

邱月,张辉.包膜氮肥、保水剂和生物炭在控制农田土壤氮素损失方面的应用综述[J].江苏农业科学,2015,43(10):417-422.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.131

# 包膜氮肥、保水剂和生物炭 在控制农田土壤氮素损失方面的应用综述

邱月,张辉

(上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240)

**摘要:**氮肥中的氮素损失是限制农业生产中肥料利用率的最主要因素,损失的氮素威胁着大气、水、土壤环境安全和人体健康。选取包膜氮肥、保水剂和生物炭 3 种用于控制土壤氮素损失的材料,分析了各自的作用机理、应用情况和存在的问题。结果表明:包膜氮肥利用膜材料阻隔肥料与土壤接触,从而控制养分释放,被应用到包膜上的材料有无机材料、有机聚合物和易降解的生物质材料;保水剂是一种吸水力极强的树脂,通过吸附土壤水分和养分、改变土壤理化性质影响氮的迁移转化,在与肥料结合制成凝胶、混合聚合物和包膜氮肥后能有效减少氮素损失;生物炭富含独特的微孔结构和多种养分,能有效吸附氮素并影响微生物对氮素的转化,其作用机理和效果目前还存在争议。由于这 3 种材料在控制氮素损失方面潜力巨大,文章最后给出了未来发展需要注意的问题。

**关键词:**肥料;氮素损失;包膜氮肥;保水剂;生物炭;农田;土壤氮素损失

**中图分类号:** S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0417-06

自然条件下植物能够吸收和固定的氮素非常有限,氮肥的使用有效提高了作物品质和产量。第 2 次世界大战以后,随着全球人口的快速增长,氮肥施用量也迅速增加。至 2009 年,中国氮肥生产量已达到 3 608 万 t,占全球的 34%,而施用量也达到 3 360 万 t,占全球的 33%<sup>[1]</sup>。施入土壤中的氮一般只能被植物吸收 30%~40%,一半以上的氮素通过多种途径损失到环境中。过多的氮素滞留在土壤中造成土壤酸化,或随地表径流、淋溶水流失引起地下水硝酸盐超标<sup>[2]</sup>、地表水

体富营养化<sup>[3]</sup>;气态的氨、一氧化氮、氧化亚氮进入大气,引起氮素沉降<sup>[4]</sup>、酸雨、温室效应和臭氧层破坏<sup>[5]</sup>。因此,寻求减少土壤氮素损失的有效方法、提高氮素利用率,对于节约农业成本、控制氮素引起的环境污染有着重要的现实意义。

为控制土壤氮素损失,国内外学者研究了多种材料和方法。其中包膜氮肥由于含氮量高、控释效果好受到广泛关注和应用;保水剂具有良好的保水能力,常添加到干旱土壤中用于保持水分,对土壤性质的改变也影响了氮素的迁移转化;生物炭是一种富含微孔和多种养分的生物质材料,近年来被用作土壤改良剂以改善土壤状况,而在控制土壤氮素损失方面还处于起步阶段。通过探讨这几种材料与氮素的作用机理,分析它们各自的研究和应用情况,有利于挖掘它们在氮素损失控制方面的价值,可为减少氮素污染提供有效的方法。

收稿日期:2014-10-23

作者简介:邱月(1991—),女,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事土壤氮素污染控制的研究。E-mail:maria\_qy@163.com。

通信作者:张辉,副教授,主要从事土壤有机污染、痕量金属污染的修复研究。Tel:(021)54748942;E-mail:huizhang@sjtu.edu.cn。

[7]方治军,徐小彪,辜青青,等.江西不同产地南丰蜜橘果实品质分析[J].中国南方果树,2009,38(3):22-23.

[8]李祖章,刘光荣,袁福生,等.南丰蜜橘生产环境状况调查研究[J].江西农业学报,2005,17(1):1-6.

[9]杨芳,徐秋芳.土壤微生物多样性研究进展[J].浙江林业科技,2002(6):40-42,56.

[10]张元龙.微生物学[M].北京:高等教育出版社,1958.

[11]周桔,雷霆.土壤微生物多样性影响因素及研究方法的现状与展望[J].生物多样性,2007,15(3):306-311.

[12]杨海君,肖启明,刘安元.土壤微生物多样性及其作用研究进展[J].南华大学学报:自然科学版,2005,19(4):21-26,31.

[13]刘平辉,芮玉奎.南丰蜜橘果实微量元素和重金属含量研究[J].中国南方果树,2007,36(6):19-20.

[14]杨永华,姚健,华晓梅.农药污染对土壤微生物群落功能多样性的影响[J].微生物学杂志,2000(2):23-25,47.

[15]陈晶,杨海凌,陈向东.自生固氮菌的生态分布及其对农药抗

性的研究[J].氨基酸和生物资源,2009,31(1):19-24.

[16]Hu S J, Chapin F S, Firestone M K, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO<sub>2</sub> [J]. Nature, 2001, 409:188-191.

[17]赵建卿,王冬华.南丰蜜橘施用生物有机肥优质高产试验[J].江西农业科技,2003(4):25-26.

