

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.014

陈智坤, 郝雅琚, 任英英, 等. 长期定位施肥对两种小麦耕作系统土壤肥力的影响. 土壤, 2021, 53(1): 105–111.

长期定位施肥对两种小麦耕作系统土壤肥力的影响^①

陈智坤¹, 郝雅琚², 任英英¹, 井光花¹, 王哲³, 郝明德^{3*}

(1 陕西省科学院土壤资源与生物技术应用重点实验室, 陕西省西安植物园(陕西省植物研究所), 西安 710061; 2 西安浐灞生态区管理委员会, 西安 710061; 3 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为寻求既能提高土壤肥力又能改善土壤环境的科学施肥模式, 本研究以黄土高原长武 30 a 长期小麦连作和小麦-豌豆两个轮作系统为研究对象, 以长期肥料定位试验(包括氮磷+有机肥配施 NPM、氮磷配施 NP、单施磷肥 P、单施氮肥 N、单施有机肥 M 和 CK)土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、全磷和全钾为基础数据, 应用土壤的综合肥力指标值(integrated fertility index, IFI)对长期定位施肥的土壤肥力进行定量综合评价。结果表明: ①小麦-豌豆轮作系统在不同施肥处理下土壤养分含量普遍高于小麦连作系统, 且在两种耕作系统下施用氮磷+有机肥各养分含量增幅明显。②各处理间土壤综合肥力指数表现为: 小麦-豌豆轮作+NPM>小麦连作+NPM>小麦-豌豆轮作+NP、小麦连作+NP>小麦-豌豆轮作+P、小麦连作+P>小麦连作+M>小麦-豌豆轮作+不施肥>小麦连作+不施肥。③小麦连作系统有机质、全磷、全氮和速效磷与土壤综合肥力指数 IFI 之间呈显著相关关系, 碱解氮和速效钾与 IFI 不相关; 在小麦-豌豆轮作系统中, 碱解氮与全磷对 IFI 呈显著正相关关系。综上, 综合肥力指数能较好地反映土壤肥力状况, 长期施用氮磷+有机肥相较单施氮磷肥、有机肥的土壤综合肥力要高, 小麦-豌豆轮作系统土壤综合肥力优于小麦轮作系统, 且不同耕作系统对土壤养分和土壤肥力的关系有一定的影响。

关键词: 长期定位施肥; 小麦连作系统; 小麦-豌豆轮作系统; 土壤综合肥力指数

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Fertilization on Soil Fertility Under Different Wheat Cultivation Systems

CHEN Zhikun¹, HAO Yajun², REN Yingying¹, JING Guanghua¹, WANG Zhe³, HAO Mingde^{3*}

(1 Key Laboratory of Soil Resources & Biotech Applications, Shaanxi Academy of Sciences, Xi'an Botanical Garden (Institute of Botany of Shaanxi Province), Xi'an 710061, China; 2 Chanba Ecological District Management Committee, Xi'an 710061, China; 3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To find the scientific fertilization mode for improving soil fertility and environment, wheat continuous cropping and wheat-pea rotation in Changwu County of Shaanxi Province on the Loess Plateau were chosen as the research objects in this study. 30 a long-term fertilization experiments, including application of nitrogen, phosphorus and manure (NPM), application of nitrogen and phosphorus (NP), application of single nitrogen (N), application of single phosphorus (P), application of single manure (M), and no fertilization (CK), were carried out to monitor and determine the changes of soil organic matter, alkali nitrogen, available phosphorus and potassium, total phosphorus and potassium, as well as soil fertility represented by integrated fertility index (IFI). The results showed that: 1) Soil nutrient contents in wheat-pea rotation were generally higher than those in wheat continuous cropping under different fertilization treatments. Application of nitrogen phosphorus and manure significantly increased nutrient contents under the two tillage systems. 2) IFI was in order of wheat-pea + NPM > wheat cropping + NPM > wheat-pea rotation + NP, wheat cropping + NP > wheat-pea + P, wheat cropping + P > wheat cropping + M > wheat-pea > wheat cropping. 3) IFI was significantly correlated with organic matter, total phosphorus and nitrogen, available phosphorus in wheat continuous cropping, while positively correlated with alkali solution nitrogen and total phosphorus in wheat-pea rotation. In summary, IFI can reflect soil fertility condition, soil fertility of NPM treatment is higher than single fertilization, soil fertility under wheat-pea rotation is higher than wheat continuous cropping, different tillage systems differently influence the correlation

