

化肥与有机肥或秸秆配施提高陇东旱塬黑垆土上作物产量的稳定性和可持续性

王婷^{1,3}, 丁宁平^{2*}, 李利利¹, 周海燕¹, 尚来贵¹

(1 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 2 甘肃省平凉市农业科学研究院, 平凉 744000; 3 甘肃农业大学农学院, 兰州 730000)

摘要:【目的】明确陇东旱塬长期施肥黑垆土上春玉米-冬小麦轮作系统作物产量和水肥效应与降水年型的响应关系, 为该地区不同降水年型的合理施肥提供参考依据。【方法】位于甘肃平凉的长期肥料定位试验始于1979年, 试验设6个处理: 不施肥(CK)、单施化学氮肥(N)、氮磷化肥配施(NP)、氮磷化肥配施秸秆(SNP)、单施有机肥(M)和氮磷化肥配施有机肥(MNP)。调查了试验38年玉米和小麦产量, 依据降水量将生育年划分为干旱年、平水年和丰水年, 分析不同降水年型下春玉米-冬小麦轮作系统长期施肥的产量变化稳定性、可持续性和肥料贡献率, 降水利用率特征, 探讨不同降水年型下产量、施肥和降水之间的关系。【结果】与N处理相比, NP、SNP、M和MNP处理冬小麦在干旱年、平水年和丰水年分别增产89.8%~151%、108%~174%和52.1%~102%, 春玉米分别增产56.3%~99.9%、81.3%~104%和105%~127%。年降水量对冬小麦产量稳定性和可持续性影响较小, 对春玉米影响较大。与N处理相比, 三种降水年型下NP、SNP、M和MNP处理冬小麦和春玉米的肥料贡献率和降水利用率均显著提高, 其中冬小麦在干旱年、丰水年肥料贡献率和降水利用率分别增加166%~198%、520%~654%和100%~164%、53.4%~105%, 春玉米分别增加161%~218%、262%~289%和56.0%~99.2%、104%~125%。相同施肥处理下, NP、SNP、M和MNP处理冬小麦平水年和丰水年肥料贡献率分别较干旱年下降9.9%~23.3%和10.6%~23.3%, 而春玉米丰水年较干旱年和平水年分别增加6.0%~25.0%和20.4%~27.7%。NP、SNP、M和MNP处理冬小麦平水年和丰水年水分利用率分别较干旱年下降2.2%~26.6%和22.3%~37.7%, 而春玉米分别下降了41.9%~49.5%和10.9%~24.4%。回归分析表明, 不论年降水量多寡, 冬小麦和春玉米产量主要受施肥量和生育期降水影响。【结论】陇东旱塬不论年降水量多寡, 氮磷与秸秆或有机肥配施与单施氮肥相比, 均可显著提高作物产量、产量稳定性和可持续性, 并提高肥料对产量的贡献率及降水利用率。因此, 氮磷配合的基础上配合秸秆或有机肥是保障该地区农田生产力可持续的有效措施。同时, 不同降水年型应进一步优化施肥策略以获得更高产量。

关键词: 长期施肥; 降水年型; 产量稳定性; 产量可持续性指数; 肥料贡献率; 降水利用率

Combining chemical fertilizer with organic manure or straw increase the yield stability and sustainability of maize and wheat in Loess Plateau of east Gansu Province

WANG Ting^{1,3}, DING Ning-ping^{2*}, LI Li-li¹, ZHOU Hai-yan¹, SHANG Lai-gui¹

(1 Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Gansu 730070, China; 2 Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang, Gansu 744000, China; 3 College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: 【Objectives】The effect of different fertilization patterns on the yield increase of spring maize and winter wheat and the stability and sustainability of the increment were studied under different precipitation years, which will provide scientific basis for efficient management of nutrient resources in the crop production of rainfed

收稿日期: 2019-05-15 接受日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560584); 甘肃省农业科学院科研条件建设及成果转化项目(2017GAAS26)。

