

长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响

郭胜利^{1,2}, 周印东^{1,2}, 张文菊^{1,2}, 荣丽媛³, 刘振赏³, 高长青⁴

(1. 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100;
水利部
3 广宗县职教中心, 河北 邢台 054600; 4 长武县农技推广中心, 陕西 长武 713600)

摘 要: 结合世界各地长期试验的资料, 从土壤质量的角度综述了施用化肥对小麦、玉米、水稻产量影响, 并对长期施用化肥条件下土壤有机碳积累、剖面硝态氮累积和土壤理化性状的演变进行了分析。

关键词: 粮食生产; 化肥; 土壤质量性状

中图分类号: S143; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)01-0016-07

Effects of Long-term Application of Chemical Fertilizer on Food Production and Soil Quality Attributes

GUO Sheng-li^{1,2}, ZHOU Yin-dong^{1,2}, ZHANG Wen-ju^{1,2},
RONG Li-yuan³, LIU Zhen-shang³, GAO Chang-qing⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2 Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China;
3 Vocational Education Center of Guangzong County, Xingtai 054600, Hebei, China)
4 Changwu Agriculture Technology Extension Center, Changwu 713600, Shaanxi, China)

Abstract: In view of soil quality, it is reviewed that changes in yield of wheat, corn, and rice, and evolution in soil quality attributes such as soil organic carbon, pH, NO_3^- -N accumulation under long-term chemical fertilizer application.

Key words: food production; application of chemical fertilizer; soil quality attributes

粮食生产的持续发展是人类生存的基础, 而土壤质量的稳定和改善是粮食生产持续发展的关键。不同的管理措施会对粮食产量和土壤质量性状的产生显著不同影响。化肥的大量使用是提高粮食产量重要措施。据联合国粮农组织统计资料(FAOSTAT, 2000), 过去 40 年中, 世界粮食产量增加了 1 倍, 而粮食产量与氮、磷化肥的投入量具有极显著的线性正相关关系(图 1)。1999 年全世界的 N 肥使用量达到 8 500 多万 t, 其中我国约为 2 400 万 t, 占世界 N 肥用量的 28%^[1]。我国的粮食生产与氮、磷化肥的投入也存在密切相关性(图 1)。但长期的化肥投入对粮食持续生产和土壤质量的影响及其程度、趋势一直是人类关注的重要科学问题。本文以国内外长期试验研究资料为基础评述了这一领域的研究进展。

1 小麦、玉米和水稻自然生产力的特点以及化肥对粮食生产的贡献

小麦、玉米和水稻是目前世界上主要种植的粮食作物。地处温带洛桑试验站的 Broadbalk 资料表明(图 2), 即使采用新品种和管理措施, 小麦的自然生产力(不施肥时的产量称为自然生产力)一般变化不大, 基本维持在 $1.0 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右, 而施肥可以显著提高小麦的产量, 尤其在新品种上表现出更加显著的增产效果。例如, 1968 年以前, 氮肥处理 ($144 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 的粮食产量比不施氮肥处理高 $2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右; 1968 年采用改良品种以后, 施肥与不施肥的差异达到 $5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。施肥是保证了近 160 年(1843~ 2000 年)小麦

* 收稿日期: 2002-11-25

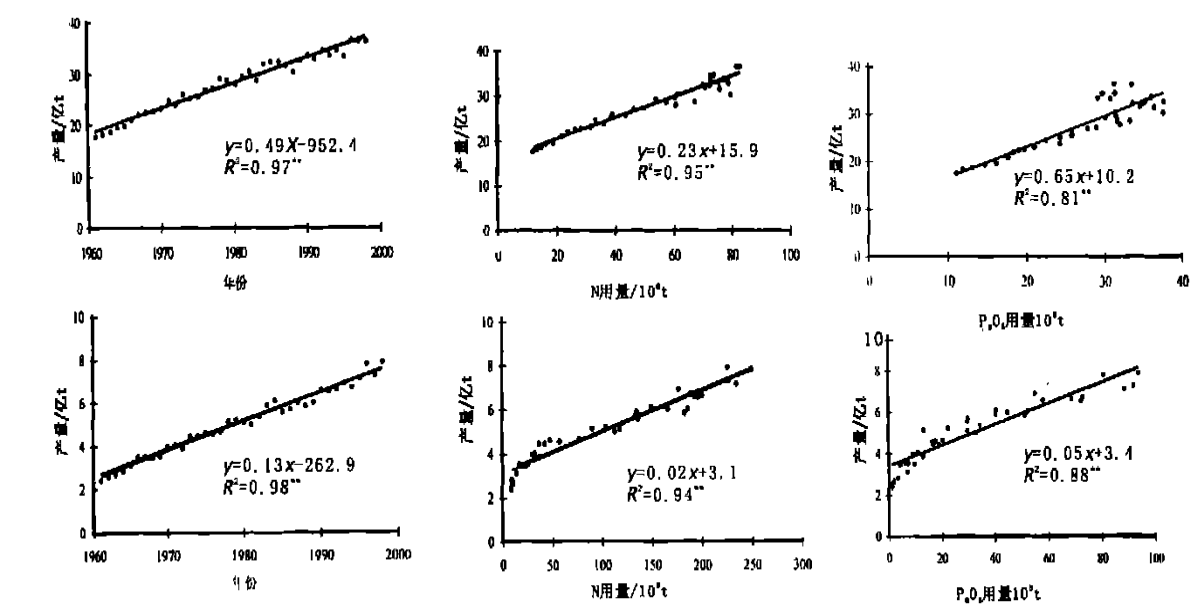
基金项目: “十五”国家科技攻关项目(2001BA508B18); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413)。

