

化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响

裴雪霞, 党建友, 张定一, 张晶, 高璐, 程麦凤, 王姣爱

(山西农业大学小麦研究所, 山西 临汾 041000)

摘要: 探讨有机肥与化肥配施对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响, 为黄土丘陵区旱地麦田有机肥替代化肥比例和减小年际间产量波动提供理论依据。于 2017—2019 年, 定位研究了常量化肥(B)、猪粪替代常量化肥(A₁B₁, 替代 20%; A₁B₂, 替代 30%; A₁B₃, 替代 40%)和羊粪替代常量化肥(A₂B₁, 替代 20%; A₂B₂, 替代 30%; A₂B₃, 替代 40%)对旱地小麦产量及其构成、籽粒营养品质和面粉加工品质、水分利用率的影响。结果表明, 与仅施常量化肥相比, 化肥减量配施有机肥可提高旱地小麦产量、籽粒容重、硬度指数、蛋白质含量和面粉沉降值, 有机肥替代适量化肥可提高水分利用率。猪粪和羊粪在不同年型下对产量和水分利用率效应有差异, 其中猪粪在丰水年但生育期阶段性干旱且春季遭遇冻害年型下, 可提高旱地小麦成穗数和穗粒数, 较羊粪配施化肥增产, 且提高了水分利用率; 羊粪在干旱年份但关键生育期均有降水且休闲期贮水量较高的年型下, 可提高成穗数, 较猪粪配施化肥增产, 水分利用率也提高。有机肥替代常量化肥比例因有机肥种类而有差异, 其中猪粪替代 20% 常量化肥最好, 2 年度分别较仅施常量化肥增产 39.76% 和 2.46%, 2018 年度水分利用率提高 4.91 kg/(hm²·mm); 羊粪替代 40% 常量化肥最好, 2 年度分别较仅施常量化肥增产 18.88% 和 2.28%, 水分利用率分别提高 2.57, 12.68 kg/(hm²·mm)。本试验的 2 个年型下, 化肥减量配施猪粪或羊粪可提高旱地小麦产量和水分利用率, 改善小麦品质, 同时耕层土壤有机质含量提高。山西南部丘陵区雨养旱地麦田, 猪粪替代 20% 常量化肥或羊粪替代 40% 常量化肥, 是实现小麦高产稳产及提质增效的化肥减施和有机替代模式。

关键词: 旱地小麦; 化肥减施; 有机替代; 产量; 水分利用率; 品质

中图分类号: S143; S141.4; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0250-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.035

Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer on the Yield, Quality, and Water Use Efficiency of Dryland Wheat

PEI Xuexia, DANG Jianyou, ZHANG Dingyi, ZHANG Jing, GAO Lu, CHENG Maifeng, WANG Jiaoi

(Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen, Shanxi 041000)

Abstract: The effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on yield, quality, and water use efficiency of dryland wheat were studied, which provided theoretical basis for substituting chemical fertilizer with organic fertilizer and reducing annual yield fluctuation in dryland wheat field in loess hilly region. In 2017—2019, the effects of constant chemical fertilizer (B), constant chemical fertilizer substituted by pig manure (A₁B₁, substituted by 20%; A₁B₂, substituted by 30%; A₁B₃, substituted by 40%) and constant chemical fertilizer substituted by sheep manure (A₂B₁, substituted by 20%; A₂B₂, substituted by 30%; A₂B₃, substituted by 40%) on the yield and composition, grain nutritional quality, flour processing quality, and water use efficiency of dryland wheat were studied. The results showed that, compared with the application of chemical fertilizer only, the combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer can improve the yield, grain bulk density, hardness index, protein content, and flour sedimentation value of dryland wheat, and chemical fertilizer substituted by proper amount of organic fertilizer can increase water use efficiency. The effects of pig manure and sheep manure on yield and water use efficiency were different under different years. Compared with sheep manure combined with chemical fertilizer, the spike number and kernels per spike of dryland wheat were increased and the yield and water use efficiency were improved by pig manure combined with chemical fertilizer in wet year, which showed periodic drought

收稿日期: 2021-02-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200404-07); 国家现代农业产业技术体系(CARS-03-2-07)

第一作者: 裴雪霞(1973—), 女, 副研究员, 主要从事作物高产高效栽培技术研究。E-mail: peixuexia@163.com

通信作者: 党建友(1972—), 男, 研究员, 主要从事作物节水高产及有机旱作研究。E-mail: dangjyou8605@sina.com

in growth period and freezing injury in spring. Compared with pig manure combined with chemical fertilizer, the spike number, yield, and water use efficiency were increased by sheep manure combined with chemical fertilizer in dry years that had precipitation in key growth period and high water storage in fallow period. The proportion of organic fertilizer substituting for constant chemical fertilizer varies with the type of organic fertilizer. Pig manure substitute for 20% chemical fertilizer was the best, increased yield by 39.76% and 2.46% compared with the application of chemical fertilizer only respectively, and increased water use efficiency by 4.91 kg/(hm² · mm) in 2018; sheep manure substitute for 40% chemical fertilizer was the best, increased yield by 18.88% and 2.28% compared with the application of chemical fertilizer only, and increased water use efficiency by 2.57 kg/(hm² · mm) and 12.68 kg/(hm² · mm) respectively. In the two extreme years' experiment, the reduction of chemical fertilizer combined with pig manure or sheep manure could improve wheat yield and water use efficiency, improve wheat quality, and increase soil organic matter content in topsoil. Considering from the dour qualities and the point of fertilizer saving, 20% chemical fertilizer that substituted by pig manure or 40% substituted by sheep manure is recommended for the wheat production in Southern Shanxi Province.