①基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102401)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120204110013)资助。

* 通讯作者(mdhao@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 陈智坤(1987—), 男, 陕西洋县人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤环境质量评价。E-mail: zhikunchen@ms.xab.ac.cn

between soil nutrient and fertility.

Key words: Long-term in-situ fertilization; Wheat continuous cropping system; Wheat-pea rotation system; Integrated fertility index (IFI)

小麦, 作为我国重要的粮食作物之一, 是我国最重要的商品粮食和贮藏物质^[1]。长期定位试验具有时间的长期性、气候的重复性和数据的连续性等特点, 既可揭示土壤肥料效益演变、肥效规律和土壤质量变化^[2-4], 又可弥补和完善许多短期试验所面临的科学问题^[5-6]。故研究长期定位下小麦不同耕作方式对土壤质量和土壤肥力累积情况的影响^[7], 能够科学地评价耕作对土壤各方面指标的长期作用, 在生产上可提供决策性建议, 对小麦作物产量的影响具有重要的现实意义^[8]。

国外长期定位肥料试验始于 1843 年 Lawes 爵士和 Gilbert 爵士建立的英国洛桑土壤肥料长期定位试验站, 之后, 德国、美国、丹麦和日本等国家相继建立了长期肥料试验站^[9-10]。长期肥料试验为世界农业发展、合理施用化肥、提高农作物产量和品质打下了坚实的理论和实践基础。我国长期定位试验起步较晚, 虽不能与国外的经典长期定位肥料试验相比, 但我国涉及的定位试验数量多、地域分布广, 具有很强的针对性和目的性, 在土壤碳、氮、磷、钾等养分含量方面开展了大量研究, 在实践应用方面也积累了大量宝贵的经验^[11-13], 如长期施有机和无机肥能使土壤有机质、全氮以及硝态氮含量有较大幅度增加^[14-16]。土壤的综合肥力指标(integrated fertility index, IFI)在一定程度上可避免主观随意性的影响, 能对大量信息进行处理, 较好地综合反映土壤肥力高低^[17], 故 IFI 在不同区域各土壤类型和不同作物上的土壤综合肥

力评价得到广泛应用, 取得显著成果。然而, 大量研究主要是进行不同肥料单施及配施的定位试验, 涉及耕作方式、肥料及其互作的黄土高原沟壑区长期定位不同轮作系统施肥对土壤肥力的数值化综合评价报道较少。

因此, 本研究以长武县为试验点, 以小麦连作系统和小麦-豌豆轮作系统为研究对象, 以土壤综合肥力指标为评价指标, 借助长期野外定位和室内分析相结合的方法, 系统分析不同小麦轮作系统下施加不同无机肥和有机肥对土壤养分的影响, 综合评价在长期定位两种耕作系统不同施肥条件下土壤肥力的变化特征和肥效规律^[18], 初步探讨不同轮作系统对土壤养分和土壤肥力关系的影响, 以期改善土壤环境和提高土壤肥力提供数据支撑, 为区域农业生产可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区域地处陕西省咸阳市长武县, 位于黄土高原的中南部, 地理位置 107°38'49" ~ 107°58'02"E, 34°59'09" ~ 35°18'37"N, 属于黄土高原沟壑区, 塬面平坦宽阔, 黄土堆积深厚, 土壤类型为黏化黑垆土。试验于 1984 年开始, 持续 30 余年, 试验地海拔 1 200 m, 年均降水量 578.5 mm, 年均气温 9.2 ℃, >10 ℃积温 3 019 ℃, 无霜期 172 d, 属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 是典型的雨养农业区。试验区域土壤肥力状况如表 1 所示。

