进行常规施肥,钾肥的利用率为51.4%,而滴灌施用钾肥的利用率为54.6%。

由此可见,采用水肥一体化滴灌技术施用氮肥的利用率可达到50%以上,磷肥和钾肥的利用率也显著提高。按照目前我国氮、磷、钾肥的施用量估算,如果将滴灌面积(占有效灌溉面积)从现在的10.8%提高到30%,并采用水肥一体化滴灌技术,能够节约 $2 \times 10^6 \text{ t}$ 氮肥、 $6 \times 10^5 \text{ t}$ 磷肥和 $2 \times 10^5 \text{ t}$ 钾肥,进而节约大量的磷、钾矿产资源。

不同作物在生育期内对氮、磷、钾养分的需求量不同,图1、图2为小麦和油菜在不同的生育阶段对氮、磷、钾的累积需求规律<sup>[19, 20]</sup>。图中显示,作物对养分的需求基本呈现慢、快、慢的“S”型特征,在生长初期,作物对养分的需求量较小,在生殖期和成熟期,作物对养分需求量较大。在同一时期,作物对氮、磷、钾不同养分的需求量也不同。利用水肥一体化滴灌设备结合智能化控制可以按照作物对养分的需求规律,对肥液进行定量配制、输送和供给,使养分的供应量和作物的需求量相匹配。

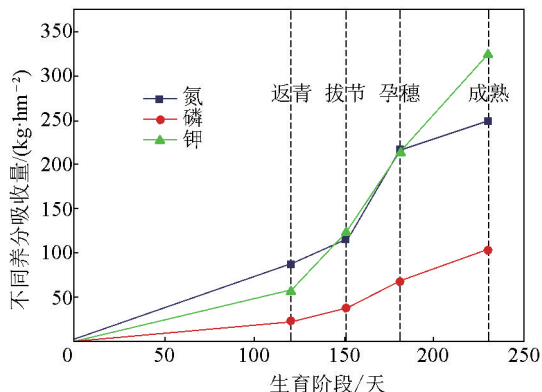


图1 小麦在全生育期对氮、磷、钾的累积吸收曲线<sup>[19]</sup>  
Fig. 1 Accumulative uptake of N, P, K in the whole growth life of wheat<sup>[19]</sup>

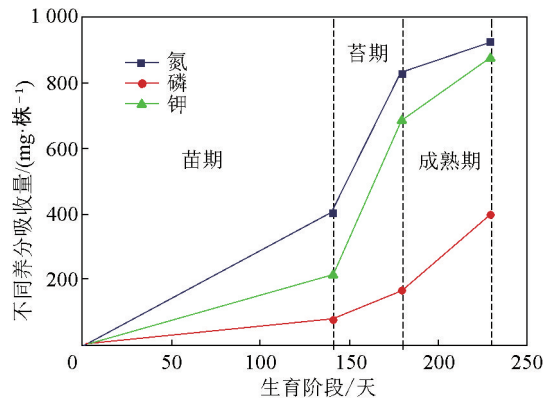


图2 油菜在全生育期对氮、磷、钾的累积吸收曲线<sup>[20]</sup>  
Fig. 2 Accumulative uptake of N, P, K in the whole growth life of cole<sup>[20]</sup>

## 2.2 滴灌技术节约灌溉用水

大田实验结果表明,采用水肥一体化滴灌技术能够提高灌溉用水效率。范文波等<sup>[21]</sup>以棉花为例分析了滴灌技术的应用效果,结果表明,采用滴灌比沟灌平均节水41.92%。韩建会等<sup>[22]</sup>对番茄滴灌和沟灌用水量进行比较,得出滴灌比沟灌节水66.25%。李亮等<sup>[23]</sup>研究了不同灌溉方式下番茄灌溉用水量,滴灌用水量仅为节水沟灌用水量的52.36%。Lamm等<sup>[24]</sup>研究了玉米在不同灌溉方式下的用水量,与沟灌相比,滴灌能够节水50%,通过控制土壤表面水分蒸发以及地下渗透损失,滴灌的用水效率能够达到95%~99%。由此可见,滴灌与目前普遍采用的漫灌、沟灌相比,滴灌用水量仅占漫灌、沟灌用水量的约50%。如果将滴灌面积比例从现在的10.8%提高到30%,可节约农业用水 $4.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,不仅能够填补 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的农业用水缺口,还能够将剩余的 $1.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 水转移到工业用水和生活用水中,缓解用水短缺问题。