Keywords: dryland wheat; chemical fertilizer reduction; organic substitution; yield; water use efficiency; quality

小麦是山西第二大粮食作物,晋南是全省小麦主产区,年种植面积 53.3 万 hm² 左右,其中雨养旱地是重要生产类型,占种植面积 50% 以上^[1]。晋南旱地小麦种植区年降水量 450~600 mm,降雨时空不均,6—9 月平均降水量 335.0 mm,小麦生育期平均降水仅 143.2 mm,阶段性干旱、土壤肥力水平低是制约旱地小麦高产稳产的主要因素^[2-5]。

有机肥含有丰富的有机质、氨基酸、蛋白质等有机养分,同时也含有氮、磷、钾等无机养分^[6],在我国传统农业发展过程中一直发挥着重要的作用,施用有机肥可减施化肥,培肥地力,提高作物产量,改善品质^[7-8]。随着现代农业生产发展,化肥使用量快速增加,有机肥用量逐渐减少,持续过量施用化肥,造成土壤质量变差,化肥利用率降低,生产成本增加和环境污染等一系列问题^[9-11]。据统计^[12],我国化肥施用量 531.9 kg/hm²,是世界平均水平的 3.9 倍,但化肥对粮食增长的贡献率却从 20 世纪 80 年代的 30%~40% 降至目前的 10% 左右。近年来在农业绿色发展背景下,我国出台一系列化肥减量增效政策,推动化肥减施和有机替代,实现绿色高效施肥^[13]。有机肥与化肥配施可提供给土壤微生物充足碳氮源,改善土壤供氮特性,增加表层含氮量,减少养分流失,提高氮肥利用效率^[14]。丘陵旱地有机无机肥合理配施有利于中强筋小麦产量品质协同提升,提高氮肥偏生产力^[15]。长期定位试验^[16-18]表明,持续施用有机肥能显著提高土壤有机质、速效养分、养分库容量和脲酶等土壤酶活性;李燕青等^[19]研究认为,在施折合纯氮 225 kg/hm² 下,鸡粪和猪粪配施少量或不配施化肥,牛粪配施 75% 化肥均可显著提升小麦品质,单施牛粪提升小麦品质作用不显著;陈磊等^[20]研究认为,旱

地氮磷肥单施和配施均可增加小麦对 N、P、K 的吸收,配施效果更好;有机肥及与氮磷肥配施使籽粒养分含量增加,品质显著改善,土壤有机质和速效养分含量提高;李顺等^[21]研究认为,旱地小麦化肥与有机肥、生物有机肥配施,可提高土壤贮水能力、水分生产效率、氮素利用效率、籽粒产量和生物产量,且与生物有机肥配施效果更好,使成穗数和千粒重提高,产量构成协调而高产,经济效益好;也有研究^[22-23]表明,不同种类和用量有机肥与化肥配施对氮素效率、土壤肥力和产量影响较小,甚至使其降低。因此,针对有机肥及与化肥配施研究结论存在差异。本研究为探明 2 种有机肥猪粪、羊粪与氮磷肥减量配施条件下,对旱地小麦产量构成、籽粒品质和水肥利用效率的影响,旨在为山西南部丘陵雨养旱地小麦有机旱作高效生产提供科学配施依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2019 年在临汾市尧都区大阳镇岳壁村(36°05.520'N,111°45.727'E)进行定位研究。试验地海拔 693.5 m,年均气温 12.6 °C,年降水量 430~550 mm,无灌溉条件,小麦收获后休闲。试验地土壤为石灰性褐土,中壤,土层深厚。2017 年 9 月测定基础土样土壤农化性状为:0—20 cm 土壤 pH 8.4,有机质含量 9.0 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 43.9, 9.6, 105.0 mg/kg, 20—40 cm 土壤有机质含量 4.0 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 33.1, 3.4, 169.0 mg/kg。2 年度有机肥养分含量见表 1。

1.2 试验年份降水量及逐日最低气温

按陶林威等^[24]方法划分降水年型(6 月至翌年 5 月),休闲期(6—9 月)和生育期(10 月至翌年 5 月)降

水型。由表 2 可知,2018 年度(2017 年 6 月至 2018 年 5 月)属丰水年,其中休闲期(2017 年 6—9 月)属丰水,生育期(2017 年 10 月至 2018 年 5 月)属丰水;2019 年度(2018 年 6 月至 2019 年 5 月)年属枯水年,其中休闲期属平水,生育期属枯水。试验年逐日最低气温见图 1。2018 年度属丰水年,但遭遇春季低温冻害,2019 年度属极端干旱年。

表 2 试验年降水情况及降水年型

单位:mm

年度	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	休闲期	生育期	年降水
2018	98.3	167.1	86.3	15.1	83.0	0.8	1.5	11.9	0.6	9.2	47.3	30.5	366.8(丰水)	184.8(丰水)	551.6(丰水)
2019	43.2	145.5	46.0	82.0	0.0	22.4	3.8	4.9	7.8	1.8	40.6	3.2	316.7(平水)	84.5(枯水)	401.2(枯水)
1961—2019 年平均	51.0	119.5	86.8	72.4	36.2	15.0	2.6	2.4	4.4	12.6	30.2	39.8	329.7	143.1	472.8

注:年降水量>512.9 mm 为丰水年,年降水量<443.5 mm 为枯水年;休闲期丰水降水量>365.1 mm,枯水降水量<304.9 mm;生育期丰水降水量>157.7 mm,枯水降水量<128.7 mm。

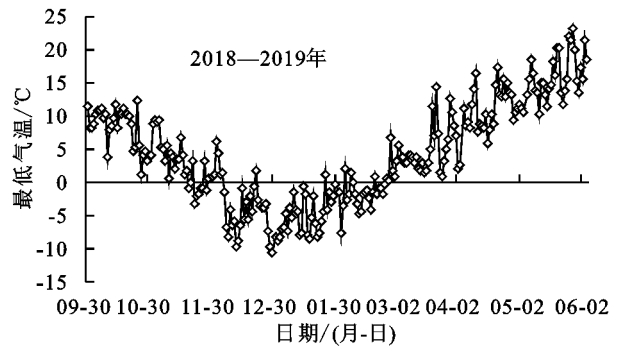
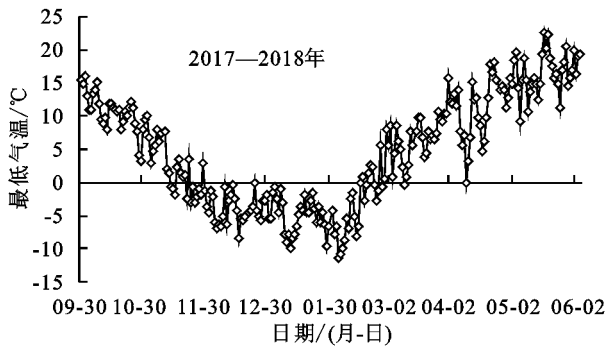


