

长期施肥对土壤肥力的影响^①

龚 伟^{1,2}, 颜晓元^{1*}, 王景燕²

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 四川农业大学林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘要: 基于长期试验资料, 从土壤肥力的角度综述了长期施肥对土壤肥力指标有机质、N 素、P 素和 K 素含量, 微生物生物量及数量和土壤酶活性的影响, 指出长期施用有机肥及有机肥与化肥配施是维持和提高土壤肥力的关键, 可促进农田生态系统可持续发展。

关键词: 长期施肥; 土壤肥力; 有机肥; 化肥

中图分类号: S147.2; S158

土壤是具有生物活性的自然体, 土壤肥力的高低是决定土地生产力的基本条件^[1]。利用有机肥料培肥土壤是我国农业的特色之一, 自 20 世纪 80 年代以来, 中国化肥施用量快速增加, 而有机肥用量逐渐减少, 施用化肥成为最主要的粮食增产措施^[2]。肥料在粮食生产中起着非常重要的作用, 合理施肥, 不仅能为作物生长创造养分贮量丰富、有效性高、贮供协调的土壤生态环境, 而且还能调节土壤酸碱性, 改善土壤结构和理化性质, 协调土壤水、肥、气、热诸因素, 提高土壤肥力, 从而增加作物产量和改善农产品质量; 但不合理施肥不仅导致肥料利用率低, 且不利于作物稳产和土壤培肥^[3]。由于各种肥料养分对作物的增产效应各不相同, 不同的施肥措施会影响作物产量。因此, 如何合理施肥, 提高作物产量、维持和提高土壤肥力, 是目前需要研究的课题, 长期的化肥投入对粮食持续生产和土壤肥力的影响及其程度和趋势也一直是人类关注的重要科学问题^[4]。长期肥料定位监测试验, 具有时间上反复证明、信息量极为丰富、数据准确可靠、解释能力强、在生产上可提供决策性建议等优点。本文以长期试验研究资料为基础综述了长期施肥对土壤肥力影响的研究进展, 以期为维持和提高农田生态系统土壤肥力提供参考, 为生产与生态环境共赢合理施肥提供理论支撑。

1 施肥对土壤有机质的影响

土壤中有机质含量虽少, 但在土壤肥力上的作用很大, 是土壤中各种营养元素的重要来源, 几乎能为

作物提供生长所需的所有营养元素, 也是土壤微生物必不可少的 C 源和能源, 由于它具有胶体特性, 能吸附较多的阳离子, 因而使土壤具有保肥力和缓冲性^[5]。土壤有机质在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用, 是评价土壤肥力的一个重要指标^[6]。大量的长期定位施肥试验表明, 施用化肥对土壤有机质含量的影响结果各异, 且不同施肥措施对土壤有机质的影响不同。有研究表明在化肥施用过程中, 与不施肥对照 (CK) 相比, 化肥 N、P 和 K 三者 (NPK) 或两者 (NP、NK、PK) 配施, 以及化肥 N、P 和 K (N、P、K) 单独施用, 均能提高土壤有机质含量。如陈永安等^[7]和张爱君等^[8]的试验 (分别为 4 年和 19 年) 表明, 耕层 (0~20 cm) 土壤有机质含量为 NPK > NP > N > CK; 陈修斌等^[9]的试验 (11 年) 表明, 耕层土壤有机质含量 NP > N > P > CK; 宋永林等^[10]的试验 (14 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为 NP > NPK > PK > NK > N > CK。施用化肥处理没有外源有机物的输入, 土壤有机 C 的来源主要是作物残体自然还田, 施肥能提高作物产量, 作物产量的差异直接影响着进入土壤的有机物数量, 土壤有机质积累也与作物根系输入有关^[11]。虽然单施化肥不能明显提高土壤中有机质含量, 但是它可以促进农作物根系的迅速生长, 从而提高根际有机物质的输入。同时, 根系分泌物是作物向土壤输入有机 C 的重要途径。Kuzyakov 等^[12]的研究发现, 小麦同化产物的 20%~30% 分配进入地下。因此, 化肥对土壤有机 C 含量提高程度的不同与化肥对作物生长促进作用密切相关。