[18]黄钧如,赵令喧,黄立新,等.影响南丰蜜橘品质的主导因素是有机肥料[J].江西园艺,1999(6):3-4.

[19]陈夕军,朱凤,童蕴慧,等.水稻内生联合固氮细菌的分离、种类及对水稻的促生长作用[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2007,28(2):61-64.

[20]程丽娟,薛泉宏,来航线,等.微生物学实验技术[M].西安:世界图书出版公司,1988:15-38.

[21]向万胜,吴金水,肖和艾,等.土壤微生物的分离、提取与纯化研究进展[J].应用生态学报,2003,14(3):453-456.

## 1 包膜氮肥

包膜氮肥利用一种或几种材料包裹肥料颗粒,在肥料与土壤之间形成屏障,借助物理阻隔或包膜材料的某些特殊化学性质,控制肥料的养分释放特性,使其与作物的整个生长发育过程相吻合,从而促进作物对养分的吸收,提高肥料利用率,减少养分损失。

### 1.1 包膜氮肥的作用机制

包膜肥料相当于一个小型的养分储存库,由于膜材料的阻隔,肥料不能直接与土壤接触,削弱了养分在土壤溶液中的溶解以及土壤微生物的作用<sup>[6]</sup>。借助渗透和扩散作用,包膜肥料养分向土壤中的释放过程一般可归结为 2 个阶段<sup>[7-9]</sup>:(1)包膜肥料接触水溶液后,水汽渗透进入膜内,开始溶解肥料,随着膜内压力累积增大,内部逐渐膨胀,内外压差引起肥料向外释放;(2)当膜内压力增加到一定程度时,可能引起外膜破裂,核心的肥料养分就会通过膜表面破裂形成的缝隙和孔洞迅速释放,这一过程称为“崩溃释放”;如果膜的强度能够承受膨胀压力,则驱使养分释放的主要因素是膜内外的压力差和浓度梯度,该过程称为“扩散释放”。实际上包膜肥料在土壤中的养分释放过程受肥料本身特性及外界条件影响,肥料特性包括粒度、膜材料、膜厚度及孔度等;外界条件主要是温度和水分,两者能够影响饱和水汽压的高低<sup>[10]</sup>。在一定范围内,外界环境温度越高、水汽压越大,包膜尿素的养分释放速率越快<sup>[11]</sup>。

### 1.2 包膜氮肥的应用

常用的包膜材料可分为无机物和有机高分子聚合物,无机材料多采用硫磺、钙镁磷等无机矿物。硫的来源广泛,成本较低,且可以作为营养元素添加到土壤中,硫包膜尿素是研究、使用时间最久的无机包膜氮肥;但硫膜硬度小,成膜后表面不平整,常出现裂缝,在土壤中容易破裂造成养分提前释放,降低了缓释效果<sup>[12]</sup>。聚合物包膜相对于硫而言具有较高的稳定性。分别用 2 种材料制成的包膜氮肥,经多种试验验证,与施普通尿素相比都能不同程度地减少  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$  的挥发量以及硝态氮的淋溶量,从而有效抑制了氮素损失<sup>[13-15]</sup>。实际应用中为了弥补硫膜易破损的缺陷,常在硫中添加高分子物质对其进行改性,以增加结构强度和表面均匀性<sup>[12]</sup>,或复合制成双膜包裹尿素。大田试验表明,采用硫磺-树脂双层包膜尿素能显著增加作物体内的氮含量,提高氮肥利用率,并能减少硝态氮在土壤中的积累,防止大量氮素向土壤深层淋溶而损失<sup>[10,16]</sup>。由于聚合物多来源于不易溶的石油提炼产物,制膜时需要使用其他有机溶剂,较高的加工成本使其在实际生产中得不到广泛推广,同时高分子物质在土壤中难被生物降解,存在二次污染的问题<sup>[7]</sup>。因此,寻求低成本、易降解、能有效控制肥料释放的材料显得尤为重要。

地壳中存在着许多具有规则晶体结构的无机矿物,尤其是以沸石、高岭石、蒙脱石、凹凸棒石等为主的铝硅酸盐矿物,有着巨大的比表面积和表面能,晶格之间存在不稳定的可交换性离子,能够从环境中有力地吸附多种污染物<sup>[17-18]</sup>。牟林等采用土壤淋溶和盆栽试验 2 种方法,以复合肥作基质,探讨了滑石粉、蒙脱土、高岭土、硅粉和硅藻土 5 种无机矿物用作膜材料的效果。结果表明,包膜肥料养分释放速率明显低于

普通复合肥,能有效地保持氮素养分较长时间处于铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )形态,减少因转化成硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )而造成的淋溶损失<sup>[19]</sup>。在土壤中施用凹凸棒石包膜尿素<sup>[20]</sup>,或把凹凸棒石作为基质与肥料混合制成高分子包膜氮肥<sup>[21]</sup>,都显著降低了肥料氮素的溶出量。

