植物营养与肥料学报 2017, 23(6): 1686–1693 doi: 10.11674/zwyf.17287
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

作物营养从有机肥到化肥的变化与反思

周建斌
（西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室，陕西杨凌 712100）

摘要: 二十世纪前，农业生产主要靠施用有机肥为作物提供营养，维持地力不衰，这一时期一般称为“有机营养”阶段。之后，化肥逐渐取代有机肥，成为作物养分的主要来源，农业生产进入以化肥养分供应为主的“无机营养”阶段。化肥的连续大量施用在作物增产方面发挥了巨大作用，也带来了不少问题，以致近年来出现了怀疑或否定农业生产中施用化肥的思潮。为此，本文回顾了植物营养学科的发展历程和我国化肥使用的历史，指出仅靠施用有机肥、种植豆科作物等传统的营养作物的方式难以满足农业生产对养分的需求，化肥与有机肥配合施用是我国农业发展的正确道路。目前生产中，化肥施用存在不合理和过量问题，有机肥施用方面，主要是集约化养殖业与种植业的不合理布局，存在种养分离，难以农业利用等养分管理问题。同时解决这两个问题，除采取已有的合理施肥技术及方法外，还应改变从植物营养角度只重视氮磷钾等无机养分的供应，拓宽为重视碳、氮、磷及钾等不同元素间的时空平衡关系；以农业生态系统养分资源高效循环利用为核心，采取不同方式实现有机–无机营养的结合，应避免陷入有机与无机营养的争论；从生物地球化学循环角度看待养分利用与管理问题，关注养分在田块、流域及区域尺度的流向及对土壤、水体及大气的影响；将科技与政策等有效结合，提高养分利用效率，减少养分损失，保障我国农业的健康持续发展。

关键词: 植物营养；有机肥；化肥；养分资源；合理利用

Reconsideration of the changes of plant nutrition from organic fertilizers to chemical fertilizers

ZHOU Jian-bin
(*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University / Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shanxi 712100, China*)

Abstract: Agriculture had been relied on the nutrients from the different organic fertilizers over thousands of years. Organic nutrients had played pivotal role in keeping low but stable crop yields and soil fertility. This period is refined as organic nutrition period. The foundation of mineral nutrition theory in the 19th century stimulated the development and application of chemical fertilizers, and chemical nutrients replaced organic ones quickly and became the main nutrient sources for crops. This period is considered as inorganic nutrition period. The application of chemical fertilizers significantly increased crop yields, at the same time, over-application of them results in a series of economic and environmental problems. Negating or doubting the application of chemical fertilizers could be heard here and there. Therefore, the history and roles of plant nutrition are recalled and the practices of integrated use of organic and chemical fertilizers are reviewed in this paper. It is pointed out that only using the traditional ways could not meet the needs of agriculture. The nutrient supply should be transferred from purely considering mineral nutrients (N, P, K, etc.) to comprehensively nutrients from chemical and organic sources. Nutrient utilization and management should also consider the concordant relation among plant-soil-microbial. More attentions should be paid on nutrient flows in the different scales, including field, catchment, and region; and their effects on quality of soil, water, and air are also needed to evaluate. Combining technological

收稿日期：2017–07–26 **接受日期**：2017–10–20
基金项目：国家自然科学基金项目（31372137）资助。
作者简介：周建斌（1964—），男，陕西大荔人，教授，主要从事植物营养调控与生态环境效应方面的教学与研究。
E-mail：jbzhou@nwsuaf.edu.cn

measures with policy tools is also key to increase nutrient use efficiency, and reduce their losses.

Key words: plant nutrition; organic fertilizer; chemical fertilizer; nutrient resources; adequate application of nutrient

改革开放以来，我国化肥用量显著增加，在提高作物产量、改善作物品质等方面做出了突出的贡献，与此同时，我国也消费了世界约三分之一的化肥[1]。长期大量施用化肥也带来了诸多问题，因此，近年来出现了怀疑或否定农业生产中施用化肥的思潮。为此，有必要回顾植物营养学科的发展历史，反思出现问题的根源，找出保证我国农业可持续发展的养分资源利用的科学途径。

1　植物营养发展历史回顾

1.1　有机肥的施用历史

人类从事农业生产并知道施用肥料，最早可以追溯到尼罗河及两河流域的古埃及和古巴比伦时期，人们靠富含养分的河流冲积物补充地力。主动使用有机肥为作物供应养分最早的记录，始于古希腊时期[2]，之后，这一营养作物的方式持续了数千年，被称之为“有机营养”阶段。