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (kzcx2-yw-406-2, kzcx2-yw-312) 资助。

* 通讯作者 (yanxy@issas.ac.cn)

作者简介: 龚伟 (1980—), 男, 四川崇州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态方面研究。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn

但也有研究表明, 化肥 N、P 和 K 三者 (NPK) 或两者 (NP、NK、PK) 配施, 以及化肥 N、P 和 K (N、P、K) 单独施用, 都可能会降低土壤有机质含量, 且施肥处理有机质含量低于不施肥处理。如詹其厚等^[13]的试验 (8 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为 CK>PK; 程艳丽等^[6]的试验 (15 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为 CK>P>PK; 张玉兰等^[14]的试验 (3 年) 表明, 各 NPK 施肥处理耕层土壤有机质含量都比不施肥处理 (CK) 的低。出现施肥处理土壤有机质含量低于不施肥土壤的原因, 可能与施用化肥影响土壤微生物的数量和活性, 进而影响有机质的生物降解过程有关。总体而言, 施用化肥对维持和提高土壤有机质含量有促进作用, 其中以化肥 N、P 和 K 均衡施用效果最好, 化肥 N、P 和 K 两者配施次之, 化肥 N、P 和 K 单独施用效果最差, 而且适量增施化肥也有利于土壤有机质含量的维持和提高。

有机肥料种类不同时对土壤有机质的影响作用也不相同, 且均表现为对耕层土壤有机质含量增加有促进作用。如宋永林等^[10]的试验 (14 年) 表明, 在施用化肥 NPK 的基础上, 再施用有机肥, 各处理 0~40 cm 土层土壤有机质含量为秸秆 (3 t/hm²)>有机肥 (22.5 t/hm²)>CK; 李科江等^[15]的试验 (15 年) 表明, 在等 N 和 P 养分条件下, 各处理耕层土壤有机质含量为饼肥>秸秆>绿肥>CK。出现以上现象的原因主要与有机肥中 C 含量, 及其矿化分解难易程度和对作物生长促进程度有关。施用有机肥对土壤有机质的增加作用是毋庸置疑的, 所有的研究结果都表明有机肥处理土壤有机质含量高于不施肥处理。

大量的研究表明, 各施肥处理无论是在 N、P 和 K 总养分量相同, 还是在不同条件下, 施用化肥处理土壤耕层有机质含量均低于有机肥处理或有机肥与化肥配施处理。在施用化肥的基础上再施用等量的有机肥条件下, 董旭等^[16]的试验 (8 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为 NPK+有机肥 (37.5 t/hm²)>有机肥>N+有机肥>NP+有机肥>NPK; 张爱君等^[8]的试验 (19 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为 NPK+厩肥>NP+厩肥>N+厩肥>厩肥>NPK; 陈修斌等^[9]的试验 (11 年) 表明, 耕层土壤有机质含量 NP+厩肥>N+厩肥>厩肥>P+厩肥>NP。各施肥处理在 N、P 和 K 总养分量相同条件下, 陈永安等^[7]的试验 (4 年) 表明, 0~40 cm 土层土壤有机质含量为 NPK+有机肥>NPK; 龚伟等^[17]的试验 (18 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为有机肥>有机肥+NPK>NPK。在等 N 和 P 养分条件下, 李科江等^[15]的试验 (15 年) 表明, 耕层土壤有

机质含量为饼肥>秸秆>绿肥>化肥。在施用有机肥的基础上再施用化肥 NPK, 宋永林等^[10]的试验 (14 年) 表明, 0~40 cm 土层土壤有机质含量为 NPK+秸秆 (3 t/hm²)>NPK+有机肥 (22.5 t/hm²)>NPK; 徐祖祥等^[18]的试验 (10 年) 表明, 耕层土壤有机质含量为猪厩肥 (7500 kg/hm²) +NPK=猪厩肥 (7500 kg/hm²)>秸秆 (1500 kg/hm²) +NPK>秸秆 (1500 kg/hm²)>NPK。有机肥对提高土壤有机质含量的作用大于化肥, 这是由于土壤有机质主要来源于作物根茬与有机肥源, 与生物量的增加也相关, 而单施化肥处理提高了土壤有机质的矿化损失^[11]。因此, 长期施用化肥或有机肥总体上均能提高土壤有机质含量, 尤以施用有机肥或有机肥与化肥配施的效果显著。