作者简介: 郭胜利(1969-), 男, 河北省栾城人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤养分与土壤生态研究。

产量稳定提高的重要管理措施。在加拿大, 连续种植玉米 35 年试验期间(1959~ 1993 年), 玉米的自然生产力呈明显的降低趋势(图 3), 统计分析显示每公顷玉米年降低量达 81 kg ($R^2=0.44, P<0.01$), 而施肥不仅提高而且还可以使玉米产量稳定在 6.02 t/hm² 产量水平, 比对照提高 2.8 倍。从印度 6 个试验点 13 年的产量资料中发现, 水稻的自然生产力在 5 个试验点不能维持, 13 年后与试验初相比降低幅度达 21%~ 38%^[2]。即使是施肥处理, 其水稻产量也有随时间延长不断降低的趋势。例如, 尼泊尔的稻麦轮作长期试验中(1978~ 1998 年), 无论施肥与否水稻产量都呈降低趋势, 其中施肥处理(NPK 肥) 第一季水稻产量年平均降低率为 0.09 t/hm²^[3]。在菲律宾国际水稻研究所, 新老品种两个处理的施

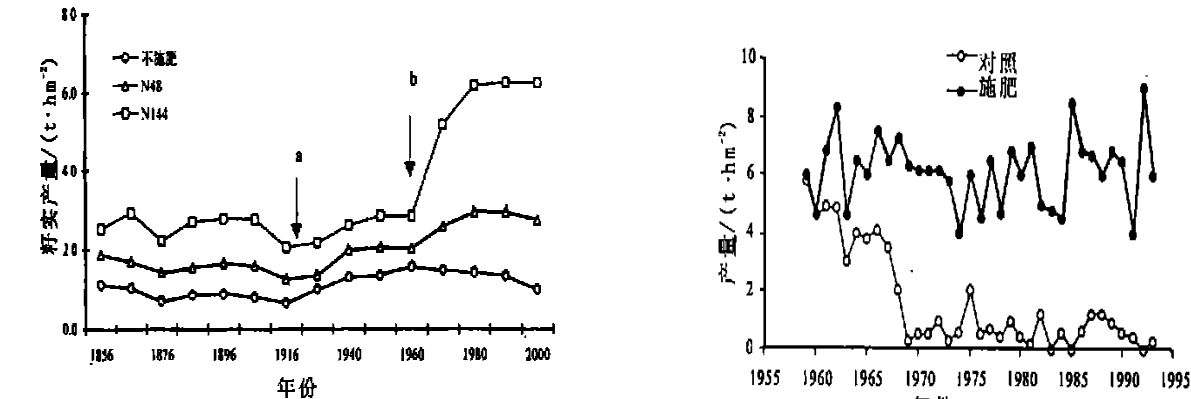
肥、杂草和病虫害防治都采用当地推荐的管理措施。从产量变化趋势看(图 4), 即使不断采用新品种(B 处理), 试验的 22 年时间里两处理的产量都在降低。只是采用新品种(B 处理) 后产量的波动性低于老品种(A 处理)^[4]。

根据世界各地长期试验资料(表 1), 小麦的自然生产力波动于 1~ 2 t/(hm²·a), 玉米波动于 1.6~ 4 t/(hm²·a) 的产量水平, 水稻波动于 0.4~ 1.1 t/(hm²·a) 的产量水平。施用化肥可使小麦、玉米和水稻产量分别提高 30%~ 400%、14%~ 285% 和 180%。我国冬小麦、玉米自然生产力与世界典型地区接近, 而水稻的单季自然生产力较高。由于水热条件的差异, 在我国从西北到东南作物自然生产力呈逐渐递增趋势(表 2)。