我国是世界上施用有机肥较早的国家之一。具体何时开始施用有机肥，已难以考证，大约始于春秋时代，到战国时期，肥料已经很受重视[3]。在长期的农业生产实践中，我国劳动人民积累了丰富的施用有机肥的经验与知识，提出的地力常新论等对今天的农业生产也具有重要的指导意义[4]。中华文明一脉相承，由于长期施用有机肥未出现地力衰竭[5]。我国传统农业施用有机肥维持作物产量、培肥地力的做法受到了国外学者的关注，上个世纪初美国农学家金氏 (King) 来中国、日本和朝鲜考察农业后写的《四千年农夫》一本书，极力赞扬这一传统的培肥地力的方式[6]。

长期施用有机肥虽然培肥了地力，但作物产量水平低。先秦时北方地区麦类产量为 824 kg/hm^2，明清时为 1465 kg/hm^2，近两千年间作物单产仅增加了 77.9%，相当于每经历一个世纪，麦类单产仅增加几十公斤[7]，凸显了有机农业的局限性。近代化学理论的飞速发展，为文艺复兴后期探索植物营养的机理提供了理论基础，欧洲学者先后创立了不同学说或理论解释植物营养的机理[8]。

1.2　植物矿质营养理论的提出

十八世纪末至十九世纪初，腐殖质营养学说占据植物营养理论的主导地位，这一理论认为，腐殖质是土壤中唯一的植物营养物质，而矿物质仅起间接作用，即加速腐殖质的转化与溶解，使其变成易被植物吸收的物质[9]。腐殖质营养理论由瑞典学者 Wallerius (1709～1785) 最先提出，德国学者泰伊尔 (Thaer，1752～1828) 为这一理论坚定的支持者[10]。

随后植物矿质营养理论的提出，否定了腐殖质营养理论，标志着植物营养学科的创立。长期以来人们一直认为，德国学者李比希 (Justus von Liebig) (1803～1873) 是植物矿质营养理论的创立人，他在 1840 年出版的《化学在农业及生理学上的应用》一书，否定了腐殖质营养理论，提出了植物矿质营养理论[9]。实际上早在 1826，李比希的同胞斯普林格尔 (Carl Sprengel)(1787～1859) 就提出，土壤中的可溶性盐是植物必需的营养物质，腐殖质的作用主要是培肥地力[10]。1828 年，他提到：“当植物生长需要 12 种营养物质，缺乏其中的任何一种养分，植物将不能生长；其中的任何一种养分供应不足，将会影响植物的正常生长”，这就是我们今天熟知的“最小养分律”，较李比希也早了 10 多年。

二十世纪四十年代，一些学者开始注意到斯普林格尔在植物营养理论创立过程中的贡献，1950 年 Wendt 通过较为详实的资料证明了斯普林格尔对植物矿质营养理论及最小养分律的贡献[11]。因此，自二十世纪五十年代起，德国一些学者呼吁，应肯定斯普林格尔对植物营养理论建立做出的贡献，德国“农业试验与研究协会”最早付诸行动，设立的一个奖项就以斯普林格尔与李比希的名字共同命名 (Sprengel-Liebig Medal)。遗憾的是，不少文献至今仍将植物矿质营养理论的创立归功于李比希一个人的贡献，而忽视了斯普林格尔的作用[11]。

为何后人将植物矿质营养理论的创立归为李比希，而忽视了斯普林格尔的工作？一些学者认为[9, 11]，相对于当时人们的认知水平，斯普林格尔的理论当时过于超前，而李比希《化学在农业及生理学上的应用》一书出版时，欧美农业生产中土壤肥力退化问题引起人们的普遍关注。斯普林格尔提出这一理论时，矿质肥料的资源有限，难以大规模进行肥料试验。还有，李比希当时是国际知名的化学家，但对农业化学知识的了解有限，书中存在一些有争论

或错误的提法或观点，更易引起人们的关注[9]。回顾这段历史，并不是否定李比希对植物营养学发展的贡献，只是作为后人，我们应该知道斯普林格尔对植物营养理论创立的贡献，以尊重历史。

植物矿质营养理论的提出，是植物生理学及现代农业创立的标志之一，显著促进了农业生产的发展。1842 年，英国的劳伦斯 (John B. Lawes) 获得了用硫酸处理磷矿石加工磷肥 (普通过磷酸钙) 方法的专利，1843 年开始生产这种肥料，从此拉开了化学肥料工业的序幕[12]。

2 化学肥料的施用及带来的问题

虽然早在 1830 年左右，一些国家或地区开始施用以硝酸盐矿物为代表的无机肥料 (智利硝石)，但关于世界上化肥的生产与施用，一般以 1843 年英国劳伦斯生产的过磷酸钙算起[7, 12]。同一年劳伦斯在自己位于伦敦北部约 40 公里的庄园进行了有机肥及化肥施用的田间试验，旨在比较施用化肥与有机肥的效果，发现施用化肥可以达到与有机肥相同的产量，这一试验目前还在进行，这就是著名的洛桑试验站。