2 施肥对土壤氮素的影响

土壤 N 素含量是土壤肥力的一个重要指标, 我国农田土壤普遍缺 N, 提高土壤 N 素含量是提高土壤肥力质量的重要措施^[19]。不同施肥措施对土壤全 N 含量的影响不同。有研究表明, 化肥单施或配施均能增加耕层土壤全 N 含量, 如陈永安等^[7]的试验 (4 年) 表明, 耕层土壤全 N 含量 NPK=NP>N>CK; 王改兰等^[20]的试验 (18 年) 表明, 耕层土壤全 N 含量为 NP>N>CK; 龚伟等^[21]的试验 (18 年) 表明 NPK>NP>PK>NK>CK。相反, 有研究表明, 化肥配施会降低土壤全 N 含量, 如詹其厚等^[13]的试验 (8 年) 表明, 耕层土壤全 N 含量 CK>PK。总体而言, 化肥单施或配施均有利于土壤全 N 含量的增加, 尤以化肥 N、P 和 K 配施效果最优。

关于施用化肥、有机肥及有机肥与化肥配施对土壤全 N 影响的研究, 总体表现为施用有机肥或有机肥与化肥配施对土壤全 N 含量增加的效果优于施用化肥, 如李科江等^[15]的试验 (15 年) 表明, 在等 N 和 P 养分条件下, 耕层土壤全 N 含量为秸秆>饼肥>绿肥>化肥; 龚伟等^[21]的试验 (18 年) 表明, 在 N、P 和 K 养分量相同条件下, 耕层土壤全 N 含量为有机肥>NPK+有机肥>NPK; 王改兰等^[20]的试验 (18 年) 表明, 在施用化肥 NP 的基础上再施用有机肥, 耕层土壤全 N 含量为 N+有机肥 (22.5 t/hm²)>NP+有机肥 (22.5 t/hm²)>有机肥 (22.5 t/hm²)>NP。因此, 施用有机肥或有机肥与化肥配施是增加土壤全 N 含量的较好施肥措施。有机肥 N 素残效连续叠加, 使土壤具有强大而持久的供 N 能力, 这是施用有机肥产生后效的物质基础和根本原因^[22]。在培肥土壤和提高土壤质量方面, 有机肥与化肥的最大区别在于它们对

土壤 N 素肥力的影响方式及影响结果。长期施用 N 肥虽然能够提高土壤供 N 能力,但是真正能增加土壤有机 N 库、显著提高土壤供 N 能力并使土壤在供 N 方式上具有渐进性和持续性的只有施用有机肥。这种供 N 方式更适合作物根系对 N 的吸收利用,这是有机肥优于化肥的原因之一^[23]。有机肥与化肥配施对于提高土壤 N 素含量具有重要意义,这既能快速提高土壤中有效 N 的含量,又能长久保存土壤 N 素。

3 施肥对土壤磷素的影响

土壤速效 P 是评价土壤供 P 水平的重要指标,它不仅可以反映出土壤 P 素状态的动态变化,而且也可以反映土壤对作物的供 P 水平^[24]。在施用化肥的处理中, P 肥均能提高耕层土壤中有效 P 含量,且总体上施肥处理土壤有效 P 含量高于不施肥处理。如詹其厚等^[13]的试验(8 年)表明,耕层土壤有效 P 含量为 PK > NP > NPK > N > NK > CK; 陈修斌等^[9]的试验(11 年)表明,耕层土壤有效 P 含量为 NP > P > N > CK。相反,陈永安等^[7]的试验(4 年)表明,单施化学 N 肥会导致 0~40 cm 土层土壤有效 P 含量降低,且低于不施肥处理。施用化学 P 肥导致土壤有效 P 含量增加的原因在于,水溶性 P 肥施入土壤后,虽然其中一部分很快转化为难溶性 P 形态,难于为作物吸收利用,但另一部分被土壤吸附或存在于土壤溶液中,保持着有效状态,可为当季作物吸收利用^[25]。在短期施肥情况下,有较高比例的肥料残留 P 进入速效库,但长期施肥情况下该比例下降,如施 P 55 年,仅有 10.0% 进入速效 P 库,从而能够较好地为作物提供 P 素供应^[26]。