联系方式: 王婷 E-mail: wt1982_2000_2000@163.com; *通信作者 丁宁平 E-mail: pldnp138@sina.com

area. **【 Methods 】** The study was based on the long-term fertilization experiment established in Pingliang City, Gansu Province in 1979. The experiment had lasted for 38 years, of which, the number of dry, normal and wet years was 9, 7 and 10 for winter wheat and 7, 2 and 3 for spring maize. There were six treatments, including: no fertilizer (CK), single chemical nitrogen fertilizer (N), nitrogen-phosphorus fertilizer (NP), straw + nitrogen-phosphorus fertilizer (SNP), single organic fertilizer (M) and organic fertilizer + nitrogen-phosphorus fertilizer (MNP). We investigated the yields of winter wheat and spring maize, calculated yield stability and yield sustainable index (SYI), fertilizer contribution rate to yield (FCR) and rainfall use efficiency (RUE), and the relationships among the yield, fertilization patterns and precipitation. **【 Results 】** Compared with N treatment, the yields of winter wheat under NP, SNP, M, and MNP treatments significantly increased in all the dry, normal and wet years by 89.8%–151%, 108%–174%, and 52.1%–101.9%, the yields of spring maize were increased by 56.3%–99.9%, 81.3%–104%, and 105%–127%, respectively. The precipitation did not affect the stability and sustainability of winter wheat yield significantly, but affected those of spring maize. Compared to N treatment, the FCR and RUE of winter wheat under NP, SNP, M, and MNP treatments in the dry and wet years were significantly increased by 166%–198%, 520%–654% and 100%–164%, 53.4%–105%, respectively, and those of spring maize were increased by 161%–218%, 262%–289% and 56.0%–99.2%, 104%–125%. Compared to the dry year and under the same fertilizer pattern, the FCR of winter wheat under NP, SNP, M and MNP treatments were decreased by 9.9%–23.3% in normal years and by 10.6%–23.3% in wet years, while the FCR of maize in wet years were 6.0%–25.0% higher than those in dry years and 20.4%–27.7% higher than in normal years. Compared to dry years, the RUE of winter wheat under NP, SNP, M and MNP treatments were decreased by 2.2%–26.6% in normal years and 22.3%–37.7% in wet years, and those of maize were decreased by 41.9%–49.5% in normal years and 10.9%–24.4% in wet years. The yields of winter wheat and spring maize were closely related to fertilization patterns and precipitation in growth periods in different precipitation years. **【 Conclusions 】** In Loess Plateau of east Gansu Province, the yield, the stability and sustainability of yield, the contribution rate of fertilizer to yield and rainfall use efficiency of crops are significantly improved by both the combination use of NP fertilizers with straw returns or manures, regardless of precipitation. Thus, they are two effective fertilization strategies to guarantee the sustainable and efficient crop production in the dry farmland in this area. Further optimization in fertilization details is required in term of precipitation years.

Key words: long-term fertilization; precipitation years; yield stability; sustainable yield index; fertilizer contribution rate; rainfall use efficiency

干旱缺水和土壤肥力低是制约我国西北黄土高原旱地农业发展的主要因素^[1], 充分利用自然降水、培肥土壤是实现旱地粮食增产和农业可持续发展的重要措施^[2]。肥料的增产效应易受气候、季相变化及其交互作用影响^[3]。长期土壤肥力定位试验具有较长的时间尺度, 记载着作物生长、土壤肥力和气候变化的丰富信息^[4]。利用长期定位试验因气候等因素带来的产量不稳定性, 从而能够较为准确评估长期不同施肥模式下作物的产量和水肥效应等科学问题。

大量的研究报道了黄土高原区长期施用有机肥、化肥平衡施肥、有机无机肥配施对土壤的培肥作用和作物高产稳产效应^[5-11]。随着施肥年限的延长, 单施氮肥的增产作用下降, 而秸秆还田及有机无机配合则有逐年递增趋势^[12-14]。施肥是提高粮食产

量的主要措施, 然而氮肥效益的发挥与农田水分状况密切相关, 尤其体现在黄土高原雨养农业生态系统中^[15]。不同年份降水量下作物产量的水肥效应也是研究的一个热点。李晓州等^[16]利用位于黄土高原南部的陕西省长武县 1984 年建立的小麦长期施肥定位试验, 分析和比较了不同年份降水量下不同氮磷用量的小麦产量及其稳定性, 提出了小麦最高产量对应的氮磷施用量以及最佳经济施肥量。胡雨彤等^[1]研究表明, 连续种植 30 年冬小麦, 氮磷配施和氮磷钾配施下小麦产量、肥料贡献率和降水利用率显著高于氮磷钾单施处理。李婷等^[17]的结果表明平水年和干旱年施肥可增加作物产量和水分利用效率。樊廷录等^[6]通过研究甘肃陇东旱塬黑垆土连续 24 年的玉米小麦轮作系统长期定位施肥效应, 发现降水对化肥