图 1 2017—2019 逐日最低气温

1.3 试验设计

小麦机械收获时留茬高度 23~28 cm,小麦秸秆全部均匀覆盖还田。试验设施 2 种有机肥:猪粪(A₁)和羊粪(A₂);2 种有机肥下设 3 个有机肥与化肥配施处理,分别为:有机肥替代 20% 常量氮磷(B₁)、有机肥替代 30% 常量氮磷(B₂)、有机肥替代 40% 常量氮磷(B₃)、单施常量氮磷(B)、不施肥为对照(CK)共 8 个处理,具体试验处理见表 3。3 次重复,随机区组排列。氮肥为尿素(含 N 46.4%)、磷肥为磷酸二铵(含 N 18%,P₂O₅ 46%)。小区面积 165.0 m²(22 m×7.5 m)。休闲期于 2017 年 8 月 21 日和 2018 年 8 月 23 日深翻,2017 年 9 月 27 日和 2018 年 9 月 30 日播种,有机肥和化肥均在整地前均匀撒施于地表,然后旋耕整地播种镇压一次性完成,播量 150 kg/hm²,播种行距 20 cm。供试品种“品育 8161”,2018 年和 2019 年均于 6 月 2 日收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤贮水量 播种和收获当天采用土钻取 0—200 cm(每 20 cm 为 1 层)土样,铝盒烘干法测定土壤含水量,按 $W = w \times \rho_s \times h \times 0.1$ 计算贮水量。式中:W 为土层贮水量(mm);w 为土层含水量(%); ρ_s 为土壤容重(g/cm³);h 为土层厚度(cm);0.1 为单位换算系数。

表 1 2017—2019 年有机肥及基础土样养分含量

年度	样品名称	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/%	全磷/%	全钾/%
2018	猪粪	150.8	0.49	0.54	0.38
	羊粪	136.6	0.42	0.43	0.30
2019	猪粪	150.3	0.40	0.56	0.42
	羊粪	135.2	0.46	0.45	0.33

表 3 试验具体设计 单位:kg/hm²

编号	处理	有机肥		纯 N	P ₂ O ₅
		种类	施用量(干基)		
1	A ₁ B ₁	猪粪	15000	120.0	84.0
2	A ₁ B ₂	猪粪	22500	105.0	73.5
3	A ₁ B ₃	猪粪	30000	90.0	63.0
4	A ₂ B ₁	羊粪	15000	120.0	84.0
5	A ₂ B ₂	羊粪	22500	105.0	73.5
6	A ₂ B ₃	羊粪	30000	90.0	63.0
7	B		0	150.0	105.0
8	CK	0	0	0	0

1.4.2 水分利用效率 (WUE) = 产量 ÷ 生育期耗水量

生育期耗水量(mm) = 播前 0—200 cm 土壤贮水量 + 降水量 - 收获 0—200 cm 土壤贮水量

1.4.3 土壤养分含量 成熟期采取 0—20, 20—40 cm 土层土样,风干,过 0.25 mm 土筛用于测定土壤有机质,过 1 mm 土筛测定速效养分含量。土壤有机质含量采用高锰酸钾容量法测定,碱解氮化铝采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提—钼钼酸铵比色法测定,速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定^[25]。

1.4.4 产量构成 于小麦出苗后分蘖前,每小区固定 2 个 1 m² 调查样方,2 个调查样方平均值为 1 个重

复。收获前调查各小区样方内所有穗粒数 >3 粒的麦穗,求均值为成穗数;每个小区选 1 个样方,样方内随机选 1 行,拔取行长 20 cm 的全部植株,去除穗粒数 <3 粒的麦穗,数取穗数和总粒数,按穗粒数=总粒数 \div 穗数;各处理收获 2 个未取样样方,再随机收获 1 个 1.0 m²,脱粒,风干后称重;数 500 粒称重,换算成千粒重,2 次重复(重复间相差 ≤ 0.5 g)。

1.4.5 籽粒品质测定 采用瑞典波通 DA7200 多功能近红外品质分析仪测定。

1.4.6 作用力 单因素及互作效应等各因子作用力(%)=单因素及互作效应等各因子平方和 \div (总平方和-区组平方和-误差平方和) $\times 100\%$

1.5 数据处理

采用 Excel 2007 和 DPS 13.5 软件对数据进行统计分析。采用 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。利用 Excel 2007 作图。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量及其构成的影响

由表 4 可知,施肥使株高、成穗数和产量均增加,穗粒数和千粒重年际和处理间存在差异。从 2 年试验平均值来看,与单施常量化肥(B)相比,配施猪粪处理增产 1.9%~16.5%,随猪粪替代化肥量增加产量降低,且处理间差异达显著水平;配施羊粪处理中替代 40%常量化肥处理(A₂B₃)增产 8.5%,其余 2 个处理减产;2018 年度随羊粪替代化肥量增加产量升高,替代 30%和 40%化肥处理增产,2019 年度随替代化肥量增加产量先降低后升高,仅替代 40%处理增产。施肥对成穗数 2 年试验平均值和年度间均与产量一致。施肥对千粒重的影响年度间存在差异,随猪粪替代化肥量增加千粒重降低,2018 年度随羊粪替代化肥量增加,千粒重升高,2019 年度则相反。施肥对穗粒数的影响,除 2019 年度猪粪随替代化肥量的增加而降低外,2018 年度猪粪、2 年羊粪的穗粒数均随替代化肥量增加先升高后降低,以替代 30%化肥最高。

