

土壤—作物系统中氮肥利用率的研究进展^①

孙传范 曹卫星 戴廷波

(农业部作物生长调控重点开放实验室 南京 210095)

摘 要 论述了土壤—作物系统中氮肥损失的过程和后果及近年来国内外有关氮肥利用率影响因子的研究结果,并由此提出了提高氮肥利用率的途径和加强我国农业氮肥有效管理的对策。

关键词 氮肥;土壤—作物系统;氮素利用效率;进展

由于氮素营养在现代作物生产系统中的重要作用,氮肥的施用量正逐年增加。近 10 年来,世界氮肥施用量增加了 14.2%。我国是世界化肥氮消费量最大的国家,预计 2000 年氮肥(纯养分)的消费量将达到 2500 万吨。然而,氮肥大量投入的同时,肥料效益降低是普遍的问题。据估测,世界氮肥的平均利用率为 40~60%,我国仅为 30~35%;氮肥过量使用造成的环境压力也愈来愈引人关注^[1~3]。自 20 世纪 70 年代以来人们便广泛开展了有关氮肥利用率的研究工作,近年来围绕作物生产系统高产、优质、低污运转的目标,人们对施入土壤中的肥料氮的行为及其有效管理进行了大量研究,获得了许多有益的结果。

1 氮肥利用率的概念及测定方法

1.1 概念

传统的氮肥利用率(Nitrogen use efficiency, NUE),指作物吸收的肥料氮占所施肥料总氮的百分率。通常的研究中,它仅局限于氮肥施入后的当季利用效率,而不包括其对后季的叠加效益^[4]。目前,国内外评价作物氮肥利用效率的指标有多种,名称也亟待统一和规范。概括起来可分为两类:吸收效率和生产效率。前者如氮回收效率 E_r (单位施氮量被作物吸收的百分比)。后者注意到了氮肥吸收后的物质生产效率及向经济器官(如籽粒)的分配情况,如氮流效率 P ($P = \text{籽粒氮量} / \text{施氮量}$)、氮生产力 NP ($NP = \text{籽粒产量} / \text{施氮量}$)、氮产量效率 NPE (地上部单位氮所生成的生物产量或籽粒产量)、以及氮收获指数 NHI (籽粒氮积累量与植株总氮积累量之比)等。Moll 等(1982)将氮素利用率定义为单位有效氮所生成的籽粒产量(有效氮指土壤氮+肥料氮或仅指肥料氮),后者等同于 NP 。又将氮素利用率进一步分解为吸收效率 UPE (等同于 E_r)和利用效率 UTE (等同于 NPE)。J. I. Ortiz-Monaster R. 等(1996)指出这两种指标的相对重要性受施氮水平影响。另外,也有人将作物产量与氮肥的关系分解为农艺效率 E_a (等同于 NP)和生理效率 E_p (等同于 NPE)两个部分。虽然 E_r 与 NUE 的定义吻合较好,但由于 NP 及 NPE 的简便、可靠性,作者认为通常情况下尤其是对系统水平进行评价时应更多地被采用^[5]。

1.2 测定方法

根据氮肥利用率的定义,测定 NUE 的方法有两种:同位素示踪法及非同位素示踪差值

① 国家自然科学基金资助项目(39670428)部分研究内容

法^[4,6]。在此基础上又派生出区间差值法和导数法。由于氮肥施入土壤的激发效应,差值法测得的值往往大于示踪法。一般认为,在研究肥料氮施入土壤后的行为时,以示踪法较可靠。而当NUE作为衡量施用氮肥后植株体内营养水平提高的指标及确定适宜的施氮量时,用差值法。导数法从吸氮量与施氮量的函数关系求导获得,故求出的NUE比较符合实际,能更好地反映报酬递减率^[7]。