1861 年德国建立了世界上第一座生产氯化钾的工厂；1903 年发明了采用电弧法生产硝酸，生产出了硝酸钙肥料[12]。而化肥生产与施用真正改变世界农业面貌的当属 1909 年德国化学家 Harber 发明的合成氨工艺，1913 年巴斯夫公司的 Bosch 实现了这一工艺的工业化生产过程，当年合成氨产量就达 800 吨。当初合成氨工艺主要用于炸药的生产，第二次世界大战结束后，合成氨的工厂开始转向氮肥的生产[13]。因此，二十世纪中期后发达国家化肥施用量不断增加，显著地提高了作物产量。化肥施用是二十世纪六、七十年代世界绿色革命的重要物质保障之一。

化学肥料的施用虽仅有 170 多年的历史，但其对农业生产的发展起到了不可忽视的作用。诺贝尔奖获得者著名作物育种学家 Borlaug 等 (1994) 在第十五届国际土壤学大会上曾提到“二十世纪全世界所增加的作物产量中的一半是来自化肥的施用”[14]。若立即停止施用化肥，全球农作物将会减产 40%～50%。美国及英格兰农产品约有一半是由于化肥的贡献，热带地区化肥的贡献更大[15]。化肥也是我国农业取得举世公认成就的主要贡献者[1]。合成氨养活了世界上近一半的人口[16]，因此，该工艺被认为是二十世纪人类最重要的发明[17]。

化肥的大量生产与施用不仅消耗了大量的资源，由于被作物利用的养分仅占施用肥料养分比例的一小部分，相当比例的养分进入了环境。以氮肥为例，仅有约 17% 的氮肥养分通过农产品 (包括粮食、奶制品及肉类) 被人们最终消费，大部分残留在土壤中，或进入水体及大气[18]，给生态环境带来巨大的危机，如水体富营养化、温室效应及臭氧层破坏、生物多样性降低等[1, 14, 19]。

我国化肥的施用从氮肥开始，之后是磷肥及钾肥。我国 1949 年前，农业生产中投入的养分一直以有机肥为主，之后化肥用量逐渐增加，有机肥提供的养分比例则逐渐降低。在上世纪八十年代，化肥供应的养分超过了有机肥，进入本世纪后，化肥养分的供应比例超过 70%[20]，不少地区农田完全依靠化肥养分，我国农业生产进入以化肥养分供应为主的“无机营养”阶段。目前，我国化肥总施用量和单位面积施用量已经处于世界高水平，其中蔬菜、果树施肥量更高[21]。过量施用化肥带来了诸多问题，包括土壤养分失衡，土壤酸化、盐渍化，环境污染等[22–23]。

从全球尺度看，大量施用化肥显著改变了全球养分的生物地球化学循环过程。到上个世纪七十年代，全球合成氨工艺生产的氮素已超过自然生态系统下生物固氮的数量，成为氮气转化为活性氧的主要来源[24]。2010 年，全球合成氨固定的氮素（N）达 120 Tg，为全球陆地生态系统自然固氮量的两倍之多[18]。全球活性氮的增加，不仅影响了陆地生态系统，而且影响海洋生态系统，如进入大气的活性氮沉降进入海洋后会导致海水酸化。有专家用氮素阶梯流动 (nitrogen cascade) 来描述人类活动对全球氮素循环影响所带来的一系列问题[25]。目前，全球通过施用磷肥及畜禽粪便等方式进入生物圈的磷素也显著改变了全球磷素循环，磷素进入水体引起了严重的富营养化问题[26–27]。因此，施用化肥以及人类其他生产及生活活动对全球养分循环影响带来的问题无容置疑。

3 有机农业的兴起及存在的问题

大量施用化肥带来的问题使得农业生产中产生了限制甚至停止施用化肥的呼声及做法，其中以有机农业 (organic farming) 的做法最具代表性。虽然各个国家及地区对有机农业的定义存在一定的差异，但从养分投入看，都强调不施用化学合成的养分，可以施用一些天然的矿物类肥料，主要依靠轮作、秸秆还田、施用有机肥、种植豆科作物及绿肥等方

式为农田提供养分[28]。现代有机农业的概念于上个世纪四十年代起源于英国，从 1946 年起英国土壤学会就开始了有机农业生产的认证工作[28]，当时主要关注的是化肥施用对土壤性质的不良影响。到上个世纪六七十年代，随着人们对化肥及农药大量施用带来生态环境问题的担忧，有机农业在西方一些发达国家引起了人们的关注。我国于上个世纪八十年代开始了有机农业的研究与实践，近年来的发展也较为迅速[29]。