2.2 化肥减量配施有机肥对小麦品质的影响

由表 5 可知,与单施化肥相比,有机肥与化肥配施处理使小麦籽粒容重、硬度指数、蛋白质含量和面粉沉降值均提高,使面团形成时间和稳定时间缩短;2019 年度除 A₁B₂、A₂B₁ 处理外,有机肥与化肥配施使湿面筋含量均较单施化肥处理提高。有机肥配施化肥处理籽粒容重和硬度指数以猪粪配施化肥 $>$ 羊粪配施化肥;籽粒蛋白质含量和沉降值以羊粪配施化肥 $>$ 猪粪配施化肥,其中猪粪配施化肥时以猪粪替代 20%常量化肥处理最高,羊粪配施化肥时随替代比例

加大小麦品质提高,以羊粪替代 40%常量化肥最高。

表 4 化肥减量配施有机肥的产量及其构成

年度	处理	株高/cm	成穗数/ 10 ⁴ hm ²	穗粒数	千粒重/g	产量/ (kg·hm ⁻²)
2018	A ₁ B ₁	67.7ab	479.4a	28.9a	40.5a	4976.4a
	A ₁ B ₂	67.9ab	442.1a	29.7a	39.7ab	4902.3ab
	A ₁ B ₃	69.4a	400.1b	28.4a	39.7ab	4223.7bc
	A ₂ B ₁	66.5ab	319.8c	27.5a	36.6b	3102.4d
	A ₂ B ₂	63.2bc	320.7c	27.9a	39.0ab	3693.3cd
	A ₂ B ₃	69.6a	386.6b	27.7a	40.7a	4232.8bc
	B	61.4c	348.6c	28.0a	38.2ab	3560.7cd
	CK	59.7c	310.7c	27.6a	37.7ab	3088.8d
	A ₁ B ₁	69.7b	433.3a	30.6bcd	43.0cd	6027.7a
2019	A ₁ B ₂	67.5c	412.9b	30.0cd	42.7de	5539.2c
	A ₁ B ₃	71.7a	415.8b	29.6d	42.1e	5401.9de
	A ₂ B ₁	71.7a	409.2bc	29.7d	44.3b	5778.8b
	A ₂ B ₂	69.6b	400.0c	31.2abc	43.3cd	5456.6cd
	A ₂ B ₃	64.9d	418.7b	28.2e	43.1cd	6017.5a
	B	70.6ab	410.4bc	32.0a	45.1a	5883.2b
	CK	64.0d	384.2d	31.6ab	43.7c	5326.5e

注:CK 为对照;A₁ 为猪粪;A₂ 为羊粪;B 为 N 150 kg/hm², P₂O₅ 105 kg/hm²;B₁ 为有机肥替代 B 处理 20%;B₂ 为有机肥替代 B 处理 30%;B₃ 为有机肥替代 B 处理 40%;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P <0.05)。下同。

2.3 化肥减量配施有机肥对土壤养分含量的影响

由表 6 可知,与单施化肥相比,配施有机肥处理 2 年的 0—20 cm 土壤有机质含量均提高,其中猪粪配施化肥处理的效果优于羊粪配施化肥处理,随有机肥施用量增加土壤有机质含量提高。2018 年度,猪粪配施化肥处理显著提高土壤速效磷含量,羊粪配施化肥处理则显著提高碱解氮含量,速效钾含量处理间差异不显著;2019 年度,有机肥替代 20%常量化肥处理的碱解氮、速效磷和速效钾含量低于单施化肥,猪粪替代 30%和 40%常量化肥处理显著提高碱解氮、速效磷和速效钾含量,羊粪替代 30%和 40%常量化肥处理则提高较少。与单施化肥相比,猪粪替代 30%和 40%常量化肥处理也显著提高 20—40 cm 土壤有机质、碱解氮、速效磷钾含量,羊粪替代 40%常量化肥处理仅使速效钾含量提高。

2.4 化肥减量配施有机肥对土壤含水量的影响

由图 2 可知,2018 年度,返青期、拔节期和开花期各处理土层含水量差异较小,成熟期差异较大;有机肥与化肥配施比单施化肥和不施肥(绝对 CK)各土层含水量均高,猪粪配施化肥处理效果高于羊粪配施化肥处理。

2019 年度,与单施化肥和不施肥相比,猪粪和羊粪配施化肥处理提高返青期 0—60 cm 土层含水量,羊粪配施化肥处理高于猪粪配施化肥处理,其中猪粪替代 30%常量化肥处理各土层含水量均最高,羊粪

替代 20%~30% 常量化肥处理各土层含水量较高; 拔节期、开花期和成熟期猪粪配施化肥处理各土层含水量较单施化肥和绝对 CK 降低, 羊粪配施化肥处理提高, 其中

替代 20% 和 30% 常量化肥处理拔节期和开花期各土层含水量较高, 成熟期猪粪替代 40% 常量化肥处理, 羊粪替代 20% 常量化肥处理最高。

表 5 化肥减量配施有机肥的小麦品质

年度	处理	容重/ (g · L ⁻¹)	硬度 指数/%	蛋白质/%	湿面筋/%	沉降值/mL	形成 时间/min	稳定 时间/min
2018	A ₁ B ₁	799.5a	46.33a	16.05a	35.85a	30.8a	4.33a	3.60a
	A ₁ B ₂	796.5a	44.40a	15.90b	35.51a	30.6b	4.31a	3.75a
	A ₁ B ₃	798.5a	43.71b	16.01a	35.81a	30.7b	4.15b	3.40b
	A ₂ B ₁	793.5a	41.89b	16.34a	36.43a	30.8a	4.15b	3.40b
	A ₂ B ₂	794.0a	42.62b	16.76a	37.22a	31.3a	4.29a	3.85a
	A ₂ B ₃	795.5a	44.51a	16.81a	37.46a	32.0a	4.30a	3.55ab
	B	793.0a	40.96bc	16.34a	34.38b	30.5ab	4.35a	4.00a
	CK	793.0a	40.06c	16.29a	37.60a	30.1b	4.35ab	3.60a
2019	A ₁ B ₁	786.5a	45.36a	15.75b	36.00a	26.8a	3.30a	2.65b
	A ₁ B ₂	778.5a	44.21a	15.75b	34.29b	27.5a	3.15b	2.70b
	A ₁ B ₃	777.0a	41.36b	16.03a	35.05a	27.7a	3.35a	2.65b
	A ₂ B ₁	774.0a	40.29b	15.83ab	34.90b	27.6a	3.15a	2.45b
	A ₂ B ₂	778.0a	41.28b	16.05a	35.40a	27.7a	3.10b	2.75b
	A ₂ B ₃	784.0a	43.69a	16.51a	36.05a	30.2a	3.10b	2.55b
	B	771.5a	39.98bc	15.67b	34.95ab	25.3b	3.40a	4.15a
	CK	770.0a	39.51c	15.64b	36.00a	26.9a	3.50a	4.55a

