

王晓军,孙玉琴,王勇,等. 长期定位施肥对旱作土壤团聚体及养分的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(17):276-280.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.17.067

长期定位施肥对旱作土壤团聚体及养分的影响

王晓军,孙玉琴,王勇,张晓娟,张尚沛,杨军学,罗世武,程炳文

(宁夏农林科学院固原分院,宁夏固原 756000)

摘要:为准确掌握宁南山区旱作土壤团聚体和养分含量的变化趋势,为当地旱作农田生产施肥管理提供理论依据。通过5年长期定位施肥试验,选择谷子连作施肥的5个处理,分析对比不同施肥处理下土壤养分含量、有机质含量、水稳性团聚体与施肥量的关系。结果表明,0~20 cm土层中,施肥处理土壤有机质含量明显高于不施肥处理。>3 mm水稳性团聚体含量随着施肥水平的提高总体呈缓慢升高的趋势;不同生育期土壤中碱解氮含量呈现出“S”形曲线变化,不同生育期土壤中速效磷含量变化呈现出双峰值(“M”形)曲线。同一处理不同生育期土壤中速效钾含量变化差异显著($P < 0.05$),随着生育期的变化,速效钾含量呈现出“降低—升高—降低—升高”的趋势。经过5年长期试验,各年份土壤团聚体含量、土壤有机质含量随着施肥水平的提高而有所升高,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量均在不同生育期出现先升高后降低的趋势,表明长期施肥对于维持土壤肥力、调节土壤团聚体各级比例具有重要意义。

关键词:定位施肥;团聚体;养分;有机质;旱作

中图分类号:S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)17-0276-05

宁夏南部山区属于旱作农业雨养区域,水资源短缺、土壤贫瘠是制约当地农业生产的主要因素^[1-2]。随着经济发展,农田肥料投入量与产出率一直处于博弈的状态,肥料利用效率低、土壤中肥料残留问题、农业的点源污染与面源污染日益突出^[3-5]。所以,对旱作土壤养分状况进行长期定位监测,分析当地土壤养分含量变化趋势,研究当地施肥-产量-土壤肥力关系,对于指导科学施肥、实现化学肥料零投入具有重要意义^[6]。

目前,基于长期定位施肥试验,研究宁夏南部山区土壤养分变化的报道有很多,高端等研究了施肥措施对土壤酶活性的影响,明确了微生物在土壤肥力调节中的作用^[7]。汤建东等通过研究轮作改制对土壤肥力的影响,表明这样有利于促进土壤养分平衡、解决地力矛盾和季节矛盾,实现高产、稳产、低成本^[8]。徐娜等的研究表明,黄土高原地区应适当减少肥料用量,降低投入成本,才能获得更高的经济效益^[9]。也有研究表明,团聚体作为一种调节器,影响土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性^[10],施肥可对改变土壤有机质、团聚体的

数量和大小分布有重要影响^[11]。

尽管关于这些问题的研究比较多,但多数试验没有严格的控制标准,随机性比较大,容易受到外界环境的影响,其研究结果在一定程度上不能很好地反映农田养分含量、土壤粒径含量的实际变化,对于大面积农田推广适用有一定的限制性。本研究以当地农田为长期定位监测点,通过控制性肥料试验,其施肥、轮作、栽培、灌水等农田管理措施都实行严格控制标准,增加了人为因素,加大了试验研究的可比性和研究精度^[12-13]。2011—2015年期间,对土壤、肥料、轮作、灌溉等栽培措施对谷子生长发育和产量的影响进行研究,分析对比不同处理下土壤养分含量、有机质含量、水稳性团聚体含量与施肥的关系,为当地旱作农田生产中施肥管理提供理论依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验于2011年开始,在宁夏农林科学院固原分院头营科研基地(106°44'E,36°44'N)进行。海拔1550 m,年降水量200~350 mm,冬春干旱,降水一般集中在7—9月,四季多风,年蒸发量1650 mm,≥10℃积温2800~3500℃,年无霜期150~200 d,试验地平坦,土壤类型为湘黄土,前茬作物收获后施入底肥,秋耕、耙耱。试验前基础土壤pH值8.63,速效磷含量38.50 mg/kg、速效钾含量168.00 mg/kg、有机质含量7.38 g/kg、全氮含量0.61 g/kg、碱解氮含量66.00 mg/kg、全磷含量0.79 g/kg、全钾含量14.60 g/kg。

收稿日期:2018-04-28

基金项目:国家谷子高粱产业技术体系建设专项(编号:CARS-06-13.5-A15)。

作者简介:王晓军(1983—),男,宁夏西吉人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养与测土配方施肥研究。E-mail:1449820235@qq.com。

通信作者:程炳文,研究员,主要从事谷子糜子土壤与肥料研究。E-mail:792483123@qq.com。

[30]姜佳琦. 生物有机肥对大蒜连作土壤酶、微生物及养分的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.