在施肥处理 N、P 和 K 养分量相等的情况下,施用有机肥或有机肥与化肥配施能较好地增加耕层土壤有效 P 含量,其效果优于施用化学 P 肥。如陈永安等^[7]的试验(4 年)表明,0~40 cm 土层土壤有效 P 含量为 NPK+有机肥 > NPK; 钦绳武等^[27]的试验(5 年)表明,耕层土壤有效 P 含量为有机肥 > NPK+有机肥 > NPK。在施肥处理 N、P 和 K 养分量不等的情况下,大多数研究结果也表明,施用有机肥或有机肥与化肥配施能较好地增加耕层土壤有效 P 含量。如董旭等^[16]的试验(8 年)表明,在施用化肥的基础上再施有机肥,耕层土壤速效 P 含量为 NPK+有机肥 > NP+有机肥 > 有机肥 > N+有机肥 > NP > NPK; 王伯仁等^[25]的试验(13 年)表明,在总 N 含量相同的情况下,耕层土壤有效 P 含量为 NPK+有机肥 > 有机肥 > NP > NPK。但徐祖祥等^[18]的试验(10 年)表明,施用秸秆会降低耕层土壤有效 P 含量,且低于不施肥处理。长期施用有

机肥增加土壤有效 P 含量的原因在于,一方面有机肥本身含有一定数量的 P,且以有机 P 为主,这部分 P 易于分解释放;另一方面有机肥施入土壤后可增加有机质含量,而有机质可减少无机 P 的固定,并促进无机 P 的溶解^[28]。同时,有机质在分解过程中可产生有机络合剂,对无机 P 组分中的 Al-P、Fe-P、Ca-P 类化合物中 Al、Fe、Ca 等金属成分有络合作用,能把 P 从这些不溶性磷酸盐中释放出来而成为有效态的 P^[6]。这可能也是有机肥施用能维持土壤较高有效 P 水平的原因。

4 施肥对土壤钾素的影响

施肥通过影响作物生长和土壤理化性质,进而影响土壤供 K 能力。通常施肥对全 K 的影响较小^[13],而施用有机肥和含 K 化肥或有机肥与化肥配施均能提高土壤速效 K 含量,如詹其厚等^[13]的试验(8 年)表明,耕层土壤速效 K 含量为 PK > NK > NPK > CK; 杨合法等^[29]的试验(4 年)表明,完全施用有机肥可以显著增加耕层土壤速效 K 含量,有机肥与化肥配施也可以不同程度地增加土壤速效 K 含量,但效果不及完全施用有机肥显著,单施化肥对增加土壤速效 K 含量作用最小。长期施肥能有效增加土壤速效 K 含量,这与 K 在土壤中主要以难溶或固定形态存在,迁移以扩散方式为主,施入的养分保留在土壤中的较多,流失的较少有关^[30]; 另外,有机肥单施与化肥配施均能提高土壤速效 K 含量,这可能在于有机肥本身所含 K 素不断分解释放,以及有机胶体在其交换表面具有保持养分的巨大能力的缘故。相反,长期单施不含 K 化肥,尤其是 N、P 肥,会明显降低土壤速效 K 含量^[13, 27]。这可能与土壤 K 素含量及施肥促进了作物生长并增加通过作物带走的 K 素有关。

5 施肥对土壤微生物的影响

微生物是土壤生态系统中极其重要和最为活跃的部分,它们几乎参与土壤中一切生物化学反应,是土壤物质循环和能量流动的主要参与者,推动土壤有机质的矿化分解和土壤养分 C、N、P、S 等的转化,是土壤养分的储备库和周转库^[31]。长期施肥会影响土壤的理化性质,从而改变土壤中的生物平衡,这将导致某些生理类群的微生物增减。施用有机肥或有机肥与化肥配施对微生物影响作用的研究,大多数结果比较一致,即长期施用有机肥或有机肥与化肥配施可大大提高土壤中细菌、真菌和放线菌数量,其中氨化细菌、硝化细菌、磷细菌、自生固 N 菌等增加显著^[32-33]。但