2 农田生态系统中氮肥的损失及后果

在自然界氮的循环过程中,固氮是一个对氮的循环起决定性作用的重要环节。为了满足生产的需要,人们普遍采用工业固氮生产各种以 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 为基础的氮肥。这些氮在施入土壤后在外界环境条件的作用下发生一系列转化、迁移过程。其中大部分为作物和微生物等吸收利用,一部分为土壤固持,还有一部分从土壤中淋失或逸失。

2.1 产量与品质

多年的统计资料表明,虽然氮肥的当季利用率不高,但若将其对后季的叠加效应计算在内,转向作物体内的氮肥仍为主要部分,约占50%左右。氮肥被作物吸收后即在其体内进行分配。其中,向经济器官中分配的比例直接决定了产量,这是长期以来人们集中研究的热点,此处不赘述。值得一提的是,近年来,氮肥的施用与作物品质的关系也愈来愈引人关注。一般认为,当氮素水平在“适量”范围以下时,增施氮肥可以改善农产品品质,当“奢侈消耗”至“毒害”范围时,能降低产品品质。因而其对品质的影响与对产量的影响有相似之处^[8]。据报道,农田中过量的硝态氮引起作物生物学质量(Biological quality)的下降。在蔬菜中,有关硝酸盐的积累与人类健康的问题已引起学术界的重视。因此,应在增加作物产量与改善产品品质并重的原则下进行合理施肥。

2.2 土壤特性

如前所述,氮肥在土壤中发生一系列的转化除了影响土壤的供氮能力外,还引起其他土壤质量性状的改变。人们发现,过量的化学氮肥的长期单一施用破坏了土壤团粒结构,从而加剧了土壤板结和冲刷。不同形态氮肥的长期不合理使用容易引起土壤的酸碱化^[9]。

2.3 气态氮损失

肥料氮通过反硝化作用和 NH_3 挥发逸出是氮肥损失的主要途径。 NH_3 可经雨溶、吸附及氧化过程很快从大气中消失,而 N_2O 则可在同温层经光化学分解成 NO ,与臭氧进行反应,产生“温室效应”。但也有人指出,肥料导致的氮逸失对温室效应的贡献很小,不足6‰^[10]。

2.4 氮淋失

氮肥以 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 为主要形式的淋失也是肥料氮损失的途径之一。除此之外,以氮肥淋失为重要污染源所导致的水污染问题则尤为引人关注^[2]。近年来,全球范围内的地表水和地下水中的氮污染呈上升趋势。在以地下水为主要水源的我国北方地区进行的抽样调查表明,半数以上的饮用水硝酸盐含量严重超标(50mg/L),其中最高者达300mg/L。氮污染引起的水质的富营养化问题同样引人担忧,调查的20个水域中有85%处于富营养化或潜在富营养化状态。

3 影响氮肥利用率的生态因子

3.1 土壤

凡是影响氮肥转化的土壤因素均可能对 NUE 产生影响,如土壤氮素状况、水分状况、通气状况、温度、酸碱度、有机质含量、阳离子代换量(CEC)、氧化还原状态等。另外,土壤微生物的活动也对 NUE 有重要影响,而上述因子也通过影响土壤微生物的活动对氮肥转运构成间接影响。

显而易见,在决定 NUE 时,土壤氮素状况始终处于主要地位。肥料效应方程表明,在超过作物适宜需求量的情况下,随着施氮水平的增加,NUE 下降,大量的研究结果证实了这一点^[6]。虽然一般认为在理想的条件下等氮等效,但不同氮肥形态在不同土壤中损失情况不同。例如,在水田中,硝态氮的损失显著高于铵态氮。在渗滤性强的旱地土壤上增加硝态氮的含量则加剧了淋溶的危险。有机肥料氮的利用率和损失率都低于化肥氮,而通常二者配施的效果明显好于单独施用化学氮肥^[11]。