注: 粮食产量指谷类、粗粒类和根类产量之和; 数量来源于(FA 05TA T 2000)^[11]。

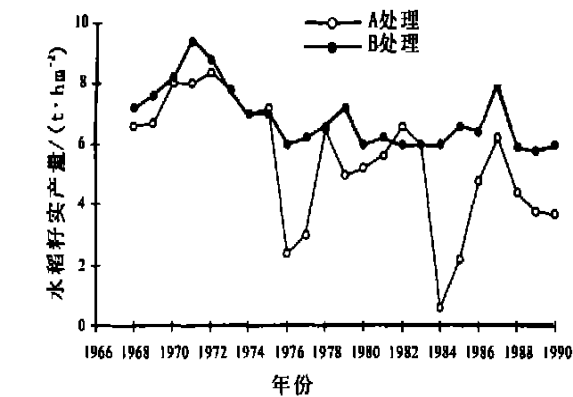
图 1 粮食产量变化及化肥(N、P)用量的关系(世界: 上, 中国: 下)



注: 箭头 a, 1926 后采用防治杂草及病虫害措施; b, 1968 年以后采用改良小麦品种。1985 以前的产量数据来自: Rothamsted Experimental Station Report for(1968, 1970 and 1978)^[49, 50, 51]。1985 以后的产量数据为洛桑试验站 Poulton 提供。

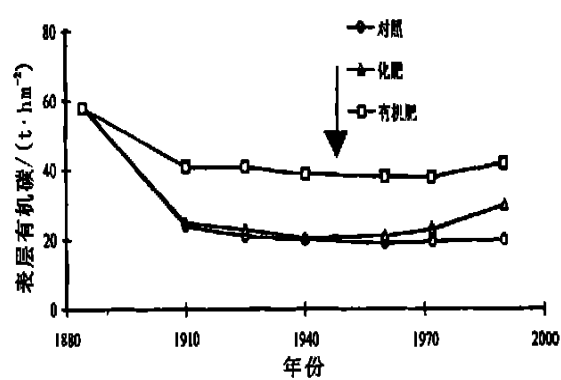
图 2 英国洛桑试验站 Broadbalk 典型处理中冬小麦产量变化

图 3 玉米连作条件下施肥与不施肥处理产量变化(Drury 等, 1995)^[48]



A 处理采用的是 60 年代培育的新品种 (IR 8),
B 处理采用试验期间育成的新品种。

图 4 养分充分供应条件下水稻产量长期产量
变化趋势(Cassman 等, 1995)^[4]



→ 1950 年以后开始秸秆还田, 31 自,Rasmussen 等(1998)^[52]。
图 5 美国 Sanborn field 小麦连作
处理土壤有机碳含量变化

表 1 世界部分长期试验产量与施肥

地 点	作 物	施肥量			平均产量 (t·hm ⁻²)	产量年限	资料来源
		N-	P-	K/(kg·hm ⁻²)			
英国洛桑(Broadbalk) (始于 1843 年)	小麦连作	0- 144-	0- 35-	0- 90	1. 40 6. 32	1985~ 2000 年	Poultton, 2001
美国(Ok lahom a, 502)	小麦连作	0- 90-	20- 20-	0- 0	1. 8 2. 81	1970~ 1988 年	Westem an 等, 1994 ^[14]
		112-	20-	0- 0	2. 67		
美国(Ok lahom a, 222)	小麦连作	0- 134-	29- 29-	0- 0	1. 48 1. 97	1969~ 1988 年	Westem an 等, 1994 ^[14]
美国(Ok lahom a, 505)	小麦连作	0- 134-	29- 29-	0- 0	1. 64 2. 73	1970~ 1988 年	Westem an 等, 1994 ^[14]
		269-	29-	0- 0	2. 59		
美国(Ok lahom a, 406)	小麦连作	0- 90-	0- 20-	0- 0	1. 51 2. 17	1965~ 1988 年	Westem an 等, 1994 ^[14]
		134-	20-	0- 0	1. 90		
澳大利亚(Waite) (始于 1925 年)	小麦连作	0- 0-	0- 0-	0- 0	0. 89	1925~ 1993 年	Grace 等, 1995 ^[45]
印度	小麦- 燕麦- 牧草- 休闲	0- 0-	0- 0-	0- 0	2. 64		
尼泊尔	稻麦双季	0- 0-	0- 0-	0- 0	1. 1	1984~ 1996 年	Yadav 等, 2000 ^[2]
	(小麦施肥, 产量)	120-	26-	33	3. 87		
尼泊尔	稻麦轮作	0- 0-	0- 0-	0- 0	0. 532	1978~ 2000 年	
加拿大(A lberta) (始于 1930 年)	(小麦施肥, 产量)	100-	13-	25	2. 301		
美国(Iow a, Mody)	春小麦连作	0- 0-	0- 0-	0- 0	0. 97	1952~ 1984 年	Janzen 等, 1987 ^[46]
	春小麦- 休闲	0- 0-	0- 0-	0- 0	1. 81		Janzen 等, 1987 ^[46]
美国(Iow a, Galve)	玉米连作	0- 112-	0- 0-	0- 0	3. 8 4. 3	1956~ 1972 年	Jolley 等, 1977 ^[13]
		0- 134-	0- 0-	0- 0	3. 8 5. 4	1958~ 1972 年	Jolley 等, 1977 ^[13]
美国(Illinois, Morrow) (始于 1876 年)	玉米连作	0- 224-	0- 0-	0- 0	3. 0 8. 0	1967~ 1978 年	Russell 等, 1984 ^[47]
	玉米- 大豆	0- 224-	0- 0-	0- 0	4. 7 9. 2	1967~ 1978 年	Russell 等, 1984 ^[47]
	玉米- 燕麦- 三叶草	0- 224-	0- 0-	0- 0	5. 9 9. 4	1967~ 1978 年	Russell 等, 1984 ^[47]
加拿大(Ontario) (始于 1959 年)	玉米连作	0- 128	0- 8-	0- 0	1. 59 6. 02	1959~ 1993 年	Drury 等, 1995 ^[48]
	玉米- 燕麦- 苜蓿	0- 128	0- 0-	0- 0	4. 57 7. 75	1959~ 1993 年	Drury 等, 1995 ^[48]
德国(Eternal Rye trial) (始于 1961 年)	玉米连作	0- 40-	0- 24-	0- 75	2. 94 7. 27	1962~ 1998 年	Lothar 等, 2000 ^[22]
印度	稻麦轮作	0- 120-	0- 26-	0- 33	1. 67 4. 62	1984~ 1996 年	Yadav 等, 2000 ^[2]
尼泊尔	稻麦轮作	0- 0-	0- 0-	0- 0	0. 399	1978~ 2000 年	Regmi 等, 2002 ^[3]
尼泊尔 (始于 1978 年)	第一季水稻	100-	13-	25	2. 760		
	稻麦轮作	0- 0-	0- 0-	0- 0	1. 066	1978~ 2000 年	
	第二季水稻	100-	13-	25	3. 082		