自有机农业理论提出后，其与施用化肥的常规农业间孰优孰劣的争论就未曾中断过。争论主要集中在两种生产方式对作物产量、环境的影响等方面。有研究表明，有机农业可以达到与常规农业相同的产量水平。但多数研究发现，有机农业条件下作物产量较常规农业低，降低的幅度与作物类型有关，农作物一般减产 20%～40%，蔬菜及果树减产 20%～50%[30]。在瑞士进行的 21 年的试验结果表明，有机农业处理的作物产量较常规农业平均低 20%[31]。美国加州大学戴维斯分校 9 年的定位试验发现，与常规农业相比，有机农业栽培下玉米、小麦产量显著降低，而番茄产量二者无差异[32]。Seufert 等[33]采用整合分析的方法比较了全球不同地区有机及常规农业两种系统下作物产量的差异发现，有机农业平均比常规农业作物产量降低 25%，产量降低的幅度随作物种类、地点等存在较大的变化，减产幅度在 5%～34% 之间；雨养地区的豆科作物及弱酸或弱碱土壤的多年生牧草减产幅度较小，禾谷类作物及蔬菜产量降低幅度大。有机农业生产条件下仅采用种植绿肥、轮作等方式，难以维持土壤养分的平衡，这是其导致作物产量降低的主要原因[28]。从养分循环角度看，由于收获农产品从系统中携出了大量的养分，投入外源养分是增加系统生产力的有效手段。如撒哈拉以南的非洲地区，化肥用量比较低，仅为 8 kg/hm^2[34]。施用化肥，增加外源养分的投入，是这一类地区增产的有效手段。

倡导有机农业的主要原因之一是，这一生产方式的可持续性及其对生态环境的良好效应。但关于有机农业对生态环境等的影响，答案远比想象的要复杂得多[35]。如生物多样性方面，有机农业无疑具有明显的优势；但在养分径流损失以及向大气排放温室效应气体等方面，很难说出有机农业与常规农业二者的差异。“有机农业是否是未来农业的方向”[36]，若按纯有机农业的定义看，可能不是如此。因为就全球情况看，预计到 2050 年，全球对食物的需要量将翻番，因此，对化肥的需要量还会增加[37]。在贫困人口众多的非洲地区，化肥施用量还很低，农业生产还在消耗土壤养分，增施化肥是解决这些国家及地区粮食供应不足的主要手段。但有机农业的一些理念，如资源循环利用、环境保护等正在被人们接受。将有机农业与常规农业相结合的有机–无机复合农业 (Integrated agriculture) 被认为是未来世界农业发展的方向[28]。

我国人口众多，人均耕地少，保证充足农产品的供应是我国农业生产的头等大事。虽然我国农业过量施用化肥带来的问题日益突出，农业可持续发展面临重大挑战，近几年对我国农业的发展要摆脱对化肥、农药的过度依赖的呼声不断高涨，但我们应该清醒地看到，不施用化肥，仅靠施用有机肥、种植豆科作物等传统的方法难以满足作物对养分的需求，因此，我们应特别审慎地对待有机农业问题。将有机农业与常规农业二者有机地结合，协调土壤有机、无机养分平衡，以较小的环境代价生产更多的农产品是我国农业发展的方向。我国近来的一些研究表明，采用土壤–作物系统综合管理技术，可以在大幅度增产的同时，大幅提高氮肥效率，减少活性氮损失 30%、减少温室气体排放 11%[38–39]。

4　养分资源高效利用的途径

世界人口还在不断增加，预计到 2050 年将超过 90 亿，对农产品的需要量将是 2005 年的 2 倍[37]。同时，随着人们生活水平的提高，农产品的人均需要量也会增加。因此，采取有效措施增加农产品的供应仍是世界各国特别是人口众多的发展中国家面临的巨大挑战。由于全球可利用的耕地资源有限，所以增加单位面积产量是增加粮食总产的重要手段，化肥的施用无疑将继续发挥重要的作用。同时，我们应该正视化肥过量及不合理施用带来的问题。

我国农业生产中过量施肥问题较为普遍，尤其以果树、蔬菜等经济作物更为突出。虽然对我国农业生产中如何控制或减少化肥用量的认识尚存在差异[40]，但我国肥料施用量高，养分利用率普遍偏低是一个共识。为此，我国提出了到 2020 年“化肥零增长”的目标，对控制农业生产中化肥过量施用问题提出了明确的要求。“十三五”期间科技部正在实施的“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”重点研发计划，将对改变我国目前农业生产中过量施肥问题提供有力的支持。但同时应看到，我国幅员辽阔，解决不合理施肥带来的问题不能简单地采取“减肥”的措施，应通过多种措施，除挖掘作物对