此外,我国水稻常年种植面积约为 $3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,约占耕地面积的1/4。水稻膜下滴灌栽培技术通过滴灌、机械直播覆膜等技术与水稻种植相结合,能够在很大程度上改变传统的水田水作的方式,其优势在于全生育期无水层,只是局部灌溉,比水稻传统种植节水60%以上,肥料利用率提高10%以上<sup>[25,26]</sup>。这种种植方式一旦完善推广,将大幅度提高化肥和水的利用率。

## 2.3 滴灌技术提高作物产量

中国人均耕地面积约为 $0.08 \text{ hm}^2$ ,而美国、俄罗斯和英国人均耕地面积分别为 $0.5 \text{ hm}^2$ 、 $0.8 \text{ hm}^2$ 和 $0.1 \text{ hm}^2$ <sup>[27]</sup>。我国耕地面积少,只能通过提高单产保

障粮食安全。自2011年起,我国粮食增产幅度分别是4.5%、3.2%、2.1%、0.9%,通过科技增加粮食单产的压力不断增大<sup>[28]</sup>。水肥一体化滴灌技术由于施肥量少,能有效地防止植株营养生长过快而影响生殖生长<sup>[9]</sup>。文献研究表明,采用水肥一体化滴灌技术能够提高作物产量。Breschini等<sup>[29]</sup>研究表明,在滴灌条件下,通过对灌水量、灌溉频率进行调控,可以提高芹菜的产量和品质。Henggeler等<sup>[30]</sup>通过大田实验结果得出,滴灌与沟灌相比,棉花产量增加20%左右。Phene等<sup>[31, 32]</sup>对滴灌和沟灌进行了多年的田间实验,结果表明,利用滴灌使得甜玉米和西红栢的产量分别比沟灌高14%和20%。周建伟等<sup>[33]</sup>通过大田实验得出,利用滴灌方式使棉花蕾铃脱落率低,具有较强的结铃性和抗旱性,棉花的单铃重和纤维长度均有所提高,与常规灌溉相比增产45.63%。由此可见,在现有耕地面积下采用水肥一体化滴灌技术能够提高作物单产。

## 3 沼肥与滴灌技术相结合

我国畜禽养殖规模很大,每年畜禽粪便产量约为 $2.17 \times 10^9 \text{ t}$ <sup>[34]</sup>,同样,农作物秸秆产量也很大,2008年为 $8.4 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[35]</sup>,养殖业畜禽粪便的排放和秸秆的焚烧会带来环境污染。畜禽粪便和农作物秸秆含有大量的有机质,可以经过微生物发酵制得沼肥和沼液。沼肥中含有大量的有机质和腐殖酸,同时沼液中有丰富的氮、磷、钾、钙、铁、铜等营养元素,以及氨基酸和植物生长激素,能够促进作物生长。徐卫红<sup>[36]</sup>等通过实验得出,向莴笋施用通过人畜粪便和作物秸秆发酵来的沼液使莴笋产量增加21.4%,氨基酸含量增加37.6%。Möller<sup>[37]</sup>等研究表明,施用发酵后的沼液后,可以显著提高作物的吸氮量和产量。沼肥和沼液的滤液是优质的有机肥料,可通过滴灌的方式将肥料施用到田间。陈永明等<sup>[38]</sup>研究了滴灌沼液对茶树的施肥效果,得出滴灌沼液可以保持土壤中铵态氮含量,改善土壤结构,增强土壤微生物活性,有利于提高茶叶产量,与非滴灌区相比,滴灌区茶树对氮磷利用率分别提高了18.12%和8.33%。韩小平等<sup>[39]</sup>通过实验得出滴灌沼液能够促进玉米生长发育,促进有机养分积累,提高玉米产量,滴灌浓度为50%的沼液能够使玉米增产17.6%。因此,将沼肥沼液与水肥一体化滴灌系统相结合,不仅能够促进农作物生长,而且可以改善农村的生态环境,将畜禽粪便和农作物秸秆变废为