注: * 施肥量年间有变动,PK 用量不详。

表 2 我国主要长期试验中粮食产量

地点	作物	粮食产量/(kg · hm ⁻² · a ⁻¹)				肥料贡献率/%	产量年限/a	资料来源
		不施肥	N	NP	NPK			
陕西关中(西农)	冬小麦- 夏玉米	3750			9000	58.3	21	张一平等(1998) ^[53]
陕西关中(农科院)	冬小麦- 夏玉米	3313	4844	10808	10650	68.9	15	杨学云等(2000) ^[54]
陕西长武(长期试验)	冬小麦	1500	2027	3332		55.0	15	
陕西安塞(川旱地)	谷子(玉米)	2193	2616	4638		52.7	8	杨文治等(1992) ^[55]
甘肃平凉	小麦	2220	3405	4785		53.6	8	周广业等(1991) ^[29]
甘肃平凉	玉米	3735	4785	6945		46.2	8	周广业等(1991) ^[29]
甘肃	春小麦	2490	4695	6345	6870	63.8	10	孙小凤等(1996) ^[56]
青海	春小麦	3765	5085	6720	6750	44.2	10	金绍岭等(1996) ^[57]
河南	冬小麦- 夏玉米	5565	7155	11460	13080	57.5	10	朱洪勋等(1996) ^[58]
湖南长沙县	双季稻- 小麦	6034			13812	56.3		
湖南南县	双季稻	4382			9557	54.1	15	湖南省土肥站 2000 年资料
江西	双季稻	5730	6975	7440	8415	31.9	10	赖庆旺等(1996) ^[59]
上海	稻麦两熟	6780	10755	11460	12525	45.9	10	上海农科院土肥组(1996) ^[60]
广东	双季稻	6165	8310	10140	11415	46.0	10	周修冲等(1996) ^[61]

从上述世界各地长期试验资料可看出, 不同粮食作物产量及其施肥效应各具特点。连作条件下小麦的自然生产力可维持在一定的产量水平, 而玉米、水稻的自然生产力难以维持。施肥可以使小麦和玉米产量维持一定的高水平, 但在水稻上, 即使进行施肥其产量显著提高但长期维持较困难。

2 旱作条件下长期施肥对深层硝态氮积累的影响

尽管施用化肥对提高粮食产量具有一定的促进作用, 但由于利用率不高, 化肥生产力呈逐渐下降趋势。1982~ 1992 年 10 年间, 我国粮食产量增加了 27%, 单产增加了 31.7%, 而同期化肥用量却增加了 93.6%。林葆等^[5]统计研究发现, 我国氮肥的当季利用率 80 年代初与 50 年代末相比, 每 1 kg 氮增产稻谷由 15~ 20 kg/hm² 降低为 10 kg/hm², 玉米由 20~ 40 kg/hm² 降低为 13.4 kg/hm², 目前我国氮肥的当季利用率为 30%~ 40%, 远低于 20 年前。