[31]柴颖,赵靓,黄婷,等. 不同氮、磷配施对春玉米养分吸收和产量的影响[J]. 新疆农业科学,2015,52(3):444-449.

[32]宗晓波. 农业有机废弃物发酵CO₂施肥及残渣对植物生长和培肥土壤的作用[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[33]Debosz G P, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effect of organic matter input[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 13: 209-218.

[34]彭娜,王开峰,谢小立,等. 长期有机无机肥配施对稻田土壤基本理化性状的影响[J]. 中国土壤与肥料,2009(2):362-365.

1.2 试验材料

参试材料为:尿素(N 46.4%)、重过磷酸钙(P_2O_5 43%)、硫酸钾(K_2O 45%)。供试品种为陇谷11号。于当年4月10日播种,9月23日收获。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 在长期定位试验的基础上,选择每年谷子连作施肥的5个处理(表1),2次重复,小区面积为 30 m^2 (长5 m、宽6 m)。每个处理磷肥、钾肥作基肥一次施入,氮肥70%基施,30%追施,肥料于播前撒施后,翻入土中,定期进行除草和松土,田间管理同常规大田。

表1 试验设计

处理	施肥量			氮肥分配(N)	
	N	P_2O_5	K_2O	基肥(70%)	追肥(30%)
1($N_0P_0K_0$)	0	0	0	0	0
2($N_{1125}P_{562.5}K_{450}$)	75	37.5	30	52.5	22.5
3($N_{1875}P_{1125}K_{900}$)	125	75.0	60	87.5	37.5
4($N_{2625}P_{1687.5}K_{1350}$)	175	112.5	90	122.5	52.5
5($N_{3375}P_{3375}K_{2700}$)	225	225.0	120	157.5	67.5

1.3.2 土壤样品采集 在收获后,按处理多点原则采集0~20 cm原状土样及土钻混合样,自然风干后,分别过1.00、0.25 mm筛,供测定养分含量分析用。

1.3.3 测定方法 碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加加热法测定^[14]。土壤团聚体含量采用干筛法进行测定。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Excel 2007和DPS 2.0软件处理分析,并用Duncan's新复极差法($\alpha=0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤有机质含量的影响

由表2可知,0~20 cm土层中,各处理土壤有机质含量随着年份的逐渐延长呈现出逐渐增加的趋势。同一年份中,

各处理间差异显著,随着年份的逐渐延长,各施肥处理有机质含量显著高于不施肥处理。2011—2015年,处理5比处理1分别高出23.03%、24.57%、23.96%、26.72%、25.08%。2011年,处理5与处理1相比差异显著;2012年,处理5与处理2、处理1差异显著;2013年,处理5与处理3、处理2和处理1显著性;2014年,处理5与处理4、处理2、处理1差异显著;2015年,处理5与处理2、处理1差异显著。同一处理不同年份中,在不施肥处理(处理1)下,2012年比2011年高出0.08%,2013年比2012年高出0.82%,2014年比2013年高出0.32%,2015年比2014年1.38%;在施肥处理下,2012年比2011年高出0.41%,2013年比2012年高出0.51%,2014年比2013年高出1.48%,2015年比2014年0.18%,说明随着不同作物之间的轮作、不同施肥用量、施肥时间的无限延长土壤有机质含量在逐年增加,通过研究发现,处理3在整个年份变化中比较稳定,但是由于本试验时间跨度较短,各处理间土壤有机质含量差异性还不能完全表现出来。

表2 不同施肥对0~20 cm土层土壤有机质含量的影响

处理	土壤有机质含量(g/kg)				
	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
1	12.20c	12.21d	12.31d	12.35e	12.52d
2	14.23b	14.26c	14.35d	14.56d	14.65c
3	14.62b	14.65b	14.75c	14.98b	14.85b
4	14.64b	14.62b	14.68b	14.72c	14.86b
5	15.01a	15.21a	15.26a	15.65a	15.66a