宝,节约部分氮、磷、钾商品化肥。

#### 4 工业 CO<sub>2</sub>为作物提供碳源

温室大棚是设施农业的重要组成部分,广泛应用于冬春季节蔬菜培养和花卉栽培。2012年我国温室总面积为 $1.45 \times 10^{10} \text{ m}^2$ <sup>[40]</sup>。碳是作物生长发育必需的营养元素,作物生长碳源主要来源于大气中的CO<sub>2</sub>和土壤中的碳源,大气中CO<sub>2</sub>浓度约为400 ppm(1 ppm= $10^{-6}$ )。研究表明,高浓度CO<sub>2</sub>能够促进作物根系生长,提高作物产量<sup>[41]</sup>。Chen等<sup>[42]</sup>研究报道,提高培养箱中CO<sub>2</sub>浓度能够增加草莓果实数目、果实重量、干物质含量、果实总糖和糖/酸比。白月明等<sup>[43]</sup>研究得出,在CO<sub>2</sub>浓度为500 ppm条件下,籽棉产量比大气条件下对照组增加11.9%,在CO<sub>2</sub>浓度700 ppm条件下,比对照组增加32.3%。孙鹏等<sup>[44]</sup>实验得出,在低温条件下,CO<sub>2</sub>浓度为720 ppm时,草莓植株果实总数提高,且果实尺寸增大,果实产量增加约90%。Deng等<sup>[45]</sup>实验研究表明,在CO<sub>2</sub>浓度为575 ppm的条件下,草莓果实产量增加47%。Ghasemzadeh等<sup>[46]</sup>研究比较了400 ppm和800 ppm两种不同CO<sub>2</sub>浓度下生姜的生长情况,在CO<sub>2</sub>高浓度下光合作用速率更快,碳水化合物含量以及作物产量大幅增加。

2013年我国碳排放量达到 $1 \times 10^{10} \text{ t}$ ,居世界首位。在所有行业中,电力、热力行业排放量最大,占CO<sub>2</sub>排放总量的40.1%<sup>[47]</sup>,主要来源于电力、热力行业中发电厂排放的含有CO<sub>2</sub>的烟道气,将烟道气无害化处理后可以通入到附近的温室大棚中,提高温室大棚中CO<sub>2</sub>浓度,为作物光合作用提供充足的碳源。粗略估算,如果将全国温室大棚( $1.45 \times 10^{10} \text{ m}^2$ )中CO<sub>2</sub>浓度从400 ppm提高至800 ppm,该CO<sub>2</sub>浓度下作物的光合作用吸收CO<sub>2</sub>的速率按 $10.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 计算<sup>[46]</sup>,每年将消耗 $2.022 \times 10^9 \text{ t CO}_2$ ,既能减少CO<sub>2</sub>排放总量的20.2%,又能显著提高作物产量。

#### 5 推广滴灌技术可消化PVC过剩产能

氯碱工业是我国的基础原材料产业,是国民经济的重要组成部分。氯碱工业通过电解盐水制取烧碱、氯气、氢气,其相关下游产品种类众多,氯碱产品产量及经济指标是国民经济统计和考核的重要指标。聚氯乙烯(PVC)作为五大通用塑料之一,其耗氯比例约占全行业氯产量的30%<sup>[48]</sup>,PVC产品包括硬质制品和软质制品,硬质产品占消费结构的