其次,土壤水分状况与 NUE 关系密切。氮肥的溶解、水解、吸收、残留、淋溶、逸失都与水分直接相关。根据 Benbi(1990)的研究结果,在超过 580mm 最佳值后,水分供应的进一步增加不再提高 NUE。他认为如果已知播种期和土壤储水量及作物生长期内的可能的降雨量,可预测氮肥利用率^[12]。周凌云(1998)的研究表明,两种施肥水平下,在超过适宜含水量时,尿素在 0~100cm 土壤中的残留量随供水量增加而减少;籽粒 NUE 下降^[13]。此外,地下水位的高低也影响了氮的淋溶。在 Borin 和 Lazzaro (1995)对玉米田间氮淋溶的研究中认为将地下水位保持在 1.0~1.3m 是比较理想的^[14]。

某些离子的存在,如钾和锌可增加谷物的 NUE^[15,16];而氯离子、重金属离子等则可能抑制了土壤中的某些微生物的活性而影响氮素形态的转化。由于反硝化作用往往在厌气条件下进行,而硝化作用则是在好气条件下进行,因此,土壤的通气状况影响了上述两个与 NUE 相关的重要转化过程,它有时又直接受水分状况的影响^[17]。Liang 和 Mackenzie (1992)发现温度是反硝化作用的主要限制因子,其次是土壤含水量。土壤 pH 值、有机质、CEC 及氧化还原状况等都与肥料氮发生的一系列生化反应有关。总之,土壤的上述因子是一个相互影响的复杂过程,必须综合考虑。

3.2 作物

同休闲的裸地相比,作物的覆盖与生长能够减少肥料氮从土壤表面的气态挥发和从根际的淋溶,而生长良好的植株能更有效地利用氮肥^[18]。不难得知,作物在不同的生长发育阶段的 NUE 不同。如苗期作物生长量小,需氮不多;在营养生长和生殖生长旺盛时期需吸收大量氮素;到了生长后期,作物主要通过体内养分再动员来满足器官对养分的需求,对外部施肥不敏感。因此,生产上往往根据作物不同时期的需肥特点确定适宜的施氮量以提高 NUE。另外,不同作物的 NUE 不同。研究发现,C4 作物比 C3 作物具有较高的 NUE^[19]。在各种条件下的试验中均测得 C4 植物比 C3 植物能更有效地利用叶绿素、可溶蛋白、1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶和磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶来进行生物合成和碳同化。二者 NUE 的差异与其光合途径有关,但其内在的作用机理仍需进一步的探索。玉米被认为是提高 NUE 最有潜力的作物之一。同种作物内不同基因型间 NUE 也有差异^[20,21],如水稻,小麦。

3.3 其它

由于 NUE 受气候的影响,同一地点不同季节或不同年际间测得的结果变异很大^[22];相同年份在不同气候生态区进行的同步试验中,处于亚热带的中国云南地区的水稻的 NUE 高于热带的菲律宾地区^[23]。降雨量的增加易导致淋溶和径流。气温和风则可影响氮的气

态损失。一定条件下测得光照强度也影响氮肥的气态损失,如较弱的光照下植株 N_2O 释放的通量较高^[24]。由于地形条件影响 NUE, Fiez 等建议根据坡顶与坡脚及坡向等位置的不同施用氮肥以提高冬小麦的 NUE^[25]。研究还发现, NUE 在遮荫的条件下降低,可能与小气候的形成有关。另外,加强田间的杂草管理可提高 NUE^[26]。在保持耕作体系中土壤的理化性状和生物环境与传统耕作不同,该体系更有利于氮的固定、反硝化和淋溶过程而有利于氮的矿化和硝化过程,因此氮肥对作物的有效性降低。但也有研究认为该条件下的 NUE 由于土壤中的 NO_3^- 淋溶减少而得以加强^[27]。