为了降低膜的成本,同时提高材料的环保性,一些可降解的生物质材料得到了研究关注。淀粉是一种来源于植物的天然高分子聚合物,可完全被生物降解,但淀粉易吸水,单独使用作为包膜材料时在短时间内即可充满水分膨胀,导致养分迅速释放,因此需要添加其他物质降低其亲水性,如加入可降解的天然橡胶<sup>[22]</sup>、聚乙酸乙烯酯<sup>[23]</sup>、聚乳酸<sup>[24]</sup>、聚乙烯醇<sup>[25]</sup>等后,包膜尿素在水中的溶出速率明显降低,完全溶出时间变长。Fernández-Pérez 等利用硫酸盐木质素与尿素的混合物作基质,用乙基纤维素包膜,与普通尿素相比,溶出 90% 的氮素时间由 0.5 h 提高到了 48 h 以上<sup>[26]</sup>。还有研究发现,竹炭包膜<sup>[27]</sup>和植物油脂<sup>[28]</sup>包膜,在淋溶试验中也能降低尿素氮肥的养分溶出率。

### 1.3 存在的问题

包膜氮肥在农业生产中的推广,受到高成本和环境污染问题的限制。一些新型环保材料虽然价廉易得、绿色环保,但缓释效果缺乏以土壤为介质的试验验证。包膜氮肥的施用效果极易受到外界条件干扰,一旦水分、温度、土壤生物活性等发生改变,将直接影响肥料效率。关于包膜氮肥的释放行为不应停留在定性上,建立不同作物和土壤条件下的氮素释放动力学模型,将有助于更好地控制养分释放、减少氮素损失。

## 2 保水剂

保水剂是一种亲水的交联聚合物,能够吸收大量的水分且维持自身结构不被溶解或破坏,在受到一定的压力时也能保持吸收的水分<sup>[29]</sup>。通常人们关注的是保水剂在旱地的保水作用,但实际上这种对土壤水分的保持作用也有助于减少肥料养分的流失<sup>[30]</sup>。

### 2.1 保水剂的作用机理

保水剂减少氮素损失的机理,可分为直接、间接 2 个方面。直接作用是指保水剂对水分和养分的吸附,保水剂的吸水性能减少土壤水分挥发和流动性损失,降低灌溉频率,抑制肥料氮素随水流失<sup>[31-32]</sup>。另外,保水剂内部呈交联的网状“骨架”结构,布满了大小不一的孔洞,吸水的同时可让一些小分子或离子如  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  扩散进入,暂时被溶胀的保水剂分子包裹起来,也可通过静电引力、范德华力、离子交换、离子吸附、螯合等机制暂时固定下来,从而延缓养分的释放<sup>[33]</sup>。

间接作用通过保水剂对土壤理化性质的影响表现出来:(1)保水剂分子表面的静电作用或黏结性促进土壤团聚体的形成,增大土壤孔隙度<sup>[34-35]</sup>,为土壤氮素等养分提供暂时的贮存场所,减少了肥料的深层渗漏;(2)保水剂能降低土壤渗透性,有效阻止水分向深层渗漏<sup>[36]</sup>,对于不能被土壤胶体所吸附而只能在土壤溶液和孔隙中流动的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,改善土壤结构和渗透性能显著降低其淋溶损失<sup>[37]</sup>;(3)保水剂吸收大量水分,降低了土壤水压,即使在干旱条件下水分释放也很缓慢,从而降低了水分蒸发频率,减少了气态氮的挥发损失<sup>[38]</sup>;

(4) 保水剂的施用增强了土壤脲酶活性<sup>[31]</sup>, 有利于氮肥中的尿素高效转化为铵态氮, 可促进植物对氮素的吸收, 提高氮肥利用率; (5) 保水剂在植物根部土壤形成了富集水分和养分的水肥耦合区域, 改变了作物根系生长发育的形态特征和生理机能, 增强了根系对水肥的吸收能力, 从而提升了肥料利用效率, 减少了养分损失<sup>[39]</sup>。

## 2.2 保水剂的应用

2.2.1 保水剂的种类 按照保水剂的化学组成, 一般可将其分为 3 类: (1) 高分子聚丙烯酸(盐)类保水剂, 常见的有淀粉-聚丙烯酸接枝共聚物、聚丙烯酸钠盐和聚丙烯酰胺类等, 以聚合物为主要构成成分, 成本较高; (2) 有机-无机复合类保水剂, 添加无机矿物以提高保水剂的吸水率、耐盐碱性和对养分离子的吸附<sup>[34-35]</sup>; (3) 多功能类保水剂, 如添加麦秆、腐殖酸、纤维素等易降解的生物质材料。复合保水剂成本低、环保, 更利于在实际生产中推广。

2.2.2 保水剂与氮肥的复合方式 直接将固体保水剂颗粒与肥料、土壤混合均匀施入, 或溶于水配成一定含量的溶液施于土壤<sup>[40-41]</sup>, 不但增加农田作业次数和成本, 而且用量少时肥料不能与保水剂充分接触, 很难发挥两者之间的相互作用, 从而影响保水剂使用效果。可通过溶解成水凝胶、混合聚合或包膜等方式, 实现保水剂与肥料的复合。