也有研究表明, 有机肥与化肥配施能增加细菌数量, 减少真菌数量^[34]。有机肥种类不同, 对土壤微生物的影响亦不相同, 如林增泉等^[35]的试验表明, 猪粪主要是增加氨化细菌和固N菌的数量, 而稻草主要是增加固N菌和纤维分解菌的数量。施用有机肥增加土壤微生物的原因在于, 有机肥为微生物提供了充足的C源、N源、无机盐等营养物质, 促使土壤微生物大量生长和繁殖, 而微生物活性的提高反过来又促进土壤中腐殖质和难分解有机物的矿化, 这个过程中释放出来的大量营养物质和能量又进一步激发微生物活性, 有机肥分解过程中所产生的相关物质可以改良土壤结构, 促进土壤中矿物质风化, 增加土壤中速效养分, 为微生物的生长和繁殖提供适宜的条件; 另一方面有机肥本身也含有大量微生物, 因而施入有机肥后土壤微生物数量明显高于化肥处理和不施肥对照。

化肥对土壤微生物的影响比较复杂, 因肥料种类、用量或不同肥料之间的配合方式而异。如薛景珍等^[36]的试验(10年)表明, PK肥主要增加土壤中的细菌数量, 单施P肥也能增加土壤中真菌的数量, 但不如N肥效果显著, 施用高含量含N化肥强烈抑制细菌的生长, 而对真菌却有一定的刺激作用; 刘杏兰等^[37]的试验(13年)表明, 反复地大量施用N肥, 也能促进放线菌的快速生长, 但强烈抑制自生固N菌的生长, N、P肥配施既可增加土壤中细菌的数量, 也可降低土壤中细菌的数量; 李秀英等^[33]的试验(14年)表明, 长期单施化肥与不施肥处理比较, 土壤放线菌数量增加, 细菌和真菌数量略有增加或与之相当, 且NPK均衡施肥土壤细菌、真菌和放线菌数量比非均衡施肥的N、NP、NK、PK处理略有增加或与之相近; 王伯仁等^[32]的试验(13年)表明, 施用化肥处理使得细菌和真菌数量降低(CK>NPK>NP>N), 相反增加了土壤中真菌数量(NPK>NP>N>CK)。化肥并没有直接给微生物提供C源和能源物质, 其增加土壤微生物数量的原因在于, 施用化肥促进植物生长, 使根系发达, 根系分泌大量低分子量有机物, 这些分泌的有机物为根际土壤中微生物提供易于吸收利用的C源, 从而促进土壤微生物生长, 使土壤微生物活性及数量增加^[38]。同时, 化肥为微生物生长提供了N、P、K等化学元素, 它们是微生物细胞的物质基础, 对微生物的代谢有重要的意义。施用化肥导致某些类群土壤微生物数量减少, 可能与养分限制因素有关。由于土壤微生物的生命活动不仅需要能源, 也需要生命元素。土壤养分限制因子及其水平都会影响到微生物的生命活动。施肥制度在长期定位条件下, 由于养分供

应的种类和数量相对固定, 有些养分因长期得不到补充而成为限制因子。如长期NK处理, 土壤P可能成为限制因子, 而土壤中的N或K含量不低; 长期PK处理, 土壤N成为限制因子, 土壤中的P、K水平较高。所以, 长期不同施肥制度形成养分限制因子、养分丰缺程度以及物理环境不同的土壤, 综合起来影响土壤微生物的数量、种群结构和代谢^[33]。

土壤微生物生物量可用微生物量C或N表征, 尽管微生物量N在土壤全N中所占比例很小, 但它是植物生长可利用N素养分的重要来源^[39]。施用化肥对土壤微生物量的影响, 研究结果不尽一致。Shen等^[40]的试验(140年)表明, 施用N肥增加了土壤微生物量N含量; McGill等^[41]的试验表明, 连续50年NPKS处理, 土壤微生物量N与不施肥处理没有显著差异; 李东坡等^[42]的试验(22年)表明, 黑土长期NPK处理, 土壤微生物量N含量与不施肥处理的差异也很小。不同学者的研究差异可能与气候、土壤类型和土壤供肥水平等的不同有关, 而且长期施用不同的化肥不仅影响微生物总数, 还对微生物群落结构也有一定的直接或间接影响^[43], 从而导致土壤微生物量N对化肥施用的响应趋势不一致。