4 提高氮肥利用率的途径

根据氮肥损失的机理与途径,生产上提高 NUE 的措施应包括氮肥管理的改善与肥料本身的改进两个方面^[6]。

4.1 生产管理与合理施肥

4.1.1 肥水调控及施肥技术 由于肥水是土壤中氮运转及作物氮吸收过程中的关键因子,肥水的调控至关重要。生产上应把握适宜的施氮量和供水量,并根据不同作物不同生长阶段的需求特点进行综合运筹。如施肥后即进行适宜灌溉或雨前表施可提高 NUE。在水稻田中“无水层混施法”和“以水带氮法”等基、追肥施用法,可使利用率平均提高 12%。旱地小麦田中将含水量调整在促进作物生长与减少氮淋溶的适宜范围可明显提高 NUE。一般认为,不同时期分次进行施肥的 NUE 要高于一次性地施用基肥^[28]。

有机肥与无机肥配施、氮肥与磷、钾肥等配施均可提高 NUE^[29]。近年来,土壤测试和植物营养诊断的推荐施肥技术体系的发展日臻完善^[30]。朱兆良等认为,肥料的适当深施,特别是粒肥深施,是目前提出的减少氮素损失、提高利用率的最有效且较稳定的一种方法^[31]。但也有人认为深施较撒施显著增加了氮的淋溶量从而使肥效降低,这可能与不同的土壤类型和肥料品种有关。近年来,通过减少化肥氮的施用以提高利用率和减少污染在某些地区呼声很高,国外甚至还出现了不施用化肥氮的“有机农业”、“生态农业”。应当指出,相关施肥技术体系的建立必须与当地的生产水平和环境条件等具体情况相结合才可能发挥其最大的经济效益和生态效益。

4.1.2 耕作制度 根据不同生态区的特点调整作物的种类与布局,进行合理的间、套、轮作等措施有助于提高 NUE。筛选和利用高产、优质、高效的优良作物品种也属于种植结构调整的范畴。应当重视氮在整个食物链中的循环利用以提高整个生态系统对氮的利用率,如作物的秸秆还田、过腹还田等^[32]。

4.1.3 施肥模型的建立 近年来,精确农业(Precision Agriculture)成为农业领域研究的热点,与此相适应的定量化施肥技术发展很快^[33,34]。该方面的研究可分为 3 个发展阶段:①经验模型阶段,②模拟模型阶段,③智能决策支持系统,国内目前主要集中于第一阶段。关于模拟模型的研究发展也很快,国外在此方面已有成功的例子,如美国的 CERES—WHEAT 模型(包括了小麦管理系统的氮动力学模型)和 WELIN 模型(蔬菜和麦类植物营养氮动力学模型)等。精确农业中的智能决策支持系统的研究在某些发达国家方兴未艾,主要是以地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、遥感技术(RS)和计算机自动控制系统为核心技术,按田间每一具体操作单元精细准确地调整施肥措施,可最大限度地优化氮肥的配置。

4.2 新型肥料的研制

近年来,研制和使用新型肥料以提高 NUE,增加产量和改善品质的工作也是关注的热点之一^[2,35]。如有机、无机复合肥,专性复合肥,复混肥等的施用改善了土壤环境和作物的吸收。在缓释肥/控释肥(Slow release fertilizers/controlled release fertilizers, SRFs/CRFs)的基础上,控效肥料(Controlled availability fertilizers, CAFs)的研制被认为是肥料革新的方向,因为它具有养分释放与作物吸收相同步的功能和满足作物不同生育阶段的需要等优点^[36]。日本研制的长效尿素 MEISTER 可使水稻的 NUE 提高 17%。另外,叶面肥的使用作为辅助手段对提高 NUE 也有效果。有关研究表明,氮肥增效剂如脲酶抑制剂(UI)、硝化抑制剂(NI)等调节了氮肥形态的转化从而提高了 NUE^[37]。将脲酶抑制剂与尿素合成的长效尿素在冬小麦上连续 6 年的应用结果,表明 NUE 可提高 15~20%^[38]。但也有人认为,由于其有效期短,抑制剂只是延缓了氮肥损失而并不减少其损失总量^[31]。尽管如此,近年来增铵营养(Enhanced ammonium nutrition, EAN)这一观念的提出为抑制剂的应用提供了一定的前景^[39]。原因之一是抑制剂的增产效果并不完全在于其减少氮的损失,还有其它的生理机制;二是可以减少硝态氮的淋溶从而减少对环境的污染。