将干燥的保水剂浸入氮肥溶液中, 让其充分吸水膨胀, 过滤、干燥即制得以保水剂作为载体的缓释氮肥。用该方式制备保水剂-尿素水凝胶时, 保水剂负载的尿素量与尿素溶液浓度有关<sup>[42]</sup>, 浓度越高, 越多的尿素分子就会进入保水剂内部网状结构, 干燥过程中水分挥发而尿素被固定下来。施入土壤后, 保水剂先吸水膨胀成水凝胶, 尿素溶解, 随保水剂内部水分与土壤溶液之间的动态交换缓慢释放。Liang 等制备的小麦秸秆-聚丙烯酸保水剂<sup>[43]</sup>、覃莉莉等制备的玉米秸秆-聚丙烯酰胺复合保水剂<sup>[44]</sup>, 它们的尿素吸附凝胶都明显降低了尿素在土壤中的释放速率。Zheng 等认为, 水凝胶的尺寸和交联度会影响尿素释放速率: 凝胶尺寸越小, 表面积越大; 水与凝胶的接触界面越广, 尿素释放更快; 交联度越高, 凝胶内部的分子链能阻止尿素大量溶出, 释放速率越低<sup>[45]</sup>。水凝胶制备工艺简单, 受到凝胶的电荷属性及吸附量制约, 养分浓度偏低。

利用聚合反应直接把肥料包埋在聚合物基质中或与聚合物单体共聚成一体, 也能实现肥料与保水剂的复合。Rahman 等通过共价聚合反应, 在过硫酸钾作引发剂合成的聚丙烯酸基质中加入尿素, 得到了含氮量 24.76% 的聚合尿素<sup>[46]</sup>, 在种有辣椒的土壤中施用 10 d 后, 土壤含氮量明显高于普通尿素组, 并随时间缓慢降低, 至种植期结束仍可检测到部分残留氮, 而普通尿素组的土壤氮含量短时间内迅速降低并接近于 0。用丙烯酸和  $N,N'$ -亚甲基双丙烯酰胺作聚合基质, Guo 等添加羧甲基淀粉、尿素<sup>[47]</sup>, Teodorescu 等用液态氮肥进行自由基共聚反应, 分别制得的复合氮肥<sup>[48]</sup>在土壤中都表现出了氮素缓释性能。在丙烯酸、丙烯酰胺的基质中添加蒙脱土, 无机矿物晶层形成的曲折孔洞能进一步改善复合肥内部的孔隙结构, 阻止肥料向外扩散<sup>[49]</sup>。聚合反应能使肥料更牢固地与基质结合, 但也有可能影响肥料性质, 比如尿素可能在聚合加热过程中转化成缩二脲, 对作物产生危害<sup>[43]</sup>。

保水剂作为包膜氮肥的膜材料使用, 能保证较高的肥料含量, 且有利于保持保水剂完整的内部结构和保水性能。包膜的方式分为保水剂单层包膜和复式包膜, 对于高吸水性树脂单层包膜氮肥, 主要靠吸水溶胀后对养分的“包裹”和吸附作用起到缓释效果<sup>[50]</sup>, 复式包膜中的内膜往往黏结性好, 附着在肥料表面阻碍水分向内部扩散, 防止养分大量溶出<sup>[51]</sup>。肖强等用水基成膜法制备的丙烯酸酯类包膜氮磷钾肥, 表面光滑、厚实、均一, 在土柱淋洗试验中与施用普通氮磷钾肥相比, 氮素累积溶出率达到 50% 所需要的时间延长了 37 d, 在 80 ~ 160 cm 土层剖面的硝态氮含量明显低于对照, 作物对氮素的利用率提高了 20.3%<sup>[52]</sup>。宋阳等在聚丙烯酸钾中添加凹凸棒石, 其上的羟基在接枝共聚反应中起类似交联剂的作用, 增加了保水剂的交联度, 提高了材料的吸水倍率并降低了  $\text{NH}_4^+$  的渗透速率<sup>[53]</sup>。为提高保水剂包膜氮肥的环保性, Wu 等研究了多种生物质材料作内膜, 保水剂作外膜的双包膜氮肥, 这些材料包括壳聚糖<sup>[54]</sup>、海藻酸钠<sup>[51]</sup>、乙基纤维素<sup>[55]</sup>、麦秆<sup>[56]</sup>等, 在土壤中都表现出了良好的氮素缓释性能。

## 2.3 存在的问题

保水剂是一种新型缓控释肥材料, 既能保水又能保肥, 因此针对不同的作物和农业环境, 需要取得养分含量、释放性能和保水指标之间的平衡, 避免顾此失彼。保水剂施入土壤后可反复吸水, 如果用量不当, 在土壤中过度积累, 长期可能产生负面影响。目前实际应用的保水剂种类十分有限, 主要是丙烯酸盐类, 加强具有缓释作用的新型保水材料的开发十分必要。此外, 保水剂的耐盐碱性有待提高。