注:同列数据后不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著($P<0.05$)。本研究中施肥处理均指除处理1之外的其余处理平均值。下表同。

2.2 不同施肥处理对水稳性团聚体粒径分布的影响

从表3可知,0~20 cm土层,>3 mm水稳性团聚体含量随着施肥水平的提高总体呈缓慢升高的趋势。2011—2015年,施肥处理>3 mm水稳性团聚体含量比不施肥处理分别提高113.89%、229.55%、70.83%、-9.62%、22.92%;施肥处理2~3 mm水稳性团聚体含量比不施肥处理分别提高35.42%、157.00%、88.54%、16.41%、29.76%;1~2 mm水稳性团聚体含量随着施肥水平的提高变化缓慢,施肥处理比不施肥处理分别提高32.00%、141.67%、18.75%、-11.54%、-3.46%;施肥处理0.25~1 mm水稳性团聚体含量比不施肥处理分别提高10.92%、-13.07%、

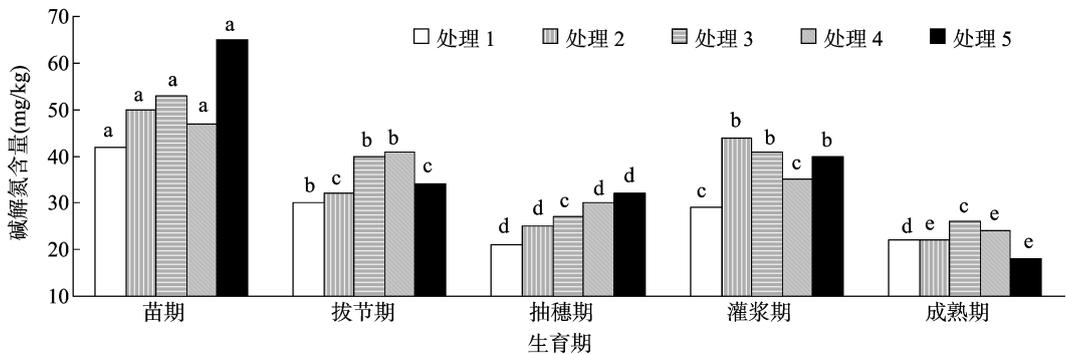
-15.20%、-5.95%、20.52%;<0.25 mm水稳性团聚体含量随着施肥水平的改变在逐渐增加,施肥处理比不施肥处理分别提高16.42%、323.08%、3.40%、22.58%、3.79%。

2.3 不同施肥处理对土壤中碱解氮含量的影响

由图1可知,同一处理在不同生育时期土壤中碱解氮含量差异显著,测试结果显示,旱作土壤不同施肥处理随着生育期的推移土壤中碱解氮的含量呈现出“S”形曲线变化。整体看来,施肥处理碱解氮含量明显高于不施肥处理,所有处理在苗期土壤碱解氮含量最高,随着生育进程的推进,在抽穗期最小,分别为21、25、27、30、32 mg/kg,主要是由于抽穗期进行了灌水,加速了养分的供给及作物对养分的吸收转化,苗期、拔

表3 不同施肥处理对表层土壤(0~20 cm)各级团聚体含量的影响

年份	处理	各级水稳性团聚体含量(%)				
		>3 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm
2011年	1	0.27e	0.36c	0.50d	1.03de	1.02e
	2	0.33d	0.39c	0.59d	1.13c	1.16b
	3	0.53c	0.46b	0.68b	1.16a	1.22bc
	4	0.69b	0.65a	0.75a	1.15b	1.05e
	5	0.76a	0.45b	0.62c	1.13c	1.32a
2012年	1	0.22e	0.25e	0.27d	1.09b	0.26d
	2	0.50d	0.65b	0.47c	0.58d	1.63a
	3	0.63c	0.47d	0.58b	1.00c	0.74c
	4	0.82b	0.53c	0.65b	1.02c	1.01b
	5	0.95a	0.92a	0.91a	1.19a	1.02b
2013年	1	0.24c	0.24d	0.36b	1.02b	1.03b
	2	0.26c	0.35c	0.35b	1.37a	0.44d
	3	0.40b	0.33c	0.26c	0.54d	1.22c
	4	0.36b	0.48b	0.54a	0.77c	1.23c
	5	0.62a	0.65a	0.56a	0.78c	1.37a
2014年	1	0.26b	0.32b	0.65a	1.05b	1.11c
	2	0.30a	0.45a	0.57b	0.79d	1.97a
	3	0.21c	0.23c	0.56b	0.91c	1.05d
	4	0.12d	0.36b	0.58b	1.56a	0.78e
	5	0.31a	0.45a	0.59b	0.69e	1.82b
2015年	1	0.36c	0.42c	0.65c	0.67d	1.12c
	2	0.62b	0.56b	0.58b	0.68d	1.00d
	3	0.29d	0.31d	0.62c	0.79b	1.02d
	4	0.13e	0.62a	0.36d	1.03a	1.22b
	5	0.73a	0.69a	0.95a	0.73c	1.41a