表 6 化肥减量配施有机肥的土壤养分含量

年度	处理	0—20 cm				20—40 cm			
		有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
2018	A ₁ B ₁	12.12a	40.11b	15.95a	120.9a	6.16b	21.96b	4.10b	156.0b
	A ₁ B ₂	12.30a	40.46b	14.85ab	123.0a	7.76a	24.72a	5.45a	213.5a
	A ₁ B ₃	12.45a	42.19ab	16.23a	128.0a	7.51a	26.37a	6.05a	255.5a
	A ₂ B ₁	11.80a	43.92a	11.78c	122.5a	6.60b	19.80b	3.25b	201.0ab
	A ₂ B ₂	12.01a	43.40a	11.25c	127.5a	6.48b	20.23b	4.28b	247.5a
	A ₂ B ₃	12.52a	44.61a	14.35b	135.5a	6.75b	23.77ab	5.80a	270.0a
	B	11.50b	41.15b	10.23c	118.4ab	6.99b	23.51ab	5.20a	167.0b
	CK	10.90b	33.72c	8.70d	105.0b	6.55b	19.74b	2.55c	171.0b
2019	A ₁ B ₁	13.00a	42.87b	13.60b	140.5b	6.25a	23.52a	5.06b	221.4a
	A ₁ B ₂	13.02a	47.68a	18.48ab	145.4b	7.13a	25.39a	5.44b	250.2a
	A ₁ B ₃	13.40a	50.27a	21.85a	175.0a	7.26a	27.24a	6.23a	270.6a
	A ₂ B ₁	12.50a	39.36b	12.20c	130.0c	6.92a	22.41a	4.03b	169.3b
	A ₂ B ₂	12.70a	43.06b	13.70b	142.5b	6.88a	23.58a	4.35b	220.5a
	A ₂ B ₃	12.73a	45.46ab	14.50b	156.5b	6.65a	25.65a	5.99a	259.2a
	B	11.70b	45.83b	14.03b	147.5b	7.00a	25.69a	6.02a	168.1b
	CK	9.74c	37.88c	13.38b	112.5d	6.53a	22.32a	2.66c	171.5b

2.5 化肥减量配施有机肥对小麦生育期土壤蓄水量的影响

由图 3 可知, 随小麦生育期进程 0—100 cm 土壤蓄水量降低, 枯水年型 2019 年度较为明显。2018 年度猪粪配施化肥处理播种至开花期 0—100 cm 土壤蓄水量均高于羊粪配施化肥处理, 成熟期则相反; 猪粪配施化肥处理中替代 20% 和 30% 常量化肥处理高于替代 40% 化肥处理; 2019 年度羊粪配施化肥处理

较仅施化肥处理提高 0—100 cm 土壤蓄水量, 猪粪配施化肥处理则相反, 但配施处理间差异较小。

2.6 化肥减量配施有机肥对产量水分利用率 (WUE) 的影响

由表 7 可知, 2018 年度的产量水分利用率以猪粪配施化肥 > 羊粪配施化肥 > 单施化肥, 猪粪配施化肥 WUE 较单施化肥提高 19.22%~40.74%, 其中猪粪替代 20% 常量化肥最高; 羊粪配施化肥提高

-9.58%~21.29%，其中羊粪替代40%常量化肥最高。2019年度为羊粪配施化肥>单施化肥>猪粪配施化肥，与单施化肥相比，猪粪配施化肥降低7.91%~15.56%，羊粪配施化肥提高8.74%~30.87%，也以羊粪替代40%常量化肥最高。

2年度的生育期耗水量分别为单施化肥>猪粪配施化肥>羊粪配施化肥，猪粪配施化肥>单施化肥>羊粪配施化肥；与猪粪配施时，随化肥施用比例减少，耗水量减少，与羊粪配施则为羊粪替代30%常量化肥处理最高。