## 3 生物炭

生物炭是在低氧或缺氧条件下, 将植物秸秆、禽畜粪便、污泥等有机物质经高温裂解形成的富含碳、高度芳香化、稳定的有机物质。生物炭能为土壤输入养分, 其多孔特性和表面积能改变土壤容重、孔隙度、水分、团聚体、pH 值、阳离子交换量等理化性质<sup>[57]</sup>, 还可吸附土壤中的重金属、农药、有机污染物等<sup>[58]</sup>, 因此常用作土壤改良剂添加使用。Lehmann 等提出, 在土壤中施用生物炭还能减少土壤氮素损失、提高氮肥利用率<sup>[59]</sup>。

### 3.1 生物炭的作用机理

生物炭对土壤氮素的保持主要靠 3 个方面作用: 保持土壤水分以减少淋失、对氮素的吸附和对土壤微生物的影响。

生物炭丰富的微孔结构, 可显著提高土壤的孔隙率和比表面积, 促进团聚体形成, 改善土壤渗透性、水分的停留时间和渗透路径<sup>[60]</sup>。与其他土壤有机质相比, 生物炭有着更强的吸湿能力, 能吸附更多的水分, 提高土壤持水能力<sup>[61]</sup>。研究表明, 在旱地土壤和黄壤中施用适量的生物炭, 能减少淋出液体积, 从而间接减少养分损失<sup>[62-63]</sup>。

生物炭对  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NH}_4^+$  有着较强的吸附作用, 对  $\text{NO}_3^-$  吸附能力有限, 这是由生物炭多孔结构以外的理化特性决定的。生物炭表面的羧基等酸性有氧官能团与碱性的  $\text{NH}_3$  结合, 形成酰胺类化合物<sup>[64]</sup>。在裂解过程中生成的丰富官能团能增加土壤阳离子交换量, 通过离子交换吸附  $\text{NH}_4^+$ <sup>[65]</sup>; 同时, 生物炭表面大多呈负电, 更易吸附带相反电荷的  $\text{NH}_4^+$ <sup>[66]</sup>。不同的原料和裂解方法制得的生物炭性质不同, 对氮素的吸附

特性也有差异。

关于生物炭对土壤微生物的作用,研究结论并不统一,主要是受到生物炭和土壤类型的影响。对氮素转化的影响集中在 3 点:(1)呈碱性的生物炭引起土壤 pH 值升高,多微孔结构改善了土壤透气性,从而抑制反硝化作用产生  $N_2O$ ,减少温室气体排放<sup>[67-68]</sup>;(2)影响氮素矿化,Knowles 等认为,生物炭通过抑制有机氮矿化成  $NH_4^+$  和  $NO_3^-$ ,减少了氮素淋失<sup>[69]</sup>;而 Nelissen 等研究表明,生物炭加入土壤后有机氮的矿化作用增强<sup>[70]</sup>;(3)生物炭在土壤中形成的微孔为微生物的栖息和繁殖提供了“庇护”场所,削弱种群之间的竞争,且生物炭吸附的养分可供微生物利用,一定条件下能提高微生物数量和活性,增加固氮量<sup>[71]</sup>。

### 3.2 生物炭的应用

生物炭在农业上的应用有 2 种模式:作为土壤改良剂添加和制成炭基缓释肥。作为土壤改良剂施用生物炭时,可以降低氮素淋失。高德才等以玉米秸秆生物炭和尿素为材料进行土柱模拟试验发现,适量施用生物炭可显著降低总氮、 $NH_4^+$  和  $NO_3^-$  的淋失<sup>[62]</sup>;周志红等在黑钙土和紫色土中进行的淋洗试验表明,生物炭能大幅降低有机氮和硝态氮的淋失,但较低的施用量会促进氮的淋失<sup>[72]</sup>。污泥中含有的丰富营养成分常被用来改良土壤,但其养分流失也是农业面源污染和地下水污染的来源之一。Knowles 等研究表明,用生物炭、污泥作土壤添加剂比单独使用污泥改良土壤造成的  $NO_3^- - N$  淋失大幅降低<sup>[69]</sup>。生物炭还能提高作物对氮素的利用率,降低氮素在土壤中的累积率,提高氮在土壤中的生物有效性,促进作物对氮的吸收<sup>[73]</sup>。生物炭的施用在一定条件下可减缓  $N_2O$  的产生,这对控制温室效应有着重要意义。Nelissen 等发现,使用尿素和  $KNO_3$  作氮肥时,生物炭可降低 52% ~ 84% 的  $N_2O$  和 47% ~ 67% 的  $NO$  累积释放量<sup>[67]</sup>,可能的原因有生物炭促进  $NH_3$  挥发、氮的生物固定,以及对氮的吸附、pH 值的影响等。Saarnio 等则发现,生物炭作用下  $N_2O$  释放规律受土壤水分和作物的影响,湿润条件更有利于  $N_2O$  的产生,作物对氮的吸收能有效减弱  $N_2O$  的排放<sup>[74]</sup>。