养分吸收利用潜力、采用“4R”技术、继续开展测土配方施肥等技术研究与推广外，笔者认为尚需注意以下问题。

4.1 不能将作物营养仅仅看作是氮、磷、钾等矿质养分的供应，应考虑矿质养分与有机碳间的平衡协调

植物矿质营养理论提出后，长期以来，以化学为主导的思想在植物营养研究与应用中占有重要的主导地位[41]；植物营养学科相当一段时间被称为“农业化学”。以化学为主导思想导致生产实践中不少人将作物养分供应问题仅仅看作是氮、磷、钾等矿质养分的供应问题。生产中大量施用化肥，导致农田生态系统碳、氮、磷等养分的时空平衡失调，损失量增加[42]。

国内外大量研究表明，有机与无机配合不仅提高了作物产量，还培肥了地力，其理论基础已有不少论述[2, 9]。长期定位试验结果表明，有机肥与化肥配施处理，氮肥用量减少了70%，获得了与仅施化肥处理相近的产量，但提高了土壤有机质含量，改善了土壤肥力[43]。我们的研究表明，与施用相同量的氮肥相比，长期有机肥与化肥配施处理氮肥利用率高、损失量低，这不仅与有机肥配施化肥处理改善了土壤理化性质有关；也与氮肥与有机肥或有机物料配合，增加土壤微生物对养分的固持有关；还与作物生长后期微生物固持养分的释放和协调氮素供应有关[44]。从宏观尺度对全球不同国家氮素利用效率的分析发现，农业生态系统生物固氮比例高的国家或地区，其氮素利用效率也高[45]。因此，应该改变施肥实践中仅考虑氮、磷及钾化肥养分的供应问题，同时重视农田生态系统碳、氮、磷、钾等元素间的时空平衡。

20世纪中期后欧美发达国家植物营养的研究重点转向无机营养及化肥方面，也在一定程度上忽视了有机物质的营养作用[13]。不论土壤还是有机肥，均含有一定的有机态养分或生理活性或刺激类物质，其对作物生长也具有一定的营养及调控作用。以有机态养分为例，早在1881年英国洛桑实验站的测定就发现，土壤及其渗漏液、雨水中含有一定数量的有机态氮[46]；但对其营养作用的研究由于受研究手段限制证据有限。上个世纪五十年代起，同位素技术的应用，为植物吸收有机养分提供了直接的证据[13]。因此，有必要进一步挖掘有机养分的调控及营养作用。

4.2 重视土壤、微生物、作物间的关系在协调作物生长及养分供应中的作用

施用的化肥养分被作物吸收利用取决于其与作物、土壤、微生物及其环境条件相互作用的结果。以氮素为例，化肥氮被作物吸收与土壤有效氮的供应有密切关系，土壤有效氮含量高，作物吸收肥料氮比例相对就低。土壤微生物是有机质转化与养分元素循环的引擎，土壤中各种来源和形态的有机质最终都必须经过微生物的分解矿化过程才能重新参与土壤生物地球化学循环。化学氮肥施入土壤后会发生作物根系与微生物竞争氮素现象，短期内微生物获胜，导致氮素固定；而微生物生命周期短，其死亡后分解释放氮素，可为植物利用，所以植物是最终的胜利者[47]。因此，微生物对养分的固持与释放在植物养分供应方面也具有重要作用[48]。过量和不合理施肥，会影响土壤微生物区系，进而抑制菌根侵染及固氮菌等有益微生物的活性，导致作物病害加剧[13]，影响作物养分吸收与利用。

可以采用不同方法调控、培育土壤微生物区系，包括直接接种有益微生物、使用杀菌剂、作物轮作、耕作等方法有针对性地干扰土壤原著微生物的生长，以有利于接种微生物的生长[49]。施用有机肥、秸秆还田以及作物根系分泌物，可以为土壤微生物提供有效的碳源，是调控土壤微生物区系的有效手段。以根系分泌物为例，有人粗略估计，一年生植物生长期间通过根系分泌物或脱落物进入土壤有机物的数量约为其成熟时根系有机物量的两倍多[50]。采用^{14}C标记试验研究发现，根系分泌物的数量可占其净固碳量的5%～19%[51]，这些根系分泌物或脱落物在调节土壤生物活性方面具有重要作用。

二十世纪90年代后期，随着分子生物学和组学技术的发展，为揭示农田生态系统土壤、作物、肥料及微生物间的关系提供了有效手段，使得土壤微生物的研究由“黑箱”变成“灰箱”，甚至“白箱”[52-53]。在微生物调控方面，近年来围绕调控根际微生物促进植物生长和保持植物健康，增强有益菌根际定殖、调控根际微生物群落结构、培育高生物肥力及抑病型土壤微生物区系等基础科学问题方面开展了一些研究[52]。国外提出了根际工程法(rhizosphere engineering)，通过育种的方法，调控根系分泌物特性，进而调控根际有益微生物种群的构建，改善植物生长环境[49]。近年来，以南京农业大学沈其荣教授为首的团队结合我国特有的集约化管理模式，开展了构建和调控高生物肥力及抑病型根际土壤微生物区系工作，利用外源有益微生物与有机肥通过二次固体发酵制成的生物有机肥，在调控根际微生物区系、促进植物生长和健康的研究方面取得了突出成