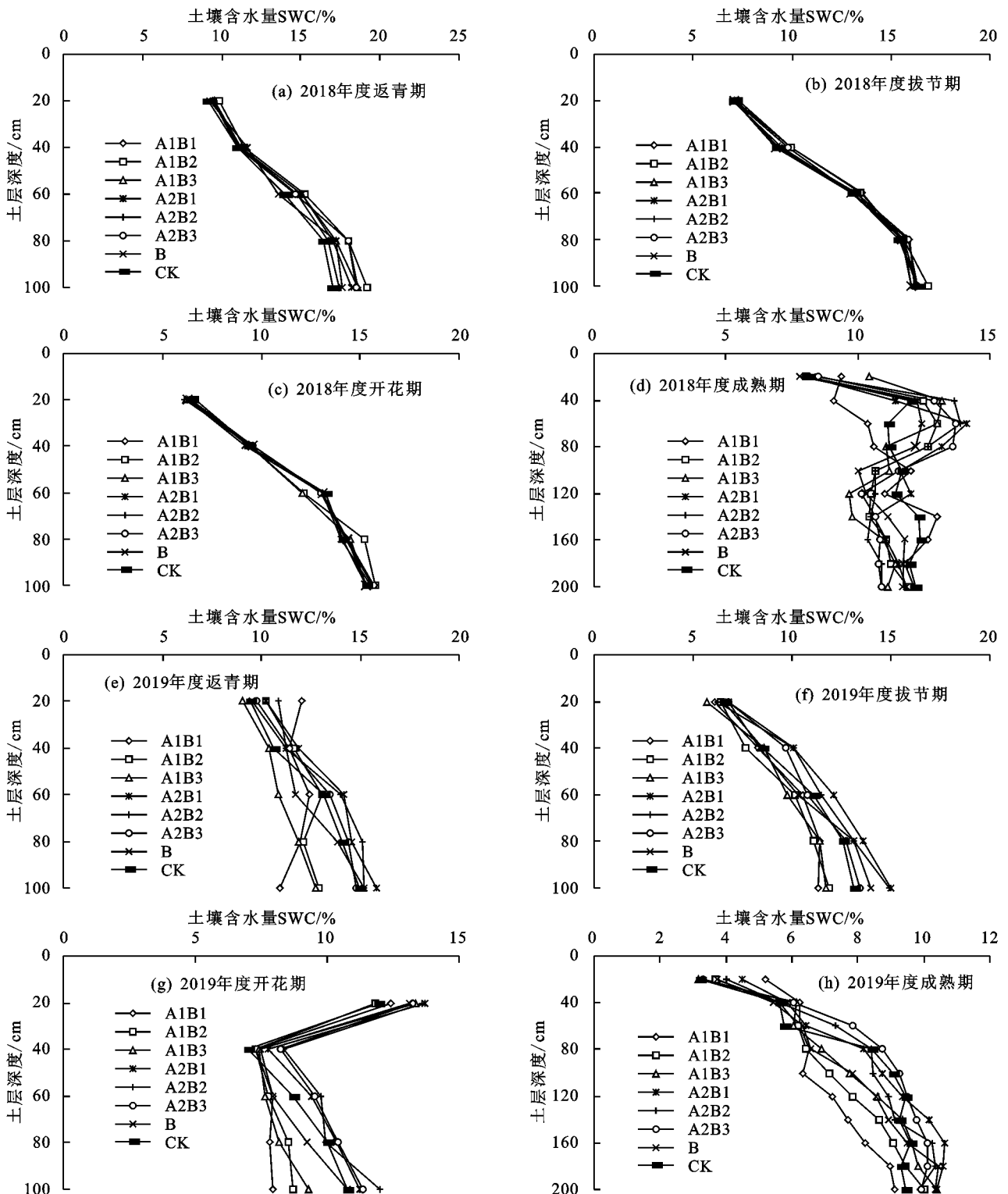


图2 化肥减量配施有机肥的生育期土壤含水量

2.7 年型、有机肥种类及其替代化肥比例对旱地小麦产量和水分利用率的影响

由表8可知，在各因素的独立效应中，年型对穗粒数、千粒重、籽粒产量和水分利用率的影响最大，其中后三者的作用力高于70%，远大于有机肥种类和有机肥替代比例；有机肥种类对成穗数的影响最大，

由表8可知，在各因素的独立效应中，年型对穗

作用力为 39.44%。互作效应中,以年型×有机肥种类互作效应对成穗数和水分利用率影响最大,年型×有机肥替代比例互作效应对千粒重影响最大,有机肥种类×有机肥替代比例互作效应对产量影响最大,年

型×有机肥种类×有机肥替代比例三因素互作效应对穗粒数的影响最大。因此,年际间降水量及其分布差异影响旱地小麦产量和水分利用率,有机肥和化肥配施受年型的影响也存在差异。

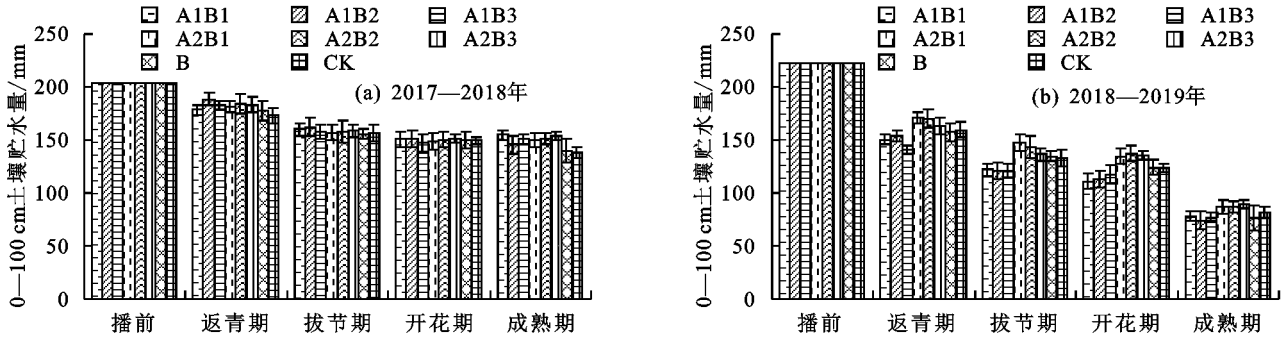


图 3 化肥减量配施有机肥的生育期土壤贮水量

表 7 化肥减量配施有机肥的产量水分利用率

年度	处理	播前土壤 贮水量/mm	生育期 降水量/mm	收获期 土壤贮水量/mm	生育期 耗水量/mm	水分利用率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
2018	A ₁ B ₁	392.94	187.8	286.37	294.37	16.94a
	A ₁ B ₂	392.94	187.8	286.60	294.14	16.67a
	A ₁ B ₃	392.94	187.8	286.93	293.81	14.35b
	A ₂ B ₁	392.94	187.8	295.65	285.09	10.88d
	A ₂ B ₂	392.94	187.8	288.34	292.40	12.63c
	A ₂ B ₃	392.94	187.8	290.75	289.99	14.60b
	B	392.94	187.8	284.87	295.87	12.03c
	CK	392.94	187.8	292.72	288.02	10.72d
2019	A ₁ B ₁	413.07	84.5	326.94	170.63	35.33c
	A ₁ B ₂	413.07	84.5	337.83	159.74	34.68c
	A ₁ B ₃	413.07	84.5	354.75	142.82	37.82bc
	A ₂ B ₁	413.07	84.5	386.63	110.94	52.09a
	A ₂ B ₂	413.07	84.5	375.40	122.17	44.66b
	A ₂ B ₃	413.07	84.5	385.63	111.94	53.75a
	B	413.07	84.5	354.33	143.24	41.07b
	CK	413.07	84.5	360.82	136.75	38.95bc