国内一些学者研究了生物炭结合氮肥制备的炭基肥对作物和土壤养分的影响。陈琳等利用小麦秸秆制备的炭基肥与普通复合肥相比发现,该基肥提高了作物氮肥利用率,减少了肥料投入,有助于从根本上抑制氮素损失<sup>[75-76]</sup>;研究还发现,施用炭基肥对作物吸收氮素的影响表现为前期抑制、后期促进,这表明炭基肥对氮素具有缓释效果。刘小虎等施用炭基缓释花生专用肥,与普通氮磷钾相比铵态氮、硝态氮含量分别提高了 4.8%、13.0%,花生增产明显<sup>[77]</sup>,表明炭基肥能促进作物对氮素的吸收。

### 3.3 存在的问题

生物炭作为土壤改良剂已有很多研究报道,而在抑制土壤氮素损失方面还是一种新材料,它的作用机理目前还不够明确,许多室内模拟试验和田间种植试验结果相矛盾,不同种类的生物炭作用效果之间差异很大,因此深入了解生物炭特性与抑制氮素之间的关系应成为其实际应用的理论支撑和当前研究重点。对氮素的作用效果因生物炭类型、施用量、土壤环境、作物和肥料种类的不同而表现出较大差异,要具体情况具体分析,不能以一概全。另外,生物炭在生产过程中可能会

产生一些有毒有害物质,如活性污泥,还使家禽粪便中含有重金属,一些木质材料在高温下易降解产生多环芳烃等致癌物质,它们施入土壤后对土壤污染和人体健康造成的危害不可忽视;即使不含有害物质,生物炭在土壤中长期存留的影响也有待研究。

生物炭的使用应是废物利用的一种方式,它的开发利用应始终遵循这一原则。一些学者在研究中使用云杉、银杉等稀有树种作为原料<sup>[67]</sup>,不仅不利于发挥生物炭的环境效益和经济效益,还可能危害生态环境。作物秸秆、果壳、蔗渣等农林废弃物是生产生物炭的良好材料,我国每年仅作物秸秆可达 8 亿  $t$ <sup>[78]</sup>,但利用率较低,生物炭的生产还处于起步阶段。

## 4 展望

新型材料的开发与利用为减少氮素损失提供了有效的解决方法,包膜缓释氮肥从 20 世纪末开始就得到了广泛的关注和研究,近年来不断有新的成分被开发和应用到包膜技术上;保水剂和生物炭用于控制氮素损失的研究还处于初步阶段,今后的发展应注意以下几点:

(1)寻求材料特性与控制氮素损失效果之间的关系作为应用推广的理论支撑。氮素在土壤中的迁移转化过程十分复杂,受到土壤理化环境、微生物和农田作业方式的影响,材料的种类和制备方法也是千差万别,但实际生产中不可能面面俱到,这些材料用于实际农业生产时的作用规律可能会与研究结果发生冲突,因此建立材料特性与其作用效果之间的机制,有利于提高生产效率,并根据不同的作物和农业环境选择合适的材料,在保证作物正常生长条件下有效减少氮素损失。

(2)关注材料对土壤环境的长期影响。目前的研究集中在室内试验和短期的田间试验,虽然能在一定程度上削弱氮素损失,但长期对土壤环境造成的影响未知。包膜氮肥和保水剂中的高分子材料在土壤中的持留时间、添加的环保生物质对土壤养分结构的改变、高稳定性的生物炭长期施用对土壤理化性质的影响都需要进一步探讨。

(3)促进材料应用的产业化、规范化。包膜氮肥的商品化生产,在日本和一些欧美发达国家已经实现,而关于保水剂和生物炭对氮素的影响机制研究还不统一,难以建立规范的生产标准。以特定的作物作为保氮材料产业化发展的出发点,有利于整合资源、集中攻克难点,尽快实现从研究向实践的推广。

### 参考文献:

- [1] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [2] Roy R, Blair F A, Blair G J. Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management[R]. Rome:FAO,2006.
- [3] Ansari A A, Gill S S, Khan F A. Eutrophication: causes, consequences and control[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2011: 66-72.
- [4] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands[J]. Nature, 2008, 451(7179):712-715.
- [5] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide ( $N_2O$ ):