不同字母表示在同一处理不同生育期处理差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 2011—2015年不同生育期土壤碱解氮含量变化

节期、抽穗期之间差异显著($P < 0.05$)。抽穗期—灌浆期以后,土壤中的碱解氮迅速富集,最大达到44.5 mg/kg,其次是41.5、40.8、35.1、29.1 mg/kg,最大值和最小值之间相差52.92%,这一时期主要是作物开始了营养生长而吸收土壤中的所有氮肥,这一结论符合“在抽穗期到灌浆期这一生育期作物生长需求养分较多,从而使土壤中的养分快速减少”的规律。成熟期以后,由于作物需肥量的富集和增加,土壤中的碱解氮含量也有了进一步的增加,其中氮素最大吸收量是在施氮肥125 kg/hm²即土壤含N 26.5 mg/kg时,主要是为加速植物由生殖生长快速向营养生长的转变,较灌浆期相比达到显著水平。

2.4 不同施肥处理对土壤中速效磷含量的影响

图2表明,同一处理不同生育期土壤中速效磷含量变化达显著水平,并且呈现出双峰值(“M”形)曲线。测试结果表明,整个生育期,土壤中速效磷含量施肥处理均大于不施肥处理,在苗期由于土壤残存的磷素较多,所有速效磷含量均比较高,到了拔节期后,由于追肥的结果,导致土壤中速效磷迅速富集,最大值是施入磷肥75 kg/hm²即P₂O₅含量为51.5 mg/kg,其余依次是施入磷肥37.5 kg/hm²即P₂O₅含量为49.2 mg/kg,施入磷肥112.5 kg/hm²即P₂O₅含量为42.3 mg/kg,施入磷肥225 kg/hm²即P₂O₅含量为39.8 mg/kg,施入磷肥0 kg/hm²即P₂O₅含量为38.6 mg/kg,

最大值与最小值之间相差 33.42%，且生育期之间差异显著 ($P < 0.05$)。抽穗期时，整个处理速效磷含量都比较低，主要由于此时作物需要大量养分，以调节作物营养生长和生殖生长的关系。灌浆期后由于作物需磷量降低，导致大量磷素被土壤固定，一部分被作物继续吸收转化，同时也达到作物生育期的另一个峰值，最大值是施入磷肥 37.5 kg/hm² 即 P₂O₅ 含量为 43.5 mg/kg，其余依次是施入磷肥 75 kg/hm² 即 P₂O₅ 含量为 43.2 mg/kg，施入磷肥 225 kg/hm² 即 P₂O₅ 含量为 40.2 mg/kg，施入 P₂O₅ 112.5 kg/hm² 即 P₂O₅ 含量为

33.8 mg/kg，施入 P₂O₅ 0 kg/hm² 即 P₂O₅ 含量为 33.2 mg/kg，最大值与最小值之间相差 31.02%，成熟期后，土壤中速效磷含量迅速下降，与灌浆期相比达到显著水平 ($P < 0.05$)，说明残留在土壤中的磷素变少是由于作物到了后期仍需要磷肥，会使土壤中剩余磷素得到有效利用，这在合理的栽培管理措施下能够有效防止土壤磷素过多以至作物呼吸作用过强，导致作物消耗大量的蛋白和能量促使谷子成熟期提前，重者会导致作物减产。