果[54]，展示了这一领域巨大的潜力。

4.3　最大限度地实现养分资源的循环利用

与农药等化学品不同，化肥养分和有机肥养分均可以循环利用。我国传统农业属自给自足的小农经济生产方式，在很大程度上实现了养分资源的循环利用，保证了我国农业几千年来的持续发展[55]。而随着社会的发展，农产品的流通范围不断扩大，使得从农田带出的养分难以还田。特别是现代农业生产方式下，种植业与养殖业分离问题突出，有机肥养分难以实现就地还田。

有机肥特别是畜禽粪便是重要的养分资源，全球畜禽粪便的全氮量与化肥氮的总用量相当[56]，但由于养分损失及还田比例低，实际施用到农田的数量仅为化肥氮的 30%[45]。我国畜禽养殖每年产生粪污 38 亿吨，折合氮 1423 万吨、磷 246 万吨，而目前综合利用率不足 60%，不仅造成资源浪费，还成为重要的污染源[57−58]。养殖业粪污的处理与利用已成为限制畜牧业发展的重要障碍，为此，国务院办公厅新近印发了《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》，以推动我国畜禽养殖废弃物资源化利用、破解畜禽养殖废弃物环境污染治理难题。除合理利用畜禽粪便外，也应同时重视秸秆及其他工农业有机废弃物养分的利用。

植物营养学通常关注的是肥料养分在田块尺度的吸收利用及损失，对养分离开田块后的去向及利用关注不够。实际上离开一个田块的养分，可以进入另一田块而被其他作物吸收利用[59−60]。因此，养分资源管理应以养分流向及循环利用理论为指导，从生物地球化学循环的角度看待养分的流向，实现从田块向流域尺度的拓展，最大限度地实现养分在农业生态系统的循环利用。

4.4　综合利用技术、经济与政策等措施进行养分管理

施肥实践是一项人类生产活动，不仅受研究及技术推广的影响，也与经济、社会等因素有关。仅采用其中的一项措施，难以有效引导生产者科学合理地利用养分。西方发达国家解决化肥施用带来的负面影响的实践充分证明了这一点[19]。

西方发达国家特别是西欧地区工业化进程早，化肥施用历史长，农业的集约化程度高，养分过量投入带来的生态环境也较早出现。为此，1971 年西欧施肥量最高的荷兰率先制定了控制过量施肥、保护土壤环境的法案[24]。自上个世纪七十年代起，荷兰氮肥用量不断降低，目前已降至六十年代的水平，但作物产量却翻了一番，氮肥利用率显著增加[45]。丹麦是西欧地区农产品的主要出口国，农业生产中由于过量施用氮肥导致的污染问题相当严重。而在过去的 30 年间，由于采用多种措施控制农田氮素投入量，氮素盈余量显著降低，而农、畜产品产量不断增加，氮素利用效率 (农业 + 畜牧业) 增加了近一半，氮素淋溶损失、氨挥发、氮素沉降及氧化亚氮排放显著降低，其中的一个有效措施是采用有机肥代替化肥，并且设定氮素投入的上限等[61]。欧盟提出的控制养分过量投入污染水体等的政策与法规包括 1991 实施的“硝酸盐指令” (nitrates directive)、2000 年实施的“水框架指令” (water framework directive) 及 2008 年实施的“海洋战略框架指令” (marine strategy framework directive)[62−63]，规定了向水体排放有关养分的限度及肥料施用的时期等，对超标排放的生产者采取经济处罚。由于采取了这些综合措施，使得欧盟国家自上个世纪九十年代以来化肥用量逐渐降低[19, 63]。有机肥施用面积不断增加，目前，欧盟施用有机肥的面积占农田面积的 55%；欧美国家有机肥氮循环利用到农田的比例在 75%～90% 之间[63]。

我国当前农业生产中果树、蔬菜等经济作物过量施肥问题较为普遍，种养分离导致的农业面源污染问题突出。虽然我国国情与欧美发达国家存在一定的差异，但其采取的综合利用技术、经济与政策等措施控制养分过量投入，促进养分循环利用的做法值得我们借鉴。