5 结束语

进入 21 世纪,我国仍面临着人口与粮食问题的挑战。勿庸置疑,在有限的耕地上提高粮食的产量仍须加强肥料尤其是氮肥的投入,而在提高产量的同时,氮肥利用效率的提高和减少环境污染等问题也是我们每个农业工作者面临的迫切任务^[40,41]。围绕我国国情,进一步加强我国土壤—作物系统中氮肥有效管理应着重以下对策。

(1)加强作物高效利用氮素的遗传育种工作。目前,我国该方面的研究还很薄弱。应充分利用现有种质资源,积极引进国外优良品种,进行相关目标性状的筛选、改良工作。如通过研究阐明耐肥品种与不耐肥品种二者 NUE 相差较大的内在遗传基础^[42];分子技术和转基因植物的应用等。最终培育出既高产优质,又具有较高氮肥利用率的优良作物新品种。

(2)推出适合我国国情的综合配套施肥理论与技术。现阶段,我国不可能照搬某些发达国家“生态农业”的模式,通过合理施肥的作用以实现粮食增产仍然是我们的主要目标。但是局部地区的氮肥用量的确需要酌减^[41,43,44]。要根据不同地区的特点确定适宜的施肥标准,建立不同类型农区不同类型作物的氮肥优化配置生产管理系统。实践证明,氮肥与有机肥及磷、钾肥等其它肥料配施,作物重要生长期追施及施肥与灌溉相结合等传统措施仍是当前行之有效的施肥制度。有关部门还应向农民加强科学施肥的宣传推广工作。

(3)加速肥料的革新。应加强新型肥料的研制与推广,加强新型肥料生产工艺与成套设备的研究工作,加强肥料质量的监督与管理,为施肥技术的发展提供基本保障。

(4)研究减少环境污染的氮素治理技术。虽然氮肥的淋失在我国肥料氮的损失中所占比例不大,但其引起的环境问题值得注意,因此应加强氮素淋失环节的研究^[1]。注意氮肥在整个食物链及生物圈中的效益^[44],建立优化氮素再循环体系,为整个农业的可持续发展服务。

参 考 文 献

- 1 张国梁,章申.农田氮素淋失研究进展.土壤,1998,30(6):291~297
- 2 张夫道.氮素营养研究中几个热点问题.植物营养与肥科学报,1998,4(4):331~338