表 8 旱地小麦产量和水分利用率的作用力分析

单位: %

差异源	成穗数	穗粒数	千粒重	籽粒产量	水分利用率
年型(Y)	7.28	44.82	75.91	70.03	86.59
有机肥种类(A)	39.44	13.24	0.07	6.60	3.14
有机肥替代比例(B)	2.50	19.20	0.40	0.14	0.62
Y×A	24.77	4.15	5.96	9.56	8.05
Y×B	0.03	4.52	6.41	2.26	0.76
A×B	17.43	2.74	4.91	10.10	0.46
Y×A×B	8.55	11.32	6.35	1.32	0.38

3 讨论

3.1 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量的影响

干旱是制约雨养旱地小麦产量的重要因素,前人^[26-27]研究表明,旱地小麦产量随年降水量的增加而显著提高。本研究则表明,枯水年(2019年度)旱地

小麦产量显著高于丰水年(2018年度)。2018年度的休闲期、生育期和年型均属丰水年,但降雨集中分布在6—8月份出苗期和灌浆期,关键生育期有效降水相对较少,加之2018年4月7日出现大幅降温过程,气温降至 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,造成冻害,使成穗数减少,千粒重降低,产量水平低;2019年度生育期和年型枯水,但9,11月和翌年4月降雨较多,此时正值播种、冬前和春季生长关键期,使成穗数、穗粒数和千粒重均高于2018年度,产量水平高。因此,旱地小麦产量不仅受年度及生育期降水量的影响,与降水分布、低温冻(冷)害等也有较大关系,这与党建友等^[3]和张晶等^[28]的研究结果雨养旱地小麦生育期降水尤其是关键生育期降水对产量影响较大相一致。

前人^[15,28-30]研究表明,有机无机肥配施可显著提高小麦产量,且干旱年份下增产效果优于丰水年型,

有机肥种类及有机肥与化肥配施比例对小麦产量影响不同。本研究结果表明,与单施化肥相比,增施猪粪减施化肥2年度平均值增产1.9%~16.5%,增施羊粪减施化肥2年度平均值仅替代40%常量化肥处理增产8.5%;2018年度猪粪与氮磷配施产量水平远高于羊粪,2019年度两者间产量相差较小,且猪粪替代20%产量最高,这说明猪粪与适量氮磷配施抵御冻害和干旱效果更好。有机肥与化肥减施比例不当会导致小麦产量降低,这与张晶等^[28]和Iqbal等^[30]研究结果一致。本研究还发现,2种有机肥与氮磷配施时,不同有机肥种类及替代化肥比例对小麦产量影响不同,其中猪粪替代20%常量化肥产量最高,羊粪则替代40%常量化肥产量最高,增产的主要原因是成穗数和千粒重较高。这可能与有机肥本身的特性有关,猪粪属凉性肥料,且碳氮比相对小,因此养分释放慢且持续时间较长,有利于小麦生长中后期抵御生育期干旱及低温冻害^[31]。

3.2 化肥减量配施有机肥对旱地小麦品质的影响

小麦籽粒营养品质和加工品质不仅与基因型密切相关,更受生态条件和栽培措施的影响,降水量对小麦品质的影响也不容忽视^[32]。本研究表明,年降水量对小麦品质指标影响显著。丰水年小麦籽粒营养品质和加工品质均高于枯水年,这与张晶等^[28]的研究结果相一致,但与Souza等^[33]、孙敏等^[34]的研究结果丰水年小麦籽粒品质低于枯水年不同。2018年度虽为丰水年,但4月份遭遇低温冻害,多为分蘖成穗,籽粒相对瘪瘦,千粒重较低,因此籽粒品质和面粉品质较好。2019年度虽为干旱年,但关键生育期均有降水,显著提高了千粒重和产量,对籽粒品质有较大的稀释效应。

前人^[19,22]长期定位研究结果表明,有机肥富含作物生长所需的营养元素和有机物质,等氮量有机肥与化肥配施可实现独特的有机无机肥平衡,提高作物产量,改善耕层土壤质量;丘陵旱地有机无机合理配施有利于中强筋小麦产量品质协同提升^[15,35]。陈磊等^[20]研究认为,旱地有机肥及与氮磷肥配施使小麦籽粒养分含量增加,品质显著改善,土壤有机质和速效养分含量提高。本研究进一步证实,与单施化肥相比,有机肥与氮磷配施可提高丘陵雨养旱地小麦籽粒的容重、硬度指数、蛋白质含量和面粉沉降值,缩短面团形成时间和稳定时间。其中猪粪与氮磷配施籽粒容重和硬度指数高于羊粪与氮磷配施,后者则使蛋白质含量和沉降值高于猪粪与氮磷配施;且猪粪与氮磷配施时以猪粪替代20%常量化肥品质指标最高,羊粪则以替代40%常量化肥最高,这与张晶等^[28]的研究结果有机肥与化肥配施可提高湿面筋含量相一致,

但延长面团稳定时间不一致,可能与降水量及有机肥与化肥配施比例不同有关。

3.3 化肥减量配施有机肥对旱地小麦水分利用率的影响

小麦水分利用效率受降水量、施肥和生态因素多方面影响。有研究^[28]表明,干旱年小麦籽粒产量低,生育期耗水量少,水分利用率也较低;也有研究^[27]表明,水分利用效率与休闲期土壤贮水量相关,休闲期贮水量较多时则水分利用率高。本研究中,丰水年小麦各生育期0—100 cm土壤蓄水量均高于干旱年,但休闲期贮水量低于干旱年,加之2019年4月的低温冻害,严重影响小麦籽粒产量,小麦冬前至拔节期(2018年11月至翌年3月)降水量较常年少13.0 mm,生育期耗水量高于干旱年,因此水分利用率显著低于干旱年,这与裴雪霞等^[27,36]的研究结果相吻合。有机肥配施适量化肥可提高水分利用效率。张建军等^[37]研究结果表明,无论何种降水年型,不同氮源有机肥替代部分含氮化肥可提高冬小麦的水分利用效率。本研究中,丰水年无效降水较多且遭遇春季冻害后猪粪与氮磷配施可使水分利用率较单施化肥提高19.22%~40.74%,羊粪替代30%~40%常量化肥水分利用率较单施化肥提高4.99%~21.29%;干旱年但小麦关键生育期均有降水时,羊粪与化肥配施水分利用率较单施化肥提高8.74%~30.87%,猪粪配施化肥则降低7.91%~15.56%。猪粪和养分与化肥配施时分别以猪粪替代20%常量化肥和羊粪替代40%常量化肥最高。这可能与有机肥本身特性、休闲期降水及降水在小麦生育期分布有较大关系,关于有机肥替代常量化肥比例还需进一步研究进行验证。