表 1 试验区土壤养分含量背景值

Table 1 Background values of soil nutrients in test area

碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
37.00 ± 1.33	3.00 ± 0.11	185.36 ± 28.89	10.50 ± 0.38	0.57 ± 0.02	0.66 ± 0.03

1.2 试验设计与分析方法

从长期定位试验中选取 2 大类, 10 个试验组, 分别是: ①轮作种植系统, 分为小麦-豌豆轮作种植系统的 NP(氮、磷肥配施)、NPM(氮、磷、有机肥配施)、P(单施磷肥)、CK(不施肥); ②小麦连作种植系统的 NPM(氮、磷、有机肥配施)、NP(氮、磷肥配施)、P(单施磷肥)、N(单施氮肥)、M(单施有机肥)、CK(不施肥)开展研究工作, 每个试验组 3 个重复。

定位试验 30 a 后, 即 2014 年小麦收获期按小区

随机在两个小麦耕作系统各处理采集耕层(0 ~ 20 cm)土壤样品, 测定其有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾等含量。有机质采用重铬酸钾法测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗分光光度法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 速效磷采用 Olsen 法测定, 速效钾采用火焰光度法测定, 测定方法详见《土壤农化分析》^[19]。

1.3 数据处理

各项肥力指标测定数据及肥力综合评价结果采

用 Microsoft Excel 2007 进行分析与处理,数据方差分析应用 DPS 7.05 软件进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$),所有数据均以平均值 $\pm$ 标准差表示。

1.4 土壤肥力综合指标值计算

1.4.1 土壤肥力指标因素的选取 在进行土壤肥力综合指数计算时,指标的选取直接影响到土壤肥力评价的真实性、合理性和科学性,故土壤肥力评价指标应全面、综合地反映土壤肥力的各方面^[20]。选取指标因素的原则是:①指标对作物生长发育和生产力影响大;②指标应以稳定性高的土壤养分含量为主;③指标间差异较大、相关性小^[21]。综合目前长期定位试验肥力评价研究^[22-23],本文选取有机质、全氮、碱解氮、速效磷和全磷 5 项土壤基本养分指标计算土壤综合肥力。

1.4.2 隶属度值的确定 由于不同土壤肥力评价指标最适范围不同,量纲也存在差异,因此首先对原始数据进行标准化处理,使得处理后的数据区间处于

[0.1, 1]。根据土壤养分特性和植物生长需求,参考已有研究结果可知^[24],全氮、碱解氮、有机质、全磷、速效磷和速效钾等属性采用 S 型隶属函数,隶属度函数为:

$$F(X)=\begin{cases} 1.0 & X > X_2 \\ 0.9(X-X_1)/(X_2-X_1)+0.1 & X_1 < X < X_2 \\ 0.1 & X < 0 \end{cases}$$

探讨长期施肥对不同小麦耕作系统土壤肥力状况的影响,观测各个土壤养分指标不同时期的动态变化,并对土壤养分定位观察,根据全国第二次土壤普查养分分级标准(表 2)确定隶属函数中转折点的取值 X_1 、 X_2 (表 3)。根据上述隶属度函数以及转折点的取值,计算各肥力指标的隶属度值(表 4)。隶属度值大小介于 0.1~1.0,反映了其隶属的程度,最大值 1.0 表示土壤肥力最好,适宜作物生长;最低值 0.1 表示土壤肥力严重缺乏。土壤中不可能没有某种养分,为符合生产实际和消除各参数指标间的量纲差异,故将最小值定为 0.1。

表 2 全国第二次土壤普查养分分级标准
Table 2 Soil nutrient grading standard of 2nd national soil survey