氮肥施用对食物品质的影响越来越引起人们关注。王晶等^[6]综述了这一领域的研究进展。目前的研究主要集中于氮肥施用对蔬菜品质影响。

在多雨区或灌溉区, NO₃-N 淋失不仅是氮肥损失的主要途径, 也是影响水体环境的主要因素。对此曾引起许多学者的关注^[7, 8]。与多雨区或灌溉区相比, 干旱半干旱地区, 由于降水量降低, 淋失和反硝化作用很弱, 长期施用氮肥会造成过量 NO₃-N 在土壤深层的积累。例如, 樊军等^[9]发现, 小麦连作体系中 15 年后只施 N 肥(180 kg/hm²) 处理在 100~ 180 cm 土层导致 NO₃-N 的显著积累, 积累量达 601 kg/hm²。郭胜利等^[10]发现, 在坡地果园土壤上, 连续施肥超过 7 年就会发生深层 NO₃-N 的积累, 15 年后, 100~ 200 cm 土层 NO₃-N 的积累量达到 1400 kg/hm²。土壤深层 NO₃-N 的积累现象引起许多学者的关注^[9, 11~ 15]。但目前雨养农业区深层积累的 NO₃-N 对粮食生产和土壤生态环境的影响研究较少。

3 施用化肥对土壤有机碳积累的影响

有机碳是土壤的重要组成成分, 是土壤质量化学指标的

重要内容, 它同时是控制土壤物理、化学性状、生物学性状和肥力的重要因素, 具有改善土壤结构、保持水分和提高水分入渗、防止土壤侵蚀和退化、保持和提供植物养分等的重要作用, 是决定土壤质量的基本指标。通过土壤有机碳性状, 探讨土壤质量变化是土壤学和生态学关注的热点之一^[16~ 18]。但化肥对土壤有机碳含量影响的报道结论不一。美国 Illinois 州 Morrow Plot 中(始于 1876 年), 施用化肥对土壤有机碳的积累无影响; 在加拿大的 Alberta, Lethbridge 轮作试验区(始于 1951 年), 与不施肥处理相比, 增施氮肥对土壤有机碳积累无影响^[19]。但大部分长期试验, 例如, 美国密苏里州的 Sanborn field(始于 1888 年) 试验^[20]、英国洛桑的 Broadbalk 小麦连作试验(始于 1843 年)、丹麦的 The Askov long-term fertilization experiment(始于 1894 年)^[21]、美国的 The Old Rotation 试验(始于 1896 年)^[20]、德国 Halle 的 Eternal Rye 试验(始于 1878 年)^[22]、匈牙利 Martonvasar 的轮作施肥试验(始于 1961 年)^[23]等的结果表明, 长期化肥投入有助于土壤有机碳含量的提高。有机质含量较低的土壤上, 施用足量的化肥对提高土壤有机碳含量具有显著作用。但化肥对土壤有机碳的影响有一定的限度。一般而言, 长期施用化肥对土壤有机碳提高幅度为 20% 左右。在英国洛桑试验站(Broadbalk), 144 年后, 施用 NPK 肥土壤有机质含量比对照(9.3 g/kg) 提高 15%。国内长期试验的结果也存在上述两种看法: 施用化肥土壤有机质有所下降^[24, 25]; 施用化肥有助于促进土壤有机碳的积累^[26~ 29]。

作物生产与土壤有机碳变化是紧密相连的。土壤有机碳增加与有机物投入量呈线性相关。大气 CO₂ 进入土壤的途径是绿色植物的光合作用, 因此, 作物生物量的提高是化肥影响有机碳含量的基础。作物的秸秆的 C/N 一般为 20~ 40, 这表明作物每利用 1 gN, 将固定 20~ 40 g C。从这个意义上讲, 施用化肥有助于提高作物固定 CO₂ 的能力, 而这些碳将以秸秆、根茬或根系分泌物的形式进入土壤, 但光合产物进入土壤的多少将直接影响化肥的施用效果。

根系分泌物是作物向土壤输入有机碳的重要途径。Kuzakov 等^[30]根据近 10 年利用脉冲标记法测定的植物生长时间超过 100 d 的试验结果初步推断, 冬小麦和春小麦同

化产物的 20% ~ 30% 分配进入地下, 其中进入地下的碳大约 50% 形成根系组织, 33% 作为根和微生物的呼吸形式被消耗掉了, 其余部分存在于土壤和土壤微生物体中。冬小麦、玉米和春小麦通过根系进入土壤的有机碳一般为作物整个光合产物的 33%^[31, 32], 而草类植物通过根系产生的 CO₂, 可占到整个土壤植物系统 CO₂ 释放量的 51%^[33]。表 4 所列长期试验中, 化肥对有机碳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。作物地上部分全部收走, 土壤有机碳含量主要依靠根茬和根系分泌物的输入来维持; 增施化肥, 根茬和根系分泌物的输入量增加越多化肥对有机碳提高作用越明显。这一点可从化肥对产量提高作用上得到间接证明。洛桑 Broadbalk 化肥处理, 有机碳比对照提高 15%, 其产量为对照的 5 倍左右。在加拿大, Ridley 等^[34]根据 37 年的定位试验研究结果表明, 化肥对有机质含量无影响, 而施用化肥的增产作用很小的结果与此相一致, 土壤试验的基础肥力较高(有机质含量高达 3.6% 以上), 可能是造成这一试验结果的原因。美国 Sanborn field 长期试验地(始于 1888 年, 之前为草地)在 1950 年以前, 小麦连作处理秸秆不还田, 对照与化肥处理的有机碳含量相差不大。但 1950 年以后, 由于采用秸秆还田技术, 对照与化肥处理的差异显著扩大, 并且化肥处理土壤有机碳含量不断降低的趋势开始逆转(图 5)。据此可以推测, 在黄土高原地区, 如果秸秆还田, 化肥的作用将会更显著。任何有助于促进作物生物量提高(品种改良)、增加有机物投入(秸秆还田)、降低有机物分解(免耕或少耕)的措施都会促进化肥作用得到更好发挥。