6 施肥对土壤酶活性的影响

土壤中几乎所有的生化反应和物质循环都是通过土壤酶的催化作用来完成的, 土壤酶的活性是土壤肥力的重要指标^[14]。土壤中各种酶的活性, 在土壤系统物质和能量运动过程中起着不可忽视的作用, 通常以蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶来评价土壤肥力^[15]。通常施用化肥、有机肥及有机肥与化肥配施均能增加土壤酶活性。如姚源喜等^[44]的试验(12年)表明, 长期施用有机肥或化肥均可提高土壤中各种酶的活性, 其中脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶等增加较多, 且有机肥与化肥配施的效果最佳; 张电学等^[45]的试验(8年)表明, 化肥单施或与有机肥配施均能增加土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、中性磷酸酶的活性, 且有机肥与化肥配施均显著高于不施肥处理和单施化肥处理; 王灿等^[46]的试验(16年)表明, 化肥处理比无肥处理中土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性分别提高108.7%、170.2%和58.0%, 化肥+秸秆处理比单施化肥处理中相应酶活性分别提高30.7%、85.5%和25.8%。另外, N肥比例及用量增加对土壤酶活性也有一定增加作用, 如孙瑞莲等^[47]的试验(12年)表明, 长期合理施用NPK可增强脲酶活性, 从N肥的配施比例来看, 尿素施用量增加, 脲酶活性增大; 樊

军等^[48]的试验 (16 年) 表明, 土壤脲酶活性随着施 N 量的增加而增加。施用化肥提高土壤酶活性的原因在于, 化肥能促进作物根系代谢, 使根系分泌增多, 微生物繁殖加快, 从而有利于提高酶活性。有机肥除了可以促进作物根系代谢外, 其本身也含有一定数量的酶^[49]。

化肥施用过量或过低时会使土壤酶活性降低, 如王冬梅等^[49]的试验 (21 年) 表明, 单施低量 N 肥有抑制土壤脲酶活性的作用, 脲酶活性与对照比降低了 7.6% ~ 30.4%; 张玉兰等^[14]试验 (3 年) 表明, 高肥处理的脲酶活性受到抑制, 相反大多处理土壤硝酸还原酶活性有不同程度的增高。出现以上现象的原因主要在于, 施用适量 N、P、K 肥会对酶有一定的激活效应, 增强土壤酶活性, 但各肥料间的交互作用在施肥量达到一定水平时会对特定的土壤酶产生抑制作用^[50], 而且 N、P、K 矿质肥料对土壤酶活性的影响因土壤、肥料和酶的种类等不同而异, 同一元素对某些酶来说是激活剂, 而对另一些酶来说则为抑制剂, 同一元素的施用量不同, 可以起激活作用, 也可以起抑制作用^[14]。因此, 施用适量 N、P、K 及其他化学肥料对酶有一定激活效应, 能增强土壤酶活性^[49]。

7 结论与展望

通过肥料的长期定位试验, 可以揭示土壤-作物体系中养分的循环和平衡, 寻求出维持和提高土壤肥力的最佳途径。长期施用有机肥及有机肥与化肥配施对土壤肥力的影响作用研究结果相对一致, 即能够较好地维持和提高土壤肥力。但长期单施化肥, 尤其是不均衡施用, 如化肥 N、P 和 K 单施或其中两者配施对肥力的影响仍然存在一定的矛盾和不确定性。这可能与长期不均衡施肥所引起的养分胁迫, 不同作物对养分利用率及对养分胁迫的忍耐能力差异, 以及不同研究区土壤、气候、农事管理及大气养分沉降差异有关。据报道, 农田生态系统中大气沉降输入 N 的数量和作用可能被大大低估而一直没有得到足够的重视, 每年大气沉降(湿沉降)向农田生态系统输入 N 为 3.0 ~ 94.1 kg/hm²^[52], 如果把干沉降加上这一值会更大一些。大气 N 沉降会增加生态系统的 N 输入量, 改变土壤中 C/N 比值, 影响土壤肥力及作物生长。然而目前有关大气养分沉降对土壤肥力及作物生长方面的研究报道较少。因此, 今后有必要对养分沉降对土壤肥力的影响进行研究, 这样有助于进一步解释化肥 N、P 和 K 单施或其中两者配施对土壤肥力影响的差异。