5　结语

上个世纪初美国的农学家 King 曾感叹我国及日本和朝鲜三个东亚国家几千年来的农业生产中施用有机肥，在养活了大量人口的同时还培肥了地力的奇迹。但自上个世纪八十年代以来，我国农业大量施用化肥，种养分离导致畜禽粪肥难以农业利用，带来了诸多生态环境问题，我们需要反思大量施用化肥带来的问题的根源以及解决这些问题的途径与办法。无疑，过量及不合理施用化肥是出现问题的根源。除采取已有技术及措施外，应改变将植物营养内容仅看作是氮、磷、钾等无机养分的供应，重视碳、氮、磷及钾等不同元素间的时空平衡关系；实践中应避免陷入有机与无机营养的争论，以农业生态系统养分资源高效循环利用为核心，采取不同方式实现有机–无机营养的结合。从生物地球化学循环角度看待养分利用与管理问题，关注养分在田

块、流域及区域尺度的流向及对土壤、水体、大气的影响。将技术与政策、法规等有效结合，提高养分利用效率，减少养分损失，保障我国农业的健康持续发展。

参 考 文 献：

[1] Zhang F S, Cui Z L, Fan M S, *et al*. Integrated soil-crop system management: Reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(4): 1051–1057.

[2] Tisedale S L, Nelson W L, Beaton J D. Soil fertility and fertilizers (4th Edition) [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1985.

[3] 曹隆恭. 肥料史话[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
Cao L G. History of fertilizers [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1984.

[4] Yang H S. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 116(1): 27–33.

[5] Johnston A E. Principles of crop nutrition for sustainable food production [C]. The International Fertilizer Society, 2001.

[6] King F H. Farmers of forty centuries [M]. Emmaus: Rodale Press, 1911.

[7] 奚振邦. 化学肥料学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Xi Z B. Chemical fertilizers [M]. Beijing: Science Press, 1994.

[8] Russell E W. Soil conditions and plant growth(10th Edition) [M]. London: Longmans, 1973.

[9] 陆景陵. 植物营养学 (上册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
Lu J L. Plant nutrition [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.

[10] Ploeg R R, Bohm W, Kirkhan M B. On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the Law of the Minimum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1055–1062.

[11] Jungk A. Carl Sprenge—The founder of agricultural chemistry: A re-appraisal commemorating the 150th anniversary of his death[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(5): 633–636.

[12] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986.
Soil and Fertilizer Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences. Regionalization of chemical fertilizers in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986.

[13] Paungfoo-Lonhienne C, Visser J, Lonhienne T G A, *et al*. Past, present and future of organic nutrients[J]. Plant and Soil, 2012, 359(1–2): 1–18.

[14] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601–609.
Jin J Y, Li J K, Li S T. Fertilizer and food security[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 601–609.

[15] Stewart W M, Dibb D W, Johnston J E, *et al*. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production[J]. Agronomy Journal, 2005, 979(1): 1–6.

[16] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, *et al*. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(10): 636–639.

[17] Smil V. Detonator of the population explosion[J]. Nature, 1999, 400: 415.

[18] Fowler D, Pyle J A, Raven J A, *et al*. The global nitrogen cycle in the twenty first century: introduction[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2013, 368(1621): 20130165.

[19] Sutton M A, Bleeker A, Howard C M, *et al*. Our nutrient world: The challenge to produce more food and energy with less pollution[M]. Edinburgh: Center for Ecology and Hydrology, 2013.

[20] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006, (1): 3–8.
Huang H X, Li S T, Li X L, *et al*. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. Soil and Fertilizer , 2006, (1): 3–8.

[21] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217–225.
Yang F, Meng Y D, Jiang Y, *et al*. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 217–225.

[22] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010.

[23] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al*. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2006, 143(1): 117–125.

[24] Galloway J N, Leach A M, Bleeker A, *et al*. A chronology of human understanding of the nitrogen cycle[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2013, 368(1621): 20130120.

[25] Galloway J N, Aber J D, Erisman J M, *et al*. The nitrogen cascade[J]. Bioscience, 2003, 53(4): 341–356.

[26] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought[J]. Global Environmental Change, 2009, 19(2): 292–305.

[27] Elser J, Bennett E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle[J]. Nature, 2011, 478: 29–31.

[28] Tinker P B. Organic farming: Nutrient management and productivity [C]. The International Fertilizer Society, 2001.

[29] 马世铭, Sauerborn J. 世界有机农业发展的历史回顾与发展动态[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1510–1516.
Ma S M, Sauerborn J. Review of history and the recent development of organic farming in the world[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(10): 1510–1516.

[30] Stockdale E A, Lampkin N H, Hovi M, *et al*. Agronomic and environmental implications of organic farming systems[J]. Advances in Agronomy, 2000, 70: 261–327.

[31] Mader P, Fliesbach A, Dubois D, *et al*. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. Science, 2002, 296(5573): 1694–1697.

[32] Denison R F, Bryant B C, Kearney T E. Crop yields over the first nine years of LTRAS, a long-term comparison of field crop systems in a Mediterranean climate[J]. Field Crops Research, 2004, 86(2): 267–277.