4 长期施肥条件下土壤理化性状的变化

化肥的应用对提高粮食生产做出了重大贡献, 但随着化肥投入的日益增加, 其负面影响也逐渐凸现出来。由于施用化肥造成的土壤酸化加剧就是一个比较突出的问题。洛桑试验站 Geescroft Wilderness 的表土 pH 值从 1883~ 1991 年由 6.2 降低到 3.8, Park Grass 的表土 pH 则由 1876 年的 5.2 到 1991 年降低 4.2^[35]。在洛桑试验站的 Woburn 试验区(始于 1876 年), 由于土壤酸化致使连续种植 15 年以后小麦产量开始降低, 而这一趋势在施用氮肥的处理中最明显, 1898 年以后尽管使用石灰来进行校正, 但产量依然没有恢复到试验初始的水平。在美国半干旱地区偏碱性土壤上, 长期以来由于大量使用铵态氮肥造成了土壤酸度的提高并影响了粮食生产。为维持粮食生产, 不得不靠增施石灰来调节土壤

pH^[36]。始于 1886 年的洛桑 Park Grass 试验表明, 尽管土壤酸化是酸雨、植被等多方面因素综合影响的结果, 但是长期使用铵态氮肥加剧了土壤酸化的速度^[37]。土壤酸度的提高还会影响其盐基饱和度、阳离子交换量(CEC)的特性, 致使土壤溶液中的 Mn、Al 离子移动性增强^[35]。此外, 由于土壤 pH 值的降低, 导致地表植被群落结构发生了改变^[39]。在 Park Grass 长期试验中发现, 由于土壤酸度增加, 重金属移动增强, 牧草中金属 Al 离子含量显著提高, 也使得 Al 离子污染地下水的威胁增大^[40]。

由于长期施用化肥, 还可导致土源病虫害的增加。在洛桑试验站的长期试验地 Woburn, 长期施用铵态氮肥对小麦产量的影响与严重线虫病有关。在菲律宾国际水稻研究所长期试验中, 在养分充分供应的条件下, 无论新品种还是老品种, 其产量随时间延长都有不断降低的趋势(图 4), 其原因与大量氮肥投入引发水稻枯萎病发生频率增加和严重性有关^[41]。

长期施用化肥导致的土壤重金属累积及其对粮食品质和土壤污染的影响也越来越受到人们的关注。化肥尤其磷肥生产中一些重金属元素基本残存在磷肥产品中。一些长期试验结果表明, 长期施用磷肥会提高土壤 Cd 含量。但长期施用磷肥对作物品质影响的报道目前尚不统一, 英国洛桑试验站因施用无机 N、P、K 肥(年施 N 144 kg/hm²、P 35 kg/hm²、K 90 kg/hm²), 100 年间(1880~ 1980 年)小麦籽粒 Cd 含量由 0.050 mg/kg 上升至 0.080 mg/kg^[41]。但美国密苏里(Missouri)大学 Sanborn 试验地, 连续 40 年磷肥施用试验表明, 即使土壤 Cd 含量由 0.290 mg/kg 上升至 0.426 mg/kg, 小麦籽粒 Cd 含量也均低于对照^[42]。Gavi 等^[43]报道, 多项长期肥料试验结果对比表明, 小麦籽粒 Cd 含量并未显著上升。我国磷肥中 Cd 含量较低, 每年因施用磷肥而输入农田的 Cd 量仅为 0.224~ 0.336 g/hm², 以我国土壤的最大允许施入 Cd 绝对量 0.7~ 6.4 kg/hm² 计算, 施用磷肥近期不致产生环境问题^[44]。尽管如此, 为防止长期施用磷肥造成土壤质量的降低, 澳大利亚等国家都相应制定了土壤肥料作物产品中 Cd 允许含量标准。

上述的研究表明长期施用化肥在促进粮食生产的同时, 也给其持续发展带来新的挑战。这些研究对未来土壤管理调控将具有重要的参考价值。在黄土高原地区尽管目前尚未出现上述现象但近 20 年来化肥的大量投入对土壤质量的影响应引起我们的关注。