4 结论

2年度有机肥与氮磷化肥配施试验表明,猪粪和羊粪与氮磷配施可提高小麦产量、籽粒容重、硬度指数、蛋白质含量和面粉沉降值,替代常量化肥一定比例可提高水分利用率;不同有机肥种类与化肥配施有差异,猪粪有利于提高春季冻害和阶段性干旱,因此,丰水年但关键生育期干旱且遭遇低温冻害年型(2018年度)增产提质增效优于羊粪配施化肥,干旱年但小麦生育关键期有降水年型(2019年度)则羊粪配施化肥效果更优。

从增产提质与化肥减施综合分析,山西南部丘陵雨养旱地小麦,猪粪替代20%常量化肥、羊粪替代40%常量化肥是实现高产稳产及提质增效的有机替代和化肥减施模式。

参考文献:

- [1] 徐兆飞.山西小麦[M].北京:中国农业出版社,2006.

- [2] 苗果园,尹钧,高志强,等.旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[J].作物学报,1997,23(3):263-270.
- [3] 党建友,裴雪霞,张定一,等.休闲期深翻时间对旱地麦田土壤水分特性和小麦产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):2975-2982.
- [4] 刘凯,杨福田,谢英荷,等.减氮覆膜对黄土高原旱地小麦产量及氮素残留的影响[J].应用与环境生物学报,2020,26(3):619-625.
- [5] 陈秀文,赵护兵,毛安然,等.夏闲期不同覆盖方式对旱地小麦水氮利用和产量的影响[J].中国土壤与肥料,2020(3):113-117.
- [6] 张夫道.有机-无机肥料配合是现代施肥技术的发展方向[J].土壤肥料,1984(1):16-19.
- [7] 杨帆,李荣,崔勇,等.我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J].中国土壤与肥料,2010(4):77-82.
- [8] 杜为研,唐杉,汪洪.我国有机肥料资源及产业发展现状[J].中国土壤与肥料,2020(3):210-219.
- [9] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [10] 白由路.高效施肥技术研究的现状与展望[J].中国农业科学,2018,51(11):2116-2125.
- [11] 史常亮,李贲,朱俊峰.劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J].中国农业大学学报,2016,21(5):169-180.
- [12] 麻坤,刁钢.化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):1113-1120.
- [13] 付浩然,李婷玉,曹寒冰,等.我国化肥减量增效的驱动因素探究[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):561-580.
- [14] 张丽.稻麦轮作系统中有机无机肥料配施对作物生长及土壤肥力的影响[D].南京:南京农业大学,2015.
- [15] 伍晓轩,杨洪坤,朱杰,等.不同有机肥种类配施化学氮肥对丘陵旱地小麦产量和籽粒蛋白质品质的影响[J].四川农业大学学报,2019,37(6):283-295.
- [16] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 318-324.
- [17] 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.
- [18] 宋震震,李絮花,李娟,等.有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):525-533.
- [19] 李燕青,林治安,温延臣,等.不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1513-1522.
- [20] 陈磊,郝明德,张少民,等.黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):230-235.
- [21] 李顺,李廷亮,何冰,等.有机肥替代化肥对旱地小麦水氮利用及经济效益的影响[J].山西农业科学,2019,47(8):1359-1365.
- [22] 李燕青,温延臣,林治安,等.不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1669-1678.
- [23] 刘占军,谢佳贵,张宽,等.不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):38-47.
- [24] 陶林威,马洪,葛芬莉.陕西省降水特性分析[J].陕西农业科学,2000(5):6.
- [25] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [26] 孙敏,温斐斐,高志强,等.不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J].作物学报,2014,40(8):1459-1469.
- [27] 裴雪霞,党建友,张定一,等.不同降水年型下深翻时间和施氮方式对小麦产量和水肥利用率的影响[J].麦类作物学报,2018,38(3):330-339.
- [28] 张晶,党建友,张定一,等.不同降水年型下小麦产量、品质及水分利用效率对有机无机肥配施的响应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(9):1625-1635.
- [29] 王淑英,樊庭录,丁宁平,等.长期定位施肥条件下黄土旱塬农田作物产量、水分利用效率的变化[J].核农学报,2010,24(5):1044-1050.
- [30] Iqbal M, Idowu O J, Hassan A, et al. Dairy manure and nitrogen fertilizer effects on residual nitrate and phosphate, and wheat yield in a sandy clay loam soil [J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(4): 562-574.
- [31] 陈贵,张红梅,沈亚强,等.猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J].土壤,2018,50(1):59-65.
- [32] 关二旗,魏益民,张波.小麦籽粒品质与基因型及环境条件的关系[J].麦类作物学报,2010,30(5):963-969.
- [33] Souza E J, Martin J M, Guttieri M J, et al. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality[J]. Crop Science, 2004, 44: 425-432.
- [34] 孙敏,葛晓敏,高志强,等.不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J].中国农业科学,2014,47(9):1692-1704.
- [35] 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.
- [36] 裴雪霞,党建友,张定一,等.不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(4):553-562.
- [37] 张建军,樊庭录,赵刚,等.长期定位施不同氮源有机肥替代部分含氮化肥对陇东旱塬冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].作物学报,2017,43(7):1077-1086.