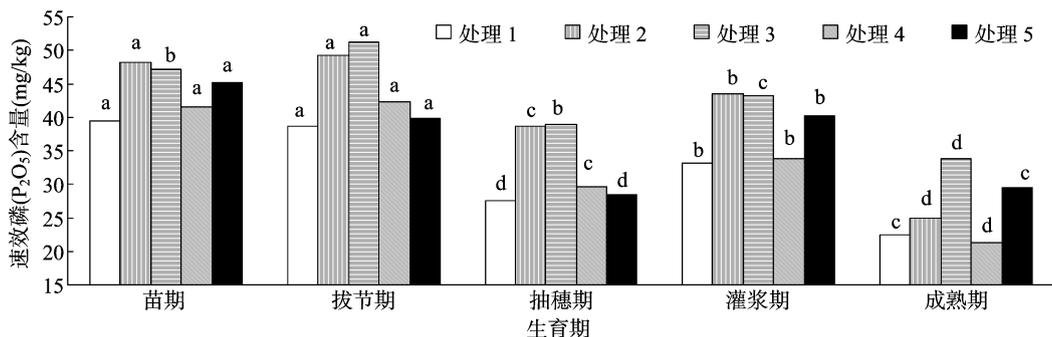


图2 2011—2015年不同生育期土壤速效磷含量变化

2.5 不同施肥处理对土壤速效钾含量的影响

图3表明，同一处理不同生育期土壤中速效钾含量变化差异显著 ($P < 0.05$)。随着生育期进程的不断推进，各处理速效钾含量呈现出“降低—升高—降低—升高”的趋势。各处理在拔节期都处于降低的趋势，其中降幅最大的是处理1、处理2和处理4，降幅分别达 23.5%、24.3%、22.9%，且生育期间差异显著 ($P < 0.05$)；拔节期、抽穗期、灌浆期较拔节期

处理1、处理2、处理3都有所增加，增加幅度分别为 12.4%、11.6%、12.2%，在灌浆期—成熟期，各处理都有所增加，增加幅度分别为 8.9%、21.1%、18.3%、11.4%、13.3%，各生育期之间差异显著 ($P < 0.05$)。在成熟期，土壤中速效钾含量迅速提升，主要是为了促进作物产量及籽粒千粒质量，另外也与当地土壤富含钾元素有关，这一原因还有待研究。

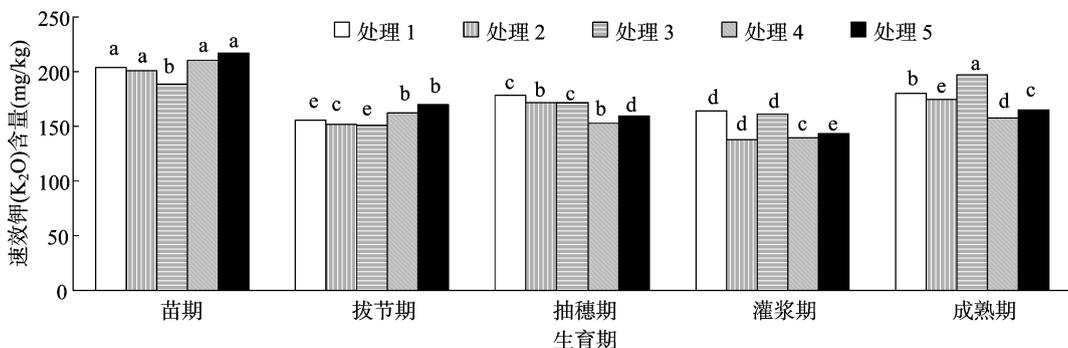


图3 2011—2015年不同生育期土壤速效钾含量变化

3 结论与讨论

经过5年的长期定位试验发现，施肥能够显著改变耕作层(0~20 cm)土壤的水稳性团聚体粒径大小、有机质含量和养分含量，这与大多数研究结果^[15]一致。也有研究证明，施用化肥可以提高苗期土壤中碱解氮含量^[16]，这与本研究的结果基本相一致，但是在抽穗期，土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量均有所下降，主要由于在这个时期进行了灌溉，造成土壤水溶性氮向下淋溶^[17-19]，形成土层“上肥下瘦、上干下湿”^[20]。也有研究表明，施化肥对提高土壤速效磷、速效钾水平非常重要^[21]，但是过量的施肥会降低土壤的吸收能力，特别是当地

居民常有重施氮肥、轻施磷钾肥的习惯，对于降低耗能、提升产量、增加经济效益方面非常不利，甚至还会造成肥料资源的浪费，也可能带来环境风险，应适当控制当地农民肥料的施用。