参考文献

- [1] FAO. FAOSTAT [EB]. www. fao. org
- [2] Yadav R L, B S Dwivedi, P S Pandey. Rice- wheat cropping system: assessment of sustainability under green manuring and chemical fertilizer inputs[J]. Field Crops Research. 2000, 65, 15- 30
- [3] Regmi A P, J K Ladha, H Pathak. Yield and soil fertility trends in a 20-year rice- wheat experiment in Nepal[J]. Soil Sci Soc Am. J., 2002, 66, 857- 867.
- [4] Cassman, K G, Pingali, P L. Agricultural sustainability in economic, environmental, and statistical considerations[M]. (Wiley, London) eds Barnett, V., Payne, R & R. Steiner, 1995 63- 84
- [5] 林葆. 我国肥料结构和肥效演变、存在问题及对策[A]. 见: 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998 12- 27.

- [6] 王晶, 张福锁, 曹一平. 施用氮肥与食品安全的关系[A]. 见: 李生秀. 土壤- 植物营养研究文集[C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 822- 826
- [7] 朱兆良. 土壤中氮素转化和移动的研究近况[J]. 土壤学进展, 1979, (2): 1- 16
- [8] Keeney, D R. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution[A]. In: F J Stevenson (ed), Nitrogen in Agricultural Soils[M]. Am. Soc Agron Madison, Wis. 1982. 605- 650
- [9] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 长期施肥条件下土壤剖面中硝态氮的分布[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 23- 26
- [10] 郭胜利, 郝明德, 党廷辉. 等. 黄土高原沟壑区小流域 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 的积累特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2003(2).
- [11] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤剖面中矿质氮的分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(1): 22- 27.
- [12] 袁新民, 同延安, 杨学云. 等. 有机肥对土壤 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 197- 200
- [13] Jolley, V D, Pierre, W H. Profile accumulation of fertilizer-derived nitrate and total nitrogen recovery in two long-term nitrogen rate experiments with corn[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1977, 41, 373- 378
- [14] Westerman, R L, Boman, R K, Raun, W R, et al Ammonium and nitrate nitrogen in soil profiles of long-term winter wheat fertilization experiments[J]. Agron J, 1994, 86(1): 94- 99
- [15] Halvorson, A D, C A Reule. Nitrogen fertilizer requirements in an annual dryland cropping system [J]. Agron J. 1994, 86, 315- 318
- [16] Doran, J W, Parkin, T B. Defining and assessing soil quality[A]. In: Doran, J W et al Defining Soil Quality for a sustainable environment[M]. Madison: Wisconsin SSSA Special Publication Number 35, American Society of Agronomy, 1994. 3- 21.
- [17] Gregorich, E G, Carter, M R, Angers, D A, et al Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1994, 74, 367- 385
- [18] Hayens R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32, 211- 219
- [19] Bremer, E, Janzen, H H, Johnston, A M. Sensitivity of total light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil[J]. Can. J. Soil Sci. 1994, 74, 131- 138
- [20] Mitchell, C C, Westerman, R L, Brown, J R, et al Overview of long-term agronomic research[J]. Agron. J. 1991, 83, 24- 29
- [21] Schjønning, P, Christensen, B Y, Carstensen, B. Physical and chemical properties of sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years[J]. European J. Soil Sci., 1994, 45, 257- 268
- [22] Lothar, S, K Warnstorff, Dorfel, H, et al The Influence of fertilization and rotation on soil organic matter and plant yields in the long-term Eternal Rye trial Halle (Saale), Germany [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000, 163 (6): 639- 648
- [23] Berzsenyi, Z, Gyorffy, B, Lap, D Q. Effect of crop rotation and fertilization on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment[J]. Journal of Agronomy, 2000, 13(2- 3): 225- 244
- [24] 陈福兴, 秦道珠, 谢良商. 长期施用有机肥对土壤养分平衡及增产作用- 肥料效应监测试验结果[J]. 土壤肥料, 1991, (1): 13- 16
- [25] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 1- 5
- [26] 戴万宏. 黄土肥力与肥料效益定位研究[J]. 西北农业学报, 1999, 8(6): 93- 97
- [27] 郑剑英, 赵更生, 吴瑞俊. 连续施用有机肥与化肥对黄绵土的培肥效应[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 18- 22
- [28] 吕家珑, 汤代良, 王旭东. 等. 农田生态对土壤肥力的保护效应[A]. 长期土壤培肥定位实验课题组(编). 二十一年土壤培肥试验的启示(资料)[Z]. 1998. 9- 13
- [29] 周广业, 丁宁平. 旱塬黑垆土肥料长期定位研究[J]. 土壤肥料. 1991, (1): 10- 13
- [30] Kuzyakov Y, JK Friedel, K Stahr. 2000b. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biol Biochem. 2000b, 32: 1485- 1498
- [31] Swinnen J, Van Veen JA, Merckx R. Carbon fluxes in the rhizosphere of winter wheat and spring barley with conventional vs integrated farming[J]. Soil Biol Biochem. 1995, 27, 811- 820
- [32] Zagal E, Bjamason S, Olsson, U. Carbon and nitrogen in the root zone of barley supplied with nitrogen fertilizer at two rates[J]. Plant and Soil 1993, 157, 51- 63
- [33] Kuzyakov, Y, A Kretschmar, K Stahr. Contribution of Lolium perenne rhizodeposition to carbon turnover of pasture soil[J]. Plant and Soil 1999, 213, 127- 136
- [34] Ridley, A O, Hedlin, R A. Soil organic matter and crop yields as influenced by the frequency of summer fallowing[J]. Can. J. Soil Sci. 1968. 48, 315- 322
- [35] Blake, L, Goulding, K W T, Mott, C J B et al Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100