尤其是氮肥的增产效果有显著影响, 而有有机肥或秸秆配施化肥处理的产量受降水影响较小。

黑垆土是中国黄土高原地区主要土壤类型之一, 集中在甘肃陇东与陕北黄土旱塬区, 保持一年一熟和两年三熟的种植方式。甘肃省是重要的粮食生产基地。该区处于半干旱向半湿润地区的过渡带, 降水变异大; 粮食作物以冬小麦为主, 而降水分布与小麦生长期需水错位, 产量年际变化大^[18]。如何根据不同降水年型合理施肥、提高水肥利用效率一直是该区农业可持续发展迫切需要解决的问题。尽管已有较多的有关不同降水年型下水、肥和产量之间关系的研究报道, 但主要集中在降水量相对丰富的陕西渭河平原, 而针对陇东旱塬黑垆土的研究仍然较少。本研究通过对甘肃平凉黑垆土定位培肥试验的长期监测, 结合历史同期气象观测资料, 研究不同降水年型下春玉米-冬小麦轮作系统长期施肥的产量变化及其稳定性、肥料贡献率和降水利用率特征, 分析不同降水年型下产量与施肥量和降水量之间的关系, 以期为当地不同降水年型下的合理施肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点位于平凉市农业科学院高平试验站(107°30'E、35°16'N), 海拔 1340 m, 年平均气温 8.6℃, 年降水量 526 mm, 其中 60% 的降水集中在 7~9 月, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2800℃, 属黄土高原半湿润偏旱区。试验地土壤为黑垆土, 黄土母质。定位试验始于 1979 年, 试验开始前耕层(0—20 cm)土壤性质为: 有机质 10.75 g/kg、全氮 0.95 g/kg、全磷 0.57 g/kg、碱解氮 65.9 mg/kg、有效磷 6.77 mg/kg、速效钾 163 mg/kg、pH 8.20。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理: 1) 不施肥对照(CK); 2) 单施化肥氮(N); 3) 化肥氮磷配施(NP); 4) 氮磷肥配合秸秆还田(SNP); 5) 单施有机肥(M); 6) 氮磷肥配合有机肥(MNP)。试验为大区设计, 无重复, 每处理面积 666.7 m²。供试化肥为尿素和过磷酸钙, 相关处理用量为 N 90 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²。有机肥为牛、羊粪为主的厩肥, 养分含量多年平均为 N 0.16%、P₂O₅ 0.16%、K 1.48%^[9], 施用量为厩肥 75000 kg/hm²。秸秆为当季作物小麦或玉米的秸秆, 收获后切碎翻入土壤, 翻压量为 3750 kg/hm², 玉米和小麦

秸秆多年平均氮、磷和钾含量分别为 0.80%、0.04%、0.99% 和 0.52%、0.03%、1.06%。试验用所有物料播前全部一次性基施, SNP 处理磷肥为每 2 年施用一次, 其余施肥处理均为每年施肥。试验区为雨养农业, 不灌水。

1979—1996 年试验按 2 年春玉米、4 年冬小麦轮作种植, 1997—1998 年冬小麦连作, 1999 年和 2000 年分别种植高粱和大豆, 2001—2018 年试验仍按 2 年春玉米、4 年冬小麦轮作种植。38 年的春玉米-冬小麦轮作周期中, 种植冬小麦 26 年, 春玉米 12 年。玉米露地穴播, 密度 5.25 万株/hm²; 小麦机械条播, 播量 187.5 kg/hm²。冬小麦年, 生育期 10 月到翌年 6 月, 收获后休闲(7~9 月); 春玉米年, 生育期为 4~9 月, 收获后休闲(10 月到翌年 3 月)。

1.3 产量测定

每季作物成熟期全区收获实测产量。春玉米按 40 m² 样方、冬小麦按 20 m² 样方, 每个处理各 5 个样方进行考种。

1.4 数据处理与计算

1.4.1 降水年型划分 降水年型划分采用生育年降水量概念^[9], 计算公式为:

$$DI = (P_{An} - M_1) / \sigma \quad (1)$$

式中, DI 表示干旱指数, P_{An} 表示生育年降水量, M₁ 表示 1979—2018 年生育年平均降水量, σ 表示多年生育年降水量的标准差。DI > 0.35 为丰水年, -0.35 ≤ DI ≤ 0.35 为平水年, DI < -0.35 为干旱年。

根据泾川气象站历年气象数据, 1979—2018 年生育年平均降水量为 526 mm。降水年型划分为: 干旱年共 16 年, 冬小麦和春玉米种植年份分别是 1982、1987、1993、1994、1995、1997、2004、2008、2009 年和 1979、1980、1985、1986、1991、2006、2012 年, 平均降水量分别为 428 mm 和 414 mm; 平水年共 9 年, 冬小麦和春玉米种植年份分别是 1981、1989、1996、2002、2014、2015、2016 年和 1992、2005 年, 平均降水量 534 mm 和 540 mm; 丰水年共 13 年, 冬小麦和春玉米种植年份分别是 1983、1984、1988、1990、1998、2001、2003、2007、2010、2013 年和 2011、2017、2018 年, 平均降水量 656 mm 和 630 mm。