- 3 吕殿青,周延安,孙本华.氮肥施用对环境污染影响的研究.植物营养与肥料学报,1998,4(1):8~15
- 4 刘翼浩,陈阜.对氮肥利用效率若干传统观念的质疑.耕作与栽培,1991,(1):33~40,60
- 5 Fotyma E and Fotyma M. Fertilizer Research, 1996, 43(1-3):9~12
- 6 鲁如坤等.土壤-植物营养学原理和施肥.北京:化学工业出版社,1998,112~146
- 7 党萍莉,肖俊璋.氮肥利用率研究方法和探讨.土壤资源的特性与利用.第四届全国青年土壤科学工作者学术会议论文集.中国土壤学会青年工作委员会.北京农业大学出版社,1992,(9):308~312
- 8 林克惠.施肥对农产品品质的影响.云南农业大学学报,1994,11(2):114~119
- 9 张桃林,潘剑君,赵其国.土壤质量研究进展与方向.土壤,1991,23(1):1~7
- 10 Byrnes B H. Fertilizer research, 1990, 26: 209~215
- 11 张夫道.有机和无机氮在土壤-水稻系统中平衡的研究.土壤肥料,1995,(2):1~4
- 12 Benbi, D K. Journal of Agricultural Science, 1990, 115(1):7~10
- 13 周凌云.土壤水分条件对尿素氮去向的影响.植物营养与肥料学报,1998,4(3):237~241
- 14 Borin M and Lazzaro B. Effects of water table management on nitric nitrogen leaching in lysimeters planted with maize. Bericht uber die 5. Lysimetertagung "Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesattigten Zone" am 25. Und 26. April 1996. 1995, 55~60
- 15 江荣风,张起刚.锌对冬小麦生长和氮素利用的影响.北京农业大学学报,1995,21(增刊):77~80
- 16 Johnson J W and Reetz H F. Better Crops with Plant Food. 1995, 79(4):16~17
- 17 Aulakh M S and Singh B. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 1996, 47(3):197~212
- 18 Ranells-N N, Waggoner-M G. Agriculture Ecosystems and Environment, 1997, 65(1):23~32
- 19 何新华,安·奥克斯,李明启.C3和C4禾本科作物的氮素利用效率.植物学通报,1995,12(3):20~27
- 20 张国平,张光恒.小麦氮素利用效率的基因型差异研究.植物营养与肥料学报,1996,2(4):331~336
- 21 Singh U, Ladha J K, Castillo E G, Punzalan G., et al. Field Crops Research, 1998, 58:35~53
- 22 Wander J G N, Schouten E T J and Bemmelenhoeve J M van et al. Publikatie Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Lelystad. 1994, No. 73A, 87~91
- 23 Ying Jifeng, Yang G Q, Zhou N. Field Crops Research, 1998, 57(1):85~93
- 24 于克伟,陈冠雄,杨思河等.几种旱地农作物在农田N₂O释放中的作用及环境因素的影响.应用生态学报,1995,6(4):387~391
- 25 Fiez T E., Pan W L. and Miller B C. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(6):1666~1671
- 26 Sharma A R. Journal of Agricultural Science, 1997, 129(4):409~418
- 27 王小彬, Bailey L D, Grant C A. 保持耕作土壤体系中肥料氮的行为及氮有效管理的探讨.土壤学进展,1995,23(2):1~11
- 28 陈世伟,陈国良.施肥方法对改善肥料氮素运移及肥效的影响.水土保持研究,1996,3(1):179~184
- 29 王恒池,张玉坤.大力应用化肥实行配方施肥是农业生产持续稳定增长的战略性措施.吉林农业科学,1992,(2):54~56
- 30 吴建繁,贾小红.冬小麦氮素调控追肥技术的研究与应用.土壤通报,1998,29(4):168~170
- 31 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素.南京:江苏科学技术出版社,1992,213~249
- 32 陈同斌, Strune S, Kjeller A. 农业废弃物对土壤中N₂O、CO₂释放和土壤氮素转化及pH的影响.中国环境科学,1996,16(3):196~199
- 33 王兴仁,陈新平,张福锁等.施肥模型在我国推荐施肥中的应用.植物营养与肥料学报,1998,4(1):61~74
- 34 黄元坊.土壤-作物系统中氮素行为的定量研究及其前景.见:张福锁,龚元石,李晓林主编.土壤与植物营养研究新动向(第三卷).北京:中国农业出版社,1995,68~81
- 35 任军,闫晓艳.日本施肥现状及发展趋势.土壤肥料,1996,(3):20~22

(下转第97页)