[33] Seufert V, Ramankutty N, Foley J A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture[J]. Nature, 2012, 485(7397): 229–232.

[34] Chivenge P, Vanlauwe B, Six J. Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1): 1–30.

[35] Gewin V. Organic FAQs[J]. Nature, 2004, 428: 796–798.

[36] Macilwain C. Organic: Is it the future of farming?[J]. Nature, 2004, 428(6985): 792–793.

[37] Tilman D, Balzer C, Hill J, *et al*. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(50): 20260–20264.

[38] 张福锁, 马文奇. 我国高产高效现代农业发展的战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(增刊): 133–140.
Zhang F S, Ma W Q. Strategy to develop high yield and high efficiency modern agriculture in China[J]. Bulletin of China Academy of Sciences, 2015, 30(Suppl.): 133–140.

[39] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al*. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486–489.

[40] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 1–6.
Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 1–6.

[41] 尤.李比希 (刘更另译). 化学在农业和生理学上的应用[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
von Liebig J (Translated by Liu G L). Application of chemistry in agriculture and physiology [M]. Beijing: Agriculture Press,1983.

[42] Drinkwater L E, Snapp S S. Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm[J]. Advances in Agronomy, 2007, 92: 163–186.

[43] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
Xu M G, Zhang W J, Huang S M, *et al*. Changes of soil fertility in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015.

[44] Liang B, Yang X Y, Murphy D V, *et al*. Fate of ^{15}N-labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. Biology and Fertility of Soil, 2013, 49(8): 977–986.

[45] Lassaletta L, Billen G, Grizzetti B, *et al*. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(10): 105011.

[46] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, *et al*. Soluble organic nitrogen in agricultural soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(5): 374–387.

[47] Kuzyakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance[J]. New Phytologists, 2013, 198(3): 656–669.

[48] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮的含量、矿化特性及其供氮意义[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1718–1725.
Zhou J B, Chen Z J, Li S X. Contents of soil microbial biomass nitrogen and its mineralized characteristics and relationships with nitrogen supplying ability of soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(10): 1718–1725.

[49] Bakker M G, Manter D K, Sheflin A M, *et al*. Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management[J]. Plant and Soil, 2012, 360(1): 1–13.

[50] Brady N C, Well R R. The nature and properties of soils [M]. New Jersey, Prentice Hall, 1996.

[51] Jones D, Hodge A, Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition[J]. New Phytologist, 2004, 163(3): 459–480.

[52] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 等. 中国土壤微生物学研究10年回顾[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1087–1104.
Song C Q, Wu J S, Lu Y H, *et al*. Advances of soil microbiology in the last decade in China[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1087–1104.

[53] Paul E A. Soil microbiology, ecology, and biochemistry(3rd Edition)[M]. Amsterdam: Academic Press, 2007.

[54] Raza W, Ling N, Zhang R F, *et al*. Success evaluation of the biological control of *Fusarium* wilts of cucumber, banana, and tomato since 2000 and future research strategies[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(2): 202–212.

[55] 张乃凤. 我国五千年农业生产中的营养元素循环总结以及今后指导施肥的途径[J]. 土壤肥料, 2002, (4): 3–4.
Zhang N F. Summary of nutrient cycles of five thousand years of China agriculture and its role in make fertilizer recommendation[J]. Soil and Fertilizer, 2002, (4): 3–4.

[56] Oenema O, TammingaS. Nitrogen in global animal production and management options for improving nitrogen use efficiency[J]. Science in China Series C-Life Sciences, 2005, 48(Suppl. 2): 871–887.

[57] 李金祥. 我国畜禽产品质量安全对供给侧改革的需求分析与行动策略[J]. 农产品质量与安全, 2017, (1): 3–8.
Li J X. Demands analysis and strategies on livestock and poultry product quality and safety in context of China’s supply-side reform[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2017, (1): 3–8.

[58] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229.

[59] 高晶波, 路永莉, 周建斌, 等. 猕猴桃园土壤硝态氮累积及迁移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 322–328.
Gao J B, Lu Y L, Zhou J B, *et al*. Nutrient inputs and nitrate accumulation and movement in soil of kiwifruit orchards[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(2): 322–328.

[60] Powell J M, and Broderick G A. Transdisciplinary soil science research: Impacts of dairy nutrition on manure chemistry and the environment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2071–2078.

[61] Dalgaard T, Hansen B, Hasler B, *et al*. Policies for agricultural nitrogen management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115002.

[62] Department for Environment Food and Rural Affairs (Defra). Fertilizer manual (RB209)(8th Edition) [M]. Norwich: TSO, 2010.

[63] Van Grinsven H J M, Bouwman L, Cassman K G, *et al*. Losses of ammonia and nitrate from agriculture and their effect on nitrogen recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050[J]. Journal of Environmental Quality, 2015, 44(2): 356–367.