66.2%,软质产品占33.8%。硬质制品主要用途是管材和管件,软质制品主要包括薄膜、片材等。大棚薄膜与滴灌管道和设备的主要材料为PVC。

受全球经济形势影响,目前PVC行业产能过剩严重,2013年中国PVC产能为 $2.476 \times 10^7 \text{ t}$ ,而PVC的表观消费量 $1.555 3 \times 10^7 \text{ t}$ ,过剩量为 $9.207 \times 10^6 \text{ t}$ 。2008—2013年间开工率仅为50%~60%<sup>[49]</sup>。随着设施农业的普及,对PVC软质制品的大棚薄膜和硬质制品的滴灌管道及相关设备的需求将快速增长,进而拉动PVC行业以及上游的氯碱行业。如果滴灌面积比例从现在的10.8%增加到30%,能够增加滴灌面积 $1.218 7 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,以单行管道直线布置,行间距为2.5 m估算<sup>[50]</sup>,每公顷滴灌管用量以4 000 m计,约需 $3.412 \times 10^6 \text{ t}$ 硬质PVC材料,结合设备折旧,仍能较大幅度消化工业中PVC的过剩产能,也有利于解决氯碱行业中的氯元素的供需平衡。

此外,PVC是热塑性塑料,可多次加热软化和固化成型,实现回收再利用。对于废旧的PVC大棚薄膜和滴灌管道经过粉碎制备再生料,重新生产出新的薄膜与管道制品<sup>[51]</sup>。在社会运行上,可通过设备租赁、废旧薄膜和管件回收,既可降低滴灌技术应用成本,又可形成与设施农业相关的新型服务产业。

我国有很多规模化经营的耕地,其中新疆生产建设兵团有 $1.241 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 耕地面积<sup>[52]</sup>,2012年末经营规模在100亩(1亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$ )以上的专业大户270多万户<sup>[53]</sup>,是水肥一体化滴灌技术推广试点的理想基地。

#### 6 结语

水肥一体化滴灌技术是高效集约化设施农业的核心。应用滴灌技术可以根据作物在全生育期对氮、磷、钾的养分需求,实现精确定量供应,显著提高化肥利用率。应用滴灌技术能够提高灌溉用水利用率,滴灌用水量仅为沟灌、漫灌的50%。如果将滴灌面积比例从现在的10.8%推广到30%,并采用水肥一体化滴灌技术,能够节约 $2 \times 10^6 \text{ t}$ 氮肥、 $6 \times 10^5 \text{ t}$ 磷肥和 $2 \times 10^5 \text{ t}$ 钾肥,节约农业用水 $4.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,填补全国 $4 \times 10^{10}$ 的用水缺口。通过滴灌过滤后的沼肥沼液,能够将畜禽粪便和农作物秸秆变废为宝,节约部分氮、磷、钾商品化肥,改善农村生态环境。工业排放的CO<sub>2</sub>经无害化处理后可通入到附近的温室大棚中,提高大棚内CO<sub>2</sub>浓度,为作物提供碳源,减少工业CO<sub>2</sub>的排放,并提高作物产量与品质。水

肥一体化滴灌技术的推广应用能够消化PVC部分过剩产能,有利于解决氯碱行业中的氯元素的供需平衡。通过设备租赁、大棚薄膜和滴灌管线回收的方式,有利于降低滴灌技术的应用成本,并形成完整产业链条,促使工业农业协调发展。