等级	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
一级	>150	>40	>200	>40	>2	>1
二级	120~150	20~40	150~200	30~40	1.5~2.0	0.8~1.0
三级	90~120	10~20	100~150	20~30	1.0~1.5	0.6~0.8
四级	60~90	5~10	50~100	10~20	0.75~1.0	0.4~0.6
五级	30~60	3~5	30~50	6~10	0.5~0.75	0.2~0.4
六级	<30	<3	<30	<6	<0.5	<0.2

表 3 土壤养分隶属度函数转折点的取值
Table 3 Values of turning points of membership functions of soil nutrients

转折点	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
X_1	30	3	30	6	0.5	0.2
X_2	150	40	200	40	2	1

表 4 土壤养分隶属度值和 IFI
Table 4 Soil nutrient membership values and IFI

耕作系统	施肥处理	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	全氮	全磷	IFI
小麦连作	NPM	0.69	1.00	1.00	0.49	0.42	1.00	75.39
	NP	0.60	0.73	0.67	0.33	0.25	0.98	60.14
	P	0.10	1.00	0.76	0.26	0.17	1.00	56.75
	N	0.38	0.14	0.77	0.24	0.15	0.87	42.34
	M	0.10	0.79	1.00	0.36	0.27	0.75	53.73
	CK	0.10	0.10	0.80	0.25	0.15	0.57	31.65
小麦-豌豆轮作	NPM	0.38	1.00	0.70	0.52	0.99	1.00	80.02
	NP	0.44	0.71	1.00	0.36	0.29	0.99	62.5
	P	0.11	1.00	0.68	0.29	0.18	1.00	57.08
	CK	0.10	0.14	0.73	0.27	0.18	0.56	32.47

1.4.3 权重的确定 各项指标对土壤肥力的贡献是不同的,对各项指标应给以一定的权重。为避免人为的主观影响,应根据土壤肥力各要素之间的相关系数来确定权重系数^[25]。计算步骤为:①求单项肥力指标之间的相关系数(表 5);②求某项肥力指标与其

他肥力指标之间相关系数的平均值,并根据该平均值占有所有肥力指标相关系数平均值总和的百分比(权重系数),作为该单项肥力指标在表征土壤肥力中的贡献(表 6),两项指标若呈负相关,计算相关系数取绝对值。

表 5 各评价指标间的 Pearson 相关系数矩阵
Table 5 Pearson correlation matrix of soil fertility indicators

土壤指标	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	全氮	全磷
碱解氮	1					
速效磷	0.250	1				
速效钾	0.312	0.143	1			
有机质	0.611	0.749 [*]	0.487	1		
全氮	0.390	0.761 [*]	0.059	0.863 ^{**}	1	
全磷	0.535	0.861 ^{**}	0.101	0.632	0.567	1

注: *、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平,下同。

表 6 肥力指标的相关系数和权重系数
Table 6 Correlation coefficient averages and weighting coefficients of soil fertility indicators

系数	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	全氮	全磷
相关系数平均值	0.52	0.70	0.41	0.83	0.78	1
权重系数	12.16	16.55	9.70	19.59	18.45	23.55

根据权重累加法,土壤的综合肥力指标(IFI)^[26-27]为:

$$IFI = \sum_{i=1}^n Wi \times Ni \tag{1}$$

式中: Ni 和 Wi 分别表示第 i 项隶属度值和权重系数。IFI 值越大,表明土壤的综合肥力水平越高。

2 结果

2.1 小麦连作与小麦-豌豆轮作长期定位施肥对土壤养分的影响

在 30 a 长期定位不同施肥条件下,小麦-豌豆轮作系统土壤养分含量总体上高于小麦连作系统(表 7)。与连作系统相比较,小麦轮作系统未施肥土壤样

地(CK)、磷肥添加样地(P)、氮磷配施样地(NP)和氮磷+有机肥配施样地(NPM)土壤有机质分别增加了 1.1、1.13、1.25 和 1.22 g/kg。除 NPM 样地轮作系统全氮含量显著高于连作系统外,其他不同施肥样地两种耕作系统土壤全氮含量差异不显著。土壤全磷只在 P 处理条件下,轮作系统显著高于连作系统,增加了 8%。土壤速效钾含量在 NPM 处理下连作系统显著高于轮作系统,其余施肥处理下两种系统差异不显著。土壤速效磷在不同施肥处理下,轮作系统均高于连作系统,以 NPM 增幅最明显。土壤碱解氮含量,在不同施肥条件下连作系统显著高于轮作系统。