- 20 中国微生物菌种保藏委员会编著. 中国菌种目录. 北京: 轻工业出版社, 1983, 57
- 21 许齐放, 黄秀梨, 陈廷伟. 八株芽孢杆菌菌株的分类及固氮活性的测定. 微生物学通报, 1998, 25(5): 253~258
- 22 顾宗藻等译. E. A 波尔, F. E 克拉克(美)编著. 土壤微生物学与生物化学. 北京: 科学技术文献出版社, 1993, 62~64
- 23 Feng T-Y et al. *Bacillus thuringiensis* Biotechnology and Environmental benefits Vol I. Taipei: Hua Shiang Yuan Publishing Co., 1995, 11~17
- 24 曹林、任改新. 苏云金芽孢杆菌杀虫晶体蛋白 cry 基因研究的现状. 微生物学通报, 1998, 25(1): 49~51
- 25 孙明, 喻子牛. 苏芸金芽孢杆菌中华亚种 CT-43 菌株伴胞晶体蛋白的特征. 微生物学报, 1996, 36(4): 303~306
- 26 Ferreira, J. H. S., F. N. Matthee and A. C. Thomas. Biological control of *Eutypa lata* on grapevine by an antagonistic strain on *Bacillus subtilis*. *Phytopathology*, 1991, 81(3): 283~287
- 27 王雅平等. 枯草芽孢杆菌 A014 菌株防治小麦赤霉病的初步研究. 生物防治通报, 1992, 82(2): 54~57
- 28 胡剑等. 拮抗菌 BS-98 分泌抗菌蛋白的条件及其发酵液特性. 微生物学通报, 1996, 23(6): 326
- 29 邱秀宝等. 嗜碱性芽孢杆菌碱性蛋白酶的研究 III. 酶的性质及应用. 微生物学报, 1990, 30(6): 445~449
- 30 戴玄等. 产高温蛋白酶微生物菌种资源的研究. 微生物学杂志, 1997, 17(3): 25~29
- 31 陈 声编著. 近代工业微生物学(下册). 上海: 上海科学技术出版社, 1982, 1~132
- 32 胡学智等. 高温 α -淀粉酶生产菌种选育的研究. 微生物学报, 1991, 31(4): 267~273
- 33 宋桂经. 碱性纤维素酶及其去污机理. 微生物学通报, 1997, 24(6): 364~367
- 34 解志刚, 刘江秋. 枯草杆菌与活菌制剂. 微生物学杂志, 1996, 16(2): 48~50
- 35 陈梅婷. 微生态制剂—活菌制剂现状. 中国微生态学杂志, 1992, 4(1): 36~40
- 36 陈延祚. 口服非致病性活菌制剂概述. 中国微生态学杂志, 1993, 5(3): 51~59
- 37 齐涵等. 抑菌生的研究总结报告. 中国微生态学杂志, 1991, 3(4): 1~11
- 38 张用梅, 刘娥英, 袁志明. 两株高毒力球形芽孢杆菌的分离. 见: 杀虫微生物(一). 北京: 北京农业大学出版社, 1987, 98~101
- 39 袁志明等. 我国海南省杀蚊球形芽孢菌的分离和分布. 微生物学通报, 1997, 24(4): 203~205
- 40 World Health Organization. TDR/BCV/sphaericus. World Health Organization Geneva. 1985, 3

(上接第 69 页)

- 36 何绪生, 李素霞, 李旭辉等. 控效肥料的研究进展. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(2): 97~106
- 37 唐建阳, 翁伯琦, 何萍等. 提高稻田尿素利用率若干方法与机理探讨. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(3): 242~248
- 38 孙德芳, 霍现英, 车爱萍等. 冬小麦应用长效尿素的增产效果及施用技术. 山东农业科学, 1993, (6): 42~46
- 39 戴廷波, 曹卫星, 李存东. 作物增氮营养的生理效应. 植物生理学通讯, 1998, 34(6): 488~493
- 40 张维理, 林荷, 李家康. 西欧发达国家提高化肥利用率的途径. 土壤肥料, 1998, (5): 3~9
- 41 曹志洪. 科学施肥与我国粮食安全. 土壤, 1998, 30(2): 57~69
- 42 陈振德, 邹琦, 程丙蒿等. 小麦耐肥性本质的探讨. 土壤, 1994, 26(6): 284~288
- 43 陈清, 温贤芳, 郑兴耘等. 适宜的氮素投入与农业的持续发展. 核农学通报, 1996, 17(4): 193~197
- 44 武志杰. 化学肥料与生物圈. 农业环境保护, 1994, 13(6): 279~282