#### 参考文献

- [1] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学,2010,43(19):3997-4007.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴2013[M].北京:中国统计出版社,2014.
- [3] Heffer P, Prud'homme M. Fertilizer outlook 2014-2018 [R]. Sydney: The 82nd IFA Annual Conference, 2014.
- [4] 夏循峰,胡宏.我国肥料的使用现状及新型肥料的发展[J].化工技术与开发,2011,40(11):45-48.
- [5] 国家统计局.第一次全国污染源普查公报[EB/OL].2010-2-11,[2015-1-15].[http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qtjgb/qgqtjgb/201002/t20100211_30641.html).
- [6] 夏军,翟金良,占车生.我国水资源研究与发展的若干思考[J].地球科学进展,2011,26(9):905-915.
- [7] 张乐英.城镇用水量预测方法研究及制定合理水价的探索[D].合肥:合肥工业大学,2004.
- [8] 胡建强.浅谈城市节水措施[J].河北水利,2006(6):35.
- [9] 唐琳.水肥一体化对樱桃番茄产量及肥料利用率的影响研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [10] Benouniche M, Kuper M, Hammani A, et al. Making the user visible: analysing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance[J]. Irrigation Science, 2014: 1-16.
- [11] 中华人民共和国水利部.2013年全国水利发展统计公报[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [12] 谭诚,兰才有,蔡振华.国内外节水灌溉发展趋势探讨[J].农业机械,2008(27):44-45.
- [13] 安迪,杨令,王冠达,等.磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J].化工进展,2013,32(8):1967-1973.
- [14] Kwong K, Deville J. Application of 15N-labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius[J]. Fertilizer Research, 1994, 39(3):223-228.
- [15] 方剑,王春青,徐建东,等.水肥一体化技术对冬暖大棚黄瓜生产的影响[J].河北农业科学,2010,14(5):43-45.
- [16] 郭新正,阿曼古丽,赖波,等.棉花膜下滴灌酸性液体肥料的试验效果[J].土壤肥料,2004(1):19-21.
- [17] 赵玲,侯振安,危常州,等.膜下滴灌棉花氮磷肥料施用效果研究[J].土壤通报,2004,35(3):307-310.
- [18] 尹飞虎,曾胜和,刘瑜,等.滴灌春麦水肥一体化肥效试验研究[J].新疆农业科学,2012,48(12):2299-2303.
- [19] 吴国梁,崔秀珍.高产小麦氮磷钾营养机理和需肥规律研究[J].中国农学通报,2000,16(2):8-11.
- [20] 蔡常被.油菜氮,磷,钾需肥规律初步探讨[J].中国油料,1980(1):25-30.
- [21] 范文波,吴普特,马枫梅.膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例[J].生态学报,2012,32(23):7559-7567.
- [22] 韩建会,徐淑贞.日光温室番茄滴灌节水效果及灌溉制度的评价[J].西南农业大学学报,2003,25(1):77-79.
- [23] 李亮,张玉龙,马玲玲,等.不同灌溉方法对日光温室番茄生长、品质和产量的影响[J].北方园艺,2007,3(2):75-78.
- [24] Lamm F R, Trooien T P. Subsurface drip irrigation for corn production: A review of 10 years of research in Kansas[J]. Irrigation Science, 2003, 22(3-4):195-200.
- [25] 郭庆人,陈林.水稻膜下滴灌栽培技术在我国发展的优势及前景分析[J].中国稻米,2012,18(4):36-39.
- [26] 朱齐超.膜下滴灌水稻养分积累规律及生理响应[D].新疆:石河子大学,2013.
- [27] 雷璟.外媒:中国守护耕地红线将设“永久基本农田”[N/OL].参考消息,2015-1-09[2015-1-17].<http://china.cankaoxiaoxi.com/2015/0109/623260.shtml>.
- [28] 王珊.科技增产越来越难[N/OL].中国科学报,2014-12-16[2015-1-17].<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2014/12/309446.shtml>.
- [29] Breschini S J, Hartz T K. Drip irrigation management affects celery yield and quality[J]. Horticulture Science, 2002, 37(6):894-897.
- [30] Henggler J, Kinnibrugh J, Multer W. Economic impact resulting from the adoption of drip irrigation cotton result demonstration report[R]. College Station: Texas A&M University, 1996.
- [31] Phene C J, Beale O W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(3):430-436.
- [32] Phene C J, Huttmacher R B, Ayars J E, et al. Maximizing water use efficiency with subsurface drip irrigation[J]. Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA), 1992.
- [33] 周建伟,何帅,李杰,等.棉花地下滴灌灌溉效应研究[J].新疆农业科学,2005,42(1):41-44.
- [34] 陈杰,赵祥杰,邴哲师,等.利用微生物处理畜禽粪便的研究[J].安徽农业科学,2014,42(28):9910-9911.
- [35] 毕于运.秸秆资源评价与利用研究[D].北京:中国农业科学院,2010.
- [36] 徐卫红,王正银,王旗,等.不同沼液及用量对茼蒿硝酸盐及营养品质的影响[J].中国沼气,2003,21(2):11-13.
- [37] Möller K, Stinner W. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides) [J]. European Journal of Agronomy, 2009, 30(1):1-16.
- [38] 陈永明,田媛.滴灌沼液对茶园土壤-茶树氮磷含量影响研究[J].环境科学与技术,2012(S1):49-52.
- [39] 韩小平.玉米喷施不同浓度沼液效果试验报告[J].中国沼气,2009,27(3):50-51.
- [40] 中国农业年鉴编辑委员会.中国农业年鉴2012[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [41] Pritchard S G, Amthor J S. Crops and Environmental Change: An Introduction to Effects of Global Warming, Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> Concentrations, and Soil Salinization on Crop Physiology and Yield[M]. Binghamton: Food Products Press, 2005.
- [42] Chen K, Hu G Q, Lenz F. Effect of CO<sub>2</sub> concentration on strawberry. IV. Carbohydrate production and accumulation [J]. Angewandte Botanik, 1997, 71:183-188.
- [43] 白月明,王春乙,温民.不同二氧化碳浓度处理对棉花生长发育和产量形成的影响[J].生态农业研究,1995,2(3):20-25.
- [44] 孙鹏.不同二氧化碳浓度、氮肥施用和温度处理对草莓生长、果实产量和果实品质的影响[D].杭州:浙江师范大学,2012.
- [45] Deng X, Woodward F I. The growth and yield responses of fragaria ananassa to elevated CO<sub>2</sub> and N supply[J]. Annals of Botany, 1998, 81(1):67-71.
- [46] Ghasemzadeh A, Jaafar H Z. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment on synthesis of some primary and secondary metabolites in ginger