土壤有机质含量与团聚体关系密切，对土壤团聚体含量及其粒径分布有重要影响^[22]，其含量的提高有利于土壤结构的形成及土壤结构稳定性的增强^[23]。经过5年的长期试验发现，连续施肥后土壤有机质含量、>3 mm水稳性团聚体含量随着年限的延长而呈现出逐渐增加的趋势，各处理在同一年差异显著，随着年限的延长，各施肥处理明显高于不施肥处理。不同粒径团聚体对土壤养分含量的保持和供应、孔隙度

组成具有不同的作用^[24-25],各级水稳性团聚体含量能更好地反映出土壤团聚体的质量。Liu认为,连年施用有机肥可增加土壤有机质含量,改善土壤结构^[26]。另外,由于有机质是土壤良好的有机胶结剂,能胶结较小的团聚体并促进大团聚体的形成,从而达到改善土壤结构的目的^[27-28]。这也在一定程度上表明,长期施用肥料对于维持和提高土壤肥力具有重要意义^[29-30],反之如果长期不施肥必然会导致土壤肥力降低。

通过以上研究表明,在施氮肥 125 kg/hm²、磷肥 75 kg/hm²、钾肥 60 kg/hm²,对于提高土壤有机质、速效养分含量及增加土壤水稳性团聚体粒径含量具有重要作用。针对当地土壤背景值,建议在以后的施肥过程当中控制好氮肥和磷肥,少施钾肥,增施有机肥。

参考文献:

[1] 摄晓燕,谢永生,郝明德,等. 黄土旱塬长期施肥对小麦产量及养分平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):27-32.

[2] 党廷辉,高长青,彭琳,等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. 水土保持研究,2003,10(1):61-64,103.

[3] 李玉山,张孝中,郭民航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报,1990,27(1):1-7.

[4] 张仁陟,李小刚,胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.

[5] 成婧,吴发启,云峰,等. 渭北旱塬坡耕地玉米-苜蓿间作对土壤养分和产量的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(4):228-232.

[6] 高祥照,马文奇,崔勇,等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4):363-369.

[7] 高端,吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(1):143-145.

[8] 汤建东,叶细养,饶国良,等. 耕作改制对土壤肥力的影响[J]. 生态环境,2000,9(3):257-258.

[9] 徐娜,党廷辉,刘文兆. 黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1240-1248.

[10] 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[J]. 土壤学报,2006,43(1):124-132.

[11] 何晓雁,郝明德,李慧成,等. 黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1333-1340.

[12] 戴健,王朝辉,李强,等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报,2013,50(5):956-965.

[13] 曲环,赵秉强,陈雨海,等. 灰漠土长期定位施肥对小麦品质和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(1):12-17.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:106-107.

[15] 陈磊,郝明德,戚龙海. 长期施肥对黄土旱塬区土壤-植物系统中氮、磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):1006-1012.

[16] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term applications of chemical and organic fertilizers on plant-available nitrogen pools and nitrogen management index[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011,47:767-775.

[17] Halvorson A D, Reule C A. Nitrogen fertilizer requirements in an annual dryland cropping system[J]. Agronomy Journal, 1994,86(2):315-318.

[18] 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]. Agronomy Journal, 1994,86(1):94-99.

[19] 郝明德,樊军,党廷辉. 黄土高原旱地定位施肥对产量与土壤硝态氮累积的影响[J]. 土壤学报,2002,39(增刊1):294-299.

[20] 郭胜利,张文菊,党廷辉,等. 干旱半干旱地区农田土壤NO₃-N深层积累及其影响因素[J]. 地球科学进展,2003,18(4):584-591.

[21] 古巧珍,杨学云,孙本华,等. 长期定位施肥对土娄土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J]. 西北农业学报,2004,13(3):121-125.

[22] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration interrelationships of a Torricite Paleustoll[J]. Soil and Tillage Research, 1997,42:95-113.

[23] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(4):618-623.

[24] Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level[J]. Acta Pedologica Sinica, 1994,31(1):18-25.

[25] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil & Tillage Research, 1988,11(3/4):199-238.

[26] Liu Y T. Study on the fixed position of applying organic fertilizer on maize fields of dry land[J]. Journal of Maize Sciences, 2003,11(2):86-88.

[27] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(4):595-605.

[28] Zhang M K. Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997,34(4):359-366.

[29] 江彬,毕银丽,申慧慧,等. 氮营养与AM真菌协同对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报,2017,33(2):327-332.

[30] 袁中友,任宗玲,杨淇钧,等. 不同肥料及接种蚯蚓对高速公路建设损毁土壤的短期培肥效应[J]. 江苏农业学报,2017,33(3):575-584.