表 7 长期不同施肥处理土壤养分差异
Table 7 Soil nutrient contents under different fertilization after 30 years

种植系统	施肥处理	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
小麦连作	NPM	108.13 ± 3.90 a	51.05 ± 1.84 b	500.36 ± 144.78 a	20.59 ± 0.74 b	1.03 ± 0.04 b	1.13 ± 0.04 ab
	NP	97.33 ± 3.51 b	29.05 ± 1.05 de	138.12 ± 11.87 c	14.74 ± 0.53 d	0.75 ± 0.03 c	0.98 ± 0.04 c
	P	9.18 ± 0.33 g	46.20 ± 1.67 c	153.91 ± 10.02 c	11.94 ± 0.43 fg	0.61 ± 0.02 d	1.01 ± 0.04 c
	N	67.42 ± 2.43 d	4.78 ± 0.17 f	156.11 ± 14.20 c	11.47 ± 0.41 g	0.58 ± 0.02 d	0.88 ± 0.04 d
	M	20.39 ± 0.74 e	31.44 ± 1.13 d	470.34 ± 37.48 a	15.80 ± 0.57 c	0.78 ± 0.03 c	0.78 ± 0.03 e
	CK	13.59 ± 0.49 f	3.12 ± 0.11 df	161.33 ± 24.67 c	11.49 ± 0.41 g	0.58 ± 0.02 d	0.62 ± 0.02 f
小麦-豌豆轮作	NPM	67.75 ± 2.44 d	78.96 ± 2.83 a	301.67 ± 96.31 b	21.81 ± 0.78 a	1.99 ± 0.07 a	1.18 ± 0.05 a
	NP	75.56 ± 2.72 c	28.03 ± 1.01 e	142.79 ± 7.15 c	15.99 ± 0.58 c	0.81 ± 0.03 c	0.99 ± 0.04 c
	P	10.28 ± 0.37 fg	48.82 ± 1.75 b	140.11 ± 6.03 c	13.07 ± 0.47 e	0.60 ± 0.03 d	1.09 ± 0.04 b
	CK	9.54 ± 0.35 fg	4.47 ± 0.16 f	149.88 ± 2.12 c	12.59 ± 0.45 ef	0.63 ± 0.03 d	0.61 ± 0.02 f

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平。

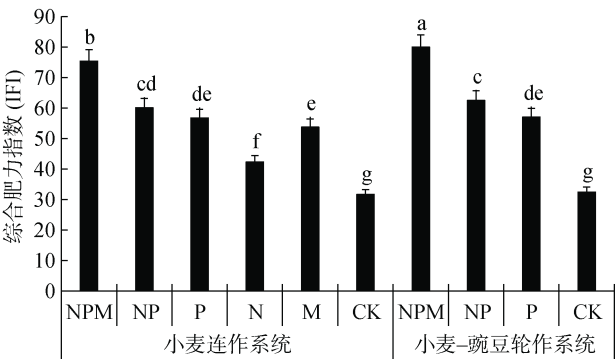
小麦-豌豆轮作系统中，长期不同施肥对土壤养分含量变化有所差异。土壤碱解氮含量不同施肥处理表现为 NPM 和 NP 显著高于 P 和 CK 处理。土壤速效磷和全磷含量不同施肥处理之间差异显著，变化趋势表现为 NPM>P>NP>CK。与 CK 相比较，NP 和 P 处理下土壤速效钾含量变化不显著，而 NPM 处理显著增加了 101%。土壤有机质和全氮含量在不同施肥处理下变化特征相似，具体表现为 NPM>NP>P=CK；与 CK 相比较，NPM 和 NP 有机质分别增加了 73% 和 27%，全氮分别增加了 216% 和 29%。