- (Zingiber officinale Roscoe)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(2):1101-1114.
- [47] 章 轲. 电力热力行业碳排放或居首[N/OL]. 第一财经日报, 2010-02-23[2015-1-17]. <http://www.yicai.com/news/2010/02/315349.html>.
- [48] 中国氯碱工业协会. 中国烧碱和聚氯乙烯行业发展现状及2009年技术工作重点[J]. 中国氯碱, 2009, 1(1):1-5.
- [49] 张 森. 2013年全球PVC市场回顾及2014年展望[J]. 聚氯乙烯, 2014(6):1.
- [50] 张成心. 低功耗节水灌溉系统的优化设计与应用[D]. 昆明:昆明理工大学, 2014.
- [51] 柯伟席, 王 澜. 废旧PVC塑料的回收利用[J]. 塑料制造, 2009(9):51-56.
- [52] 王学剑, 叶春辉, 王新娥. 新疆兵团耕地资源变化及其驱动力研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(12):2937-2940.
- [53] 顾仲阳. 全国土地流转面积2.7亿亩[N/OL]. 人民日报, 2013-03-05[2015-1-17]. [http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2013-03-05/content\\_8408619.html](http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2013-03-05/content_8408619.html).

# Using drip irrigation of water and fertilizer for synergic development of industry and agriculture

An Di, Wang Tingjie, Jin Yong

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[Abstract]** The low efficiency of fertilizer utilization in China has resulted in severe nonpoint source pollution. Meanwhile, there exists a severe problem of water shortage and large amount of water consumption in agriculture. A way of facility agriculture based on drip irrigation of water and fertilizer technology for high-efficient development of industry and agriculture was proposed. The nutrients and water could be quantitatively fed to crops by using drip irrigation technology, which can increase the utilization efficiency of fertilizer, irrigation efficiency of water and crop yields. Using drip irrigation of filtered biogas slurry could take advantage of livestock manure and crop straw and improve rural ecological environment. The CO<sub>2</sub> discharged from industry could be transported into the greenhouse after harmless treatment which can provide the carbon for crops. The wide application of drip irrigation technology can increase the demand of (poly vinyl chloride) PVC, which can release a part of the over production capacity of PVC and promote the development of chlor-alkali industry. Besides, renting and recycling of drip irrigation equipment can improve the industrial chain. This is an efficient way for the synergic development of industry and agriculture.

**[Key words]** fertilizer; water conservation; utilization efficiency; drip irrigation; PVC