- years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station[J]. U.K. European Journal of Soil Science, 1999, 50: 401- 412
- [36] Rasmussen, P E, Rohde, C R. Soil acidification from ammonium - nitrogen fertilization in moldboard plow and stubble-mulch wheat fallow tillage[J]. Soil Sci Soc Am. J. , 1989, 53(1): 119- 122
- [37] Johnston, A E, Goulding, K W T, Poulton, P R. Soil acidification during more than 100 years under permanent grassland and woodland at Rothamsted[J]. Soil Use and Management, 1986, 2(1): 3- 10
- [38] Blake, L, Johnston, A E, Goulding, K W T. Mobilization of Aluminium in soil by acid deposition and its uptake by grass cut for hay - a Chemical Time Bomb[J]. Soil Use and Management, 1994, 10, 51- 55
- [39] Goulding, K W T, Bailey, N J, Bradbury, N J. et al Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil progresses[J]. New Phytologist 1998, 139, 49- 58
- [40] Blake, L, Johnston, A E, Goulding, K W T. Mobilization of Aluminium in soil by acid deposition and its uptake by grass cut for hay - a Chemical Time Bomb[J]. Soil Use and Management, 1994, 10, 51- 55
- [41] Johnston, J. Cadmium in cereal grain and herbage from long-term experiments plots at Rothamsted[J]. U.K. Environ. Pollut. , 1989, 57, 199- 216
- [42] Mortvedt J J. Cadmium levels in soils plants from some long-term soil fertility experiments in the United States of America[J]. J. Environ. Quality, 1987, 16: 137- 142
- [43] Gavi, F, Basta, N T, Raun, W R. Wheat grain cadmium as effected by long-term fertilization and soil acidity[J]. J. Environ Qual. , 1997, 26, 265- 271
- [44] 鲁如坤, 时正元. 我国磷矿磷中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150- 157
- [45] Grace, P R, Oades, J M, Keith, H et al Trends in wheat yields and soil organic carbon in the permanent rotation trial at the Waite Agricultural Research Institute, South Australia[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture 1995, 35(7): 857- 864
- [46] Janzen, H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations Can. J. Soil Sci 1987, 67, 845- 856
- [47] Russell, T O, Dell, S W, Melsted, W, Iliam M Walker. Changes in organic carbon and nitrogen of Morrow plots soils under different treatments 1904~ 1973, Soil Sci 1984, 137, 160- 171.
- [48] Drury, C F, CS Tan. Long-term (35 years) effects of fertilization, rotation and weather on corn yields[J]. Can. J. Plant Sci 1995, 75, 355- 362
- [49] Rothamsted Experimental Station. Report for 1968: part 2[R]. 1968 115
- [50] Rothamsted Experimental Station, Details of the classical and long-term experiments up to 1967[R]. Harpenden, 1970 11- 24, 48- 55, 78- 87, 96- 113
- [51] Rothamsted Experimental Station. Details of the classical and long-term experiments[R]. Harpenden, 1978 4- 15, 36- 39
- [52] Rasmussen, P E, K W T Goulding, J R Brown, et al Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change[J]. Science, 1998, 282, 893- 896
- [53] 杨学云, 孙本华, 王彩绒. 等. 黄土施肥效应与肥力演变的长期定位监测初报(报告)[R]. 2000
- [54] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992 159
- [55] 孙小凤, 等. 农田施肥效应和土壤肥力演变定位监测研究[A]. 见: 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 50- 60
- [56] 金绍龄, 马用春. 长期施用不同肥料对作物产量和土壤肥力的影响[A]. 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 153- 160
- [57] 朱洪勋, 等. 黄潮土肥料长期定位研究[A]. 见: 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 123- 133
- [58] 赖庆旺, 等. 1996 红壤性水稻土连续施肥的生物效应与肥力特性[A]. 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 60- 69
- [59] 上海农业科学院土壤肥料研究所施肥方案组. 稻麦轮作条件下农田化肥效应和土壤肥力长期定位监测[A]. 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 78- 90
- [60] 周修冲, 等. 水稻肥料效应长期定位研究[A]. 林葆等. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996 26- 34