参考文献:

- [1] 曾希柏. 红壤化学退化与重建. 北京: 中国农业出版社, 2003: 46-69
- [2] 高菊生, 李菊梅, 徐明岗, 孙楠, 秦道珠. 长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响. 中国农学通报, 2008, 24(1): 286-292
- [3] 朱洪勋. 长期施肥对小麦-玉米的增产效应及其对土壤养分的影响. 土壤通报, 1997, 28(4): 160-163
- [4] 郭胜利, 周印东, 张文菊, 荣丽媛, 刘振赏, 高长青. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响. 水土保持研究, 2003, 10(1): 16-22
- [5] Carter MR. Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems//Carter MR, Stewart BA. Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Boca Raton, FL: Lewis Publ., CRC Press, 1996
- [6] 程艳丽, 邹德. 长期定位施肥残留养分对作物产量及土壤化学性质的影响. 土壤通报, 2007, 38(1): 64-67
- [7] 陈永安, 陈典毫, 游有文, 黄佳良, 秦瑞君. 红壤旱地肥力变化及有效施肥技术. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 115-121
- [8] 张爱君, 张明普. 黄潮土长期轮作施肥土壤有机质消长规律的研究. 安徽农业大学学报, 2002, 29(1): 60-63
- [9] 陈修斌, 邹志荣. 河西走廊旱原长期定位施肥对土壤理化性质及春小麦增产效果的研究. 土壤通报, 2005, 36(6): 888-890
- [10] 宋永林, 唐华俊, 李小平. 长期施肥对作物产量及褐潮土有机质变化的影响研究. 华北农学报, 2007, 22(增刊): 100-105
- [11] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 李恋卿, 郑聚锋, 邱多生, 储秋华. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响—以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3704-3710
- [12] Kuzyakov Y, Friedel JK, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1485-1498
- [13] 詹其厚, 陈杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究. 土壤学报, 2006, 43(1): 124-132
- [14] 张玉兰, 陈振华, 马星竹, 陈利军. 潮棕壤稻田不同氮磷肥配施对土壤酶活性及生产力的影响. 土壤通报, 2008, 39(3): 518-523
- [15] 李科江, 张素芳, 贾文竹, 宋平忠, 刘树庆, 霍习良, 王玉朵. 半干旱区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 21-25
- [16] 董旭, 娄翼来. 长期定位施肥对土壤养分和玉米产量的影响. 现代农业科学, 2008, 15(1): 9-11
- [17] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波. 长期施肥对