- the dominant ozone – depleting substance emitted in the 21st century [J]. *Science*, 2009, 326(5949): 123 – 125.
- [6] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氮挥发和氮淋溶的效果研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 49 – 52.
  - [7] Azeem B, KuShaari K Z, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181: 11 – 21.
  - [8] Wu L, Liu M Z. Preparation and properties of chitosan – coated NPK compound fertilizer with controlled – release and water – retention [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 72(2): 240 – 247.
  - [9] 孙红帅. 微水溶性胶结包膜肥料在褐土上的氮素溶出转化机制及生物效应研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.
  - [10] 陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 918 – 923.
  - [11] 李红光. 包裹型控释肥的养分释放特征及其在主要农作物上的肥效研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
  - [12] Liu Y H, Wang T J, Qin L, et al. Urea particle coating for controlled release by using DCPD modified sulfur [J]. *Powder Technology*, 2008, 183(1): 88 – 93.
  - [13] 邹洪涛, 高艺伟, 韩艳玉, 等. 包膜尿素对水田土壤排放  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  影响的研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1940 – 1944.
  - [14] Hyatt C R, Venterea R T, Rosen C J, et al. Polymer – coated urea maintains potato yields and reduces nitrous oxide emissions in a Minnesota loamy sand [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2): 419 – 428.
  - [15] Wilson M L, Rosen C J, Moncrief J F. Effects of polymer – coated urea on nitrate leaching and nitrogen uptake by potato [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(2): 492 – 499.
  - [16] 董 亮, 张玉凤, 于淑芳, 等. 包膜尿素减量施用对大白菜产量品质及土壤硝酸盐含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2): 316 – 321.
  - [17] Okiel K, El – Sayed M, El – Kady M Y. Treatment of oil – water emulsions by adsorption onto activated carbon, bentonite and deposited Carbon [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2011, 20(2): 9 – 15.
  - [18] Huang H M, Xiao D A, Pang R, et al. Simultaneous removal of nutrients from simulated swine wastewater by adsorption of modified zeolite combined with struvite crystallization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 256(0): 431 – 438.
  - [19] 牟 林, 韩晓日, 于成广, 等. 不同无机矿物应用于包膜复合肥的氮素释放特征及其评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1179 – 1188.
  - [20] 刘学周, 蔺海明, 王 蒂, 等. 坡缕石包膜对尿素氮行为的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 443 – 447.
  - [21] Ni B, Liu M, Lü S, et al. Environmentally friendly slow – release nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(18): 10169 – 10175.
  - [22] Riyajan S A, Sasithornonti Y, Phinyocheep P. Green natural rubber – *g* – modified starch for controlling urea release [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89(1): 251 – 258.
  - [23] Niu Y S, Li H C. Controlled release of urea encapsulated by starch – *g* – poly (vinyl acetate) [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(38): 12173 – 12177.
  - [24] Chen L, Xie Z G, Zhuang X L, et al. Controlled release of urea encapsulated by starch – *g* – poly (*L* – lactide) [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 72(2): 342 – 348.
  - [25] Han X Z, Chen S S, Hu X. Controlled – release fertilizer encapsulated by starch/polyvinyl alcohol coating [J]. *Desalination*, 2009, 240(1/2/3): 21 – 26.
  - [26] Fernández – Pérez M, Garrido – Herrera F J, González – Pradas E, et al. Lignin and ethylcellulose as polymers in controlled release formulations of urea [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108(6): 3796 – 3803.
  - [27] 纪锐琳, 朱义年, 佟小微, 等. 竹炭包膜尿素氮释放特性的影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 654 – 659.
  - [28] 杜加银, 茹 美, 田 莉, 等. 植物油脂包膜尿素的氮素释放及其对黑麦草养分吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 102 – 106.
  - [29] Kabiri K, Omidian H, Zohuriaan – Mehr M J, et al. Superabsorbent hydrogel composites and nanocomposites: a review [J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(2): 277 – 289.
  - [30] 李世坤, 毛小云, 廖宗文. 复合保水剂的水肥调控模拟及其肥效研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 112 – 116.
  - [31] 黄 震, 黄占斌, 李文颖, 等. 不同保水剂对土壤水分和氮素保持的比较研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 245 – 249.
  - [32] 廖人宽, 杨培岭, 任树梅. 高吸水树脂保水剂提高肥效及减少农业面源污染[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 1 – 10.
  - [33] Kazanskii K S, Dubrovskii S A. Chemistry and physics of water – storing agricultural polyacrylamides [J]. *Journal of Science and Food Agriculture*, 1992, 36: 789 – 793.
  - [34] 刘瑞凤, 张俊平, 郑 欣, 等. PAM – atta 复合保水剂对土壤物理性质的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(1): 86 – 91.
  - [35] Zhang R B, Qiu Z X, Qiu H X, et al. Frontal polymerization of superabsorbent nanocomposites based on montmorillonite and polyacrylic acid with enhanced soil properties [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(3): 39825.
  - [36] 李 兴, 蒋 进, 宋春武, 等. 不同粒径保水剂吸水特性及其对土壤物理性能的影响[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 609 – 614.
  - [37] Islam M R, Mao S, Xue X, et al. A lysimeter study of nitrate leaching, optimum fertilisation rate and growth responses of corn (*Zea mays* L.) following soil amendment with water – saving super – absorbent polymer [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(11): 1990 – 1997.
  - [38] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂对氮肥挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1296 – 1301.
  - [39] Zhou B, Liao R K, Li Y K, et al. Water – absorption characteristics of organic – inorganic composite superabsorbent polymers and its effect on summer maize root growth [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126(2): 423 – 435.
  - [40] 庄文化, 吴普特, 冯 浩, 等. 土壤中施用聚丙烯酸钠保水剂对冬小麦生长及产量影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 37 – 41.
  - [41] 张富仓, 李继成, 雷 艳, 等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(1): 120 – 128.
  - [42] Karadağ E, Üzümlü Ö B, Saraydin D, et al. Dynamic swelling behavior of  $\gamma$  – radiation induced polyelectrolyte poly (AAm – *co* – CA) hydrogels in urea solutions [J]. *International Journal of Pharmaceu-*