小麦连作系统中，NPM 处理土壤养分均高于其他施肥处理与未施肥处理。土壤碱解氮含量具体表现为 NPM 和 NP 处理优于其他施肥处理和未施肥处理。土壤速效磷和土壤速效钾含量差异显著，在 NPM 和 M 处理下增量较高，速效磷含量分别增加了 15.7 倍和 9.1 倍，速效钾含量分别增加了 2.1 倍和 1.9 倍。试验结果表明，无论氮磷+有机肥配施，还是单施有机肥，都有很好的培肥土壤作用，说明有机肥在农业生产中有非常好的土壤培肥效果。土壤有机质和全氮在不同处理下变化特征相似，以 NPM、NP 和 M 处理增加最为明显，与 CK 相比较，土壤有机质含量分别增加 79%、28% 和 38%，全氮分别增加 78%、29% 和 34%。土壤全磷含量在 NPM 处理下最优，NP 和 P 处理次之，N 与 M 处理相当且均高于 CK。

2.2 不同施肥处理和耕作方式的土壤肥力评价

由综合肥力指数(IFI)的变化特征可知，虽相同施肥条件下小麦-豌豆轮作系统和小麦连作系统土壤肥力差异不显著(除 NPM 处理外)，但轮作系统土壤肥

力优于连作系统(图 1)。在小麦连作系统和小麦-豌豆轮作系统中，土壤肥力因施肥种类不同而有所差异，具体表现为：在小麦连作系统中，与 CK 处理相比，NPM、NP、P、N、M 处理的 IFI 值分别提高 186%、132%、117%、47% 和 92%；小麦-豌豆轮作系统中，与 CK 处理相比，NPM、NP、P 处理的 IFI 值分别提高 197%、115% 和 108%。



(图柱上方小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平)
图 1 长期不同耕作系统下不同施肥处理对土壤肥力综合指数的影响

Fig. 1 IFIs of different fertilization treatments under long-term different farming systems

2.3 土壤养分指标与肥力综合指数相关性

土壤综合肥力指数与土壤基本理化指标的相关性分析发现(表 8)，将两种种植系统数据整合后，有机质、全磷、全氮和速效磷与 IFI 之间呈显著相关关系，碱解氮和速效钾与 IFI 不相关。在小麦连作系统中，速效磷、有机质、全氮和全磷与 IFI 呈显著正相关关系。在小麦-豌豆轮作系统中，碱解氮、全磷与 IFI 呈显著正相关关系。

表 8 土壤综合肥力指数与养分指标的相关系数
Table 8 Correlation coefficients between IFI and soil nutrients

种植系统	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	全氮	全磷
小麦连作	0.617	0.904**	0.575	0.843**	0.858**	0.895**
小麦-豌豆轮作	0.806**	0.433	0.137	0.459	0.259	0.699*
两种种植系统	0.611	0.903**	0.478	0.859**	0.730*	0.917**

3 讨论

长期定位施肥下小麦-豌豆轮作系统能够有效改善土壤肥力，提高土壤养分(如有机质、速效磷)^[28-29]，可能是因为豆科作物相对于其他作物而言，具有较强的固氮作用，能够促进土壤有机质的积累和养分的转化。土壤有机肥自身含大量腐殖质，在有机肥和豆科作物的双重作用下，土壤有机质可得到显著提高，但

全氮、全磷含量增加不显著，碱解氮含量小麦连作高于小麦-豌豆轮作系统，可能是因为豆科固氮主要以有机态氮储存^[30-31]。试验结果(表 7)表明：①相同的施肥处理下，小麦-豌豆轮作系统，有机质、速效磷增幅高于小麦连作，碱解氮、全氮和全磷增幅低于小麦轮作。②小麦-豌豆轮作与小麦连作系统中，单施有机肥、氮磷配施和氮磷+有机肥配施可显著提高土壤全氮含量，是因为有机肥可以提高土壤氮贮量，改