- 华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究. 土壤学报, 2009, 46(3): 520-525
- [18] 徐祖祥. 长期不同施肥对作物产量和土壤肥力的影响. 浙江农业科学, 2007(4): 439-441, 444
- [19] 朱兆良. 关于土壤氮素研究中的几个问题. 土壤学进展, 1989, 17(2): 1-9
- [20] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 廖建平. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响. 水土保持学报, 2006, 24(4): 82-85, 89
- [21] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕, 胡庭兴, 宫渊波, 冉华. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2375-2381
- [22] Sommerfeld TG, Chang C, Entz T. Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio. *Soil Science Society of American Journal*, 1988, 52: 1668-1672
- [23] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 郭天文, 汪建国, 孙炳玲, 金绍龄. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2043-2052
- [24] 孙克刚, 张桂兰, 姚健, 王英, 乔文学. 砂姜黑土长期施肥对作物产量及土壤剖面 NO_3^- -N 累积的影响. 土壤通报, 1999, 30(6): 262-264
- [25] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响. 水土保持学报, 2005, 19(1): 97-100, 144
- [26] Mattingly GEG, Widdowson FV. Residual value of superphosphate and rock phosphate on an acid soil I. Yields and phosphorus uptakes in the field. *Journal of Agricultural Sciences*, 1963, 60: 399-407
- [27] 钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. 土壤学报, 1998, 35(3): 367-375
- [28] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响. 土壤学报, 1991, 28(1): 7-13
- [29] 杨合法, 范聚芳, 解永丽, 李季. 不同生产模式施肥对保护地土壤肥力及作物产量的影响. 河南农业科学, 2006(12): 61-65
- [30] 曾玲玲, 刘德福, 洪音, 张之一, 张兴梅. 长期定点施肥对土壤养分及作物产量的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 2007, 19(4): 22-26
- [31] Insam H, Mitchell CC, Dormaar JF. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(5): 459-464
- [32] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 有机肥和化学肥料配合施用对红壤肥力的影响. 中国农学通报, 2005, 21(2): 160-163
- [33] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 李燕婷, 孙瑞莲, 朱鲁生, 徐晶, 王丽霞, 李小平, 张夫道. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1591-1599
- [34] Nanda SK, Das PK, Behera B. Effects of continuous manuring on microbial population, ammonification and CO_2 evolution in a rice soil. *Oryza*, 1998, 25(4): 413-416
- [35] 林增泉, 翁文钰, 蒋和, 林炎金, 刘振兴. 连续十年施肥对水稻土肥力的影响. 福建省农科院学报, 1991, 6(1): 35-44
- [36] 薛景珍, 郭树范, 程国华, 赵铁琴, 王永清. 长期施用含氯化肥对土壤微生物区系及固氮细菌生理群的影响. 土壤通报, 1995, 26(3): 135-138
- [37] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 司立征. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究. 土壤学报, 1996, 33(2): 138-147
- [38] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化. 土壤通报, 2008, 39(3): 545-548
- [39] Nannipieri P, Muccini L, Ciardi C. Microbial biomass and enzyme activities: Production and persistence. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(6): 679-685
- [40] Shen SM, Hart PBS. The nitrogen cycle in the Broadbalk wheat experiment: ^{15}N -labelled fertilizer residues in soil and in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21: 529-533
- [41] McGill WB, Cannon KR, Robertson JA, Cook FD. Dynamics of soil microbial biomass and water soluble organic carbon in Breton after 50 years of cropping to two rotations. *Canadian Journal of Soil Science*, 1986, 66: 1-19
- [42] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 朱平, 任军, 梁成华, 彭畅, 高红军. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1891-1896
- [43] 孔维栋, 朱永官, 傅伯杰, 陈保冬, 童依平. 农业土壤微生物基因与群落多样性研究进展. 生态学报, 2004, 24(12): 2894-2900
- [44] 姚源喜, 杨延蕃, 刘树堂, 蔡秋芳, 邓迎海. 长期定位施肥对作物产量和土壤肥力的影响. 莱阳农学院学报(社会科学版), 1991, 8(4): 245-251
- [45] 张电学, 韩志卿, 王介元, 陈洪斌. 燕山山麓平原高产粮区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 267-272, 305
- [46] 王灿, 王德建, 孙瑞娟, 林静慧. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性. 生态环境, 2008, 17(2): 688-692
- [47] 孙瑞莲, 赵秉强. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410
- [48] 樊军, 郝明德. 长期施用化肥对黑垆土酶活性影响. 土壤肥料, 2003(5): 34-37
- [49] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986

- [50] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 张旭东, 邹德乙, 刘小虎. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响. 土壤通报, 2006, 37(2): 263-267
- [51] 周斌, 乔木, 王周琼. 长期定位施肥对灰漠土农田土壤质量的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 33-36
- [52] 崔键, 周静, 杨浩, 梁家妮, 刘晓利. 大气氮沉降向典型红壤区农田生态系统定量输入研究. 环境科学, 2009, 30(8): 2221-2226

Effect of Long-term Fertilization on Soil Fertility

GONG Wei^{1,2}, YAN Xiao-yuan¹, WANG Jing-yan²

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;
2 Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

Abstract: This paper reviewed the study advances on the effects of long-term fertilization measures on soil fertility indexes, such as soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium content, microbial biomass and counts as well as enzyme activities. It proves that organic manure and organic manure applied with chemical fertilizers were important for sustaining and improving soil fertility and beneficial for the sustainable development of agroecosystem.

Key words: Long-term fertilization, Soil fertility, Organic manure, Chemical fertilizer