- tics, 2005, 301(1/2): 102–111.
- [43] Liang R, Yuan H B, Xi G X, et al. Synthesis of wheat straw – *g* – poly( acrylic acid ) superabsorbent composites and release of urea from it [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77(2): 181–187.
  - [44] 覃莉莉, 万涛, 熊磊, 等. 改性玉米秸秆复合高吸水树脂的尿素吸收及缓释性能 [J]. 农业工程学报, 2013(21): 188–193.
  - [45] Zheng T, Liang Y H, Ye S H, et al. Superabsorbent hydrogels as carriers for the controlled – release of urea; Experiments and a mathematical model describing the release rate [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 44–50.
  - [46] Rahman M H, Das B K, Miah M A J, et al. Fixation of urea to polyacrylic acid and nitrogen release behavior of the product ( polyurea ): a comparison with urea and control ( without nitrogen fertilizer ) [J]. Asian Journal of Crop Science, 2009, 1(1): 6–14.
  - [47] Guo M Y, Liu M Z, Hu Z, et al. Preparation and properties of a slow release NP compound fertilizer with superabsorbent and moisture preservation [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96(6): 2132–2138.
  - [48] Teodorescu M, Lungu A, Stanescu P O, et al. Preparation and properties of novel slow – release NPK agrochemical formulations based on poly( acrylic acid ) hydrogels and liquid fertilizers [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(14): 6527–6534.
  - [49] Rashidzadeh A, Olad A. Slow – released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg – *g* – poly( AA – *co* – AAm ) / MMT superabsorbent nanocomposite [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 114: 269–278.
  - [50] 杜建军, 廖宗文, 王新爱, 等. 高吸水性树脂包膜尿素的结构特征及养分控/缓释性能 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1447–1455.
  - [51] Wang Y F, Liu M Z, Ni B L, et al.  $\kappa$  – carrageenan – sodium alginate beads and superabsorbent coated nitrogen fertilizer with slow – release, water – retention, and anticompaction properties [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(3): 1413–1422.
  - [52] 肖强, 王甲辰, 左强, 等. 有机 – 无机复合材料胶结包膜肥料的研制及评价 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 115–120.
  - [53] 宋阳, 吴雪平, 韩效钊, 等. 凹凸棒石/聚丙烯酸钾包膜材料的制备与性能研究 [J]. 化工新型材料, 2011, 39(5): 121–123.
  - [54] Wu L, Liu M. Preparation and properties of a double – coated slow – release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water – retention [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(3): 547–554.
  - [55] Ni B L, Liu M Z, Lü S. Multifunctional slow – release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3): 892–898.
  - [56] Xie L, Liu M, Ni B, et al. Utilization of wheat straw for the preparation of coated controlled – release fertilizer with the function of water retention [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(28): 6921–6928.
  - [57] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68–79.
  - [58] Tang J, Zhu W, Kookana R, et al. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2013, 116(6): 653–659.
  - [59] Lehmann J, Pereira Da Silva J J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343–357.
  - [60] Lehmann J, Joseph S M. Biochar for environmental management: science and technology [M]. London: Earthscan, 2009: 271–287.
  - [61] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333.
  - [62] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率 [J]. 农业工程学报, 2014(6): 54–61.
  - [63] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2483–2488.
  - [64] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N – fertilizer: ammonia capture [J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2): 35–42.
  - [65] Sarkhot D V, Berhe A A, Ghezzehei T A. Impact of biochar enriched with dairy manure effluent on carbon and nitrogen dynamics [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1107–1114.
  - [66] Beesley L, Moreno – Jiménez E, Gomez – Eyles J L, et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3269–3282.
  - [67] Nelissen V, Saha B K, Ruyschaert G, et al. Effect of different biochar and fertilizer types on  $N_2O$  and NO emissions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70(0): 244–255.
  - [68] van Zwieten L, Singh B P, Kimber S, et al. An incubation study investigating the mechanisms that impact  $N_2O$  flux from soil following biochar application [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 191(0): 53–62.
  - [69] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids [J]. The Science of the Total Environment, 2011, 409(17): 3206–3210.
  - [70] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, et al. Maize biochars accelerate short – term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 55(0): 20–27.
  - [71] Rondon M A, Lehmann J, Ramírez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43(6): 699–708.
  - [72] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用 [J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278–284.
  - [73] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. Geoderma, 2013, 206: 32–39.
  - [74] Saarnio S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly affects  $N_2O$  emissions via soil moisture and plant N uptake [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58(0): 99–106.
  - [75] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671–675.
  - [76] 乔志刚, 付嘉英, 郑金伟, 等. 不同炭基肥对青椒生长、品质和氮素农学利用率的影响 [J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 174–179.
  - [77] 刘小虎, 赖鸿雁, 韩晓日, 等. 炭基缓释花生专用肥对花生产量和土壤养分的影响 [J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 698–702.
  - [78] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211–217.