善土壤供氮能力,化肥配施土壤氮含量优于单施氮肥处理,全面配施提高了土壤速效氮的供应能力,从而增加土壤氮的含量^[32-33]。

从 IFI 的变化趋势看(图 1),长期不施肥处理 CK,由于没有养分的供应加上年作物生长消耗,导致土壤肥力下降^[34-35],而肥料添加均显著提高小麦连作系统和小麦-豌豆轮作系统的土壤肥力。值得注意的是,氮磷和有机肥配施处理的土壤肥力显著高于其他施肥处理,说明氮磷和有机肥配施更有助于提高土壤肥力,其原因是氮磷和有机肥配施不仅直接增加了氮、磷和有机质等养分含量,而且显著增加有益微生物,改善作物根系环境,从而提高土壤肥力^[36]。研究还发现,长期定位下进行相同施肥处理在小麦连作系统和小麦-豌豆轮作系统中土壤肥力表现不同。在氮磷配施和单施磷处理下,IFI 值差异性不显著,说明氮磷配施或者单施磷肥处理土壤综合肥力在小麦连作与小麦-豌豆轮作系统中均不受影响;但在氮磷和有机肥配施下,小麦-豌豆轮作系统土壤肥力高于小麦连作系统,可能是因为在轮作系统下豆科作物与有机肥的双重作用下显著提高了土壤肥力。

土壤综合肥力指数与土壤基本理化指标的相关性分析(表 8)表明:小麦两种种植系统数据综合与单一小麦连作系统中,差异显著性趋势大体一致,这可能是由于小麦连作样本较多,对 IFI 影响较大;有机质、全磷、全氮和速效磷含量与 IFI 差异显著正相关,说明其对黏化黑垆土的土壤肥力贡献较大,与有关学者研究紫色土结论一致,是表征土壤肥力的重要指标^[37]。小麦-豌豆轮作系统中,碱解氮与 IFI 显著相关的原因可能与固氮作物具有固氮能力有关^[38]。以上试验数据表明,有机质、全磷、全氮和速效磷含量对黏化黑垆土土壤肥力的贡献较大,应用相关性分析法计算的综合肥力指数能较好地反映土壤肥力状况。

4 结论

1)小麦-豌豆轮作系统和小麦连作系统不同施肥处理比较,有机质、全氮、速效磷含量均有所增加,土壤全磷差异不显著,土壤速效钾和碱解氮含量均有所降低。小麦-豌豆轮作系统中,不同肥料配施与 CK 比较,碱解氮、速效磷、有机质、全氮和全磷含量均不同程度增加,其中氮磷肥和有机肥配施处理增幅明显。小麦连作系统中,不同肥料配施与 CK 相比较,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量增加。

2)经过 30 a 长期不同施肥,不同处理间土壤 IFI 表现为:小麦-豌豆轮作+NPM>小麦连作+NPM>小麦-豌豆轮作+NP、小麦连作+NP>小麦-豌豆轮作+P、小麦连作+P>小麦连作+M>小麦-豌豆轮作+不施肥>小麦连作+不施肥。长期氮磷肥和有机肥配施相较单施氮磷肥、有机肥的土壤综合肥力要高,小麦-豌豆轮作系统中施用氮磷肥和有机肥土壤综合肥力优于小麦轮作系统,对于区域农业实践具有指导意义。

3)不同耕作系统对土壤养分和土壤肥力的关系有一定的影响。小麦连作系统有机质、全磷、全氮和速效磷与土壤综合肥力指数 IFI 之间呈显著相关,碱解氮和速效钾与 IFI 不相关。小麦-豌豆轮作系统中,碱解氮、全磷和 IFI 呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 陈孝,王光瑞.我国小麦品质改良的发展方向[J].植物杂志,2000(6):16-17.
- [2] 王道中,郭熙盛,何传龙,等.砂姜黑土长期定位施肥对小麦生长及土壤养分含量的影响[J].土壤通报,2007,38(1):55-57.
- [3] 张少民,郝明德,陈磊.黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):85-89.
- [4] 李娇,信秀丽,朱安宁,等.长期施用化肥和有机肥下潮土干团聚体有机氮组分特征[J].土壤学报,2018,55(6):1494-1501.
- [5] 马芊红,张光辉,耿韧,等.我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J].水土保持学报,2016,30(5):190-196,204.
- [6] 柳燕兰,宋尚有,郝明德.长期定位施肥对黄绵土酶活性及土壤养分状况的影响[J].土壤通报,2012,43(4):798-803.
- [7] 李小涵,王朝辉,郝明德,等.黄土高原旱地种植体系对土壤水分及有机氮和矿质氮的影响[J].中国农业科学,2008,41(9):2686-2692.
- [8] 张心昱,陈利顶,傅伯杰,等.农田生态系统不同土地利用方式与管理措施对土壤质量的影响[J].应用生态学报,2007,18(2):303-309.
- [9] 李贵华.国外近百年来的长期肥料定位试验[J].新疆农业科学,1990,27(3):140-142.
- [10] 傅高明,李纯忠.土壤肥料的长期定位试验[J].世界农业,1989(12):22-25.
- [11] 崔喜安,仇建飞,窦森.长期定位施肥对暗棕壤肥力和作物产量的影响[J].吉林农业大学学报,2011,33(5):545-550.
- [12] 王兵,刘文兆,党廷辉,等.黄土塬区旱作农田长期定位施肥对冬小麦水分利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):829-834.
- [13] 赵普生,韩苗,熊子怡,等.长期定位施肥对中性紫色土硝化作用及氨氧化微生物的影响[J].中国土壤与肥料,2018(5):85-90.

- [14] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809–2819.
- [15] Yang X M, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 59(3/4): 107–114.
- [16] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047–1056.
- [17] 隋跃宇, 张兴义, 焦晓光, 等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 190–192, 200. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2005.06.047
- [18] 曹承绵, 严长生, 张志明, 等. 关于土壤肥力数值化综合评价的探讨[J]. 土壤通报, 1983, 14(4): 13–15.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 范海荣, 吴素霞, 常连生. 秦皇岛市草坪土壤肥力数值化综合评价与对策研究[J]. 草业科学, 2013, 30(1): 9–15.
- [21] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 202–205.
- [22] 周勇, 张海涛, 汪善勤, 等. 江汉平原后湖地区土壤肥力综合评价方法及其应用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 70–74.
- [23] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [24] 于寒青, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1772–1778.
- [25] 张丽琼. 长期轮作与施肥对土壤肥力的影响及其综合评价[D]. 杨凌, 西北农林科技大学, 2016, 11–13.
- [26] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 104–106, 111.
- [27] 吕晓男, 陆允甫, 王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(4): 3–5.
- [28] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292–304.
- [29] 贾倩, 廖世鹏, 卜容燕, 等. 不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1547–1558.
- [30] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91–99.
- [31] 惠言. 华北平原以豆科为基础的轮作方式对农作物产量和土壤理化性质的影响[D]. 开封, 河南大学, 2017.
- [32] 樊红柱, 陈琨, 陈庆瑞, 等. 长期定位施肥 31 年后紫色水稻土碳、氮含量及储量变化[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1425–1431.
- [33] Chen Y, Zhang X D, He H B, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(6): 1018–1026.
- [34] 王婷, 李利利, 周海燕, 等. 长期不同施肥措施对雨养条件下陇东旱塬土壤氮素的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 177–188.
- [35] 周宝库. 长期施肥条件下黑土肥力变化特征研究[A]. 中国土壤学会. 面向未来的土壤科学(下册)—中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集[C]. 中国土壤学会, 2012.
- [36] 柳影, 彭畅, 张会民, 等. 长期不同施肥条件下黑土的有机质含量变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 7–11.
- [37] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 139–144.
- [38] 胡雨彤. 长期定位施肥条件下旱地小麦“产量差”影响因子评估[D]. 北京: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.