1.4.2 产量、稳定性和产量可持续性 根据划分的降水年型将所在年份的产量分类平均, 得出干旱年、平水年、丰水年的平均产量。产量稳定性以统

计学上的变异系数 (coefficient of variation, CV) 表示, 可衡量年际间产量的变异程度, CV 越大则说明产量稳定性越低。计算公式为^[20]:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (2)$$

产量可持续性采用可持续产量指数来表征, 指数越高则说明该系统的可持续越好。计算公式为^[21]:

$$SYI = \frac{\bar{Y} - \sigma}{Y_{max}} \times 100\% \quad (3)$$

式 (2)、(3) 中, σ 为标准差 (kg/hm^2), \bar{Y} 为平均产量 (kg/hm^2), Y_{max} 为所有年份中产量的最大值 (kg/hm^2)。

1.4.3 肥料贡献率和降水利用率 肥料贡献率指施用肥料增加的作物产量占总产量的百分比, 反映了年投入肥料的生产能力^[22]。计算公式为:

$$FCR = (Y - Y_0) / Y \times 100\% \quad (4)$$

式 (4) 中, Y 为施肥区作物产量, Y_0 为无肥区作物产量。

降水利用率 [$\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$] = 当年产量/生育期降水量

肥料贡献率和降水利用率的年际变异以 CV 值表征。

1.4.4 降水、施肥和产量关系模型 不同降水年型下产量与降水和肥料多元一次回归方程:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_iX_i \quad (5)$$

式 (5) 中, Y 为产量; b_0 为常数项; b_i 为回归方程系数; X_1, X_2, \dots, X_i 为自变量。

1.5 数据统计

用 Microsoft Excel 2010 软件计算和处理试验数据, SigmaPlot 14.0 绘图。采用 SPSS20.0 软件对不同降水年型下各处理增产效应进行 T 检验显著性分析, 并使用逐步回归分析降水量、施肥量与产量的关系。用 LSD 法检验回归方程在 $P < 0.05$ 水平上的显著性。

2 结果与分析

2.1 降水年型对不同处理冬小麦和春玉米产量的影响

表 1 表明, N 处理冬小麦产量较 CK 在干旱年、平水年和丰水年分别平均增产 40.3%、8.6% 和 42.4%, 年降水量显著影响着氮肥的增产效果。NP、SNP、M 和 MNP 处理冬小麦产量较 N 处理在干旱年和平水年增产幅度较大, 而丰水年增产幅度较小, 其干

旱年分别增产 130%、140%、89.8% 和 151%, 平水年分别增产 108%、113%、123% 和 174%, 丰水年分别增产 52.1%、70.6%、58.9% 和 102%。其中, SNP 和 MNP 处理冬小麦产量在所有降水年型增产幅度均明显高于 NP 和 M 处理。不同降水年型间, NP 和 SNP 处理的增产效应差异不显著。然而, M 和 MNP 处理产量平水年比干旱年分别显著增加了 23.5% 和 14.7%, 丰水年分别显著增加了 22.8% 和 18.1%。说明, 氮磷配施、氮磷肥配合秸秆还田的增产效应受降水量的影响较小, 有机肥或者有机肥 + 氮磷配施效果对降水量的响应较为敏感, 其效果随降水量的增加而增加。

相同降水年型下, N 处理春玉米干旱年和丰水年产量较不施肥分别增加 25.4% 和 17.1%, 而平水年减少了 11.4% (表 1)。NP、SNP、M 和 MNP 处理产量较 N 处理显著提高了玉米产量, 但与冬小麦相反, 其增产效应在干旱年和平水年增产幅度较小, 而丰水年增产幅度较大, 其干旱年分别增产 56.3%、69.5%、62.8% 和 99.9%, 平水年分别增产 81.3%、91.1%、90.6% 和 104%, 丰水年分别增产 105%、105%、118% 和 127%。相同施肥处理下, 平水年 N、NP、SNP、M 和 MNP 处理春玉米产量分别较干旱年减少 35.4%、25.1%、27.2%、24.4% 和 34.2%, 丰水年各处理分别较干旱年增加 2.0%、33.9%、23.4%、36.3% 和 15.8%。

2.2 不同降水年型作物产量的稳定性和可持续性

由表 2 看出, 干旱年各处理冬小麦产量变异 (DCV) 强弱表现为 $N > CK > NP > MNP \approx SNP > M$, 平水年变异 (NCV) 强弱为 $N > CK > NP > MNP \approx M > SNP$, 丰水年变异 (WCV) 强弱为 $N > CK > M > NP > MNP > SNP$, 说明与 CK、N 和 NP 处理相比, SNP、M 和 MNP 处理能提高冬小麦的产量稳定性。相同施肥处理下, NP、SNP、M 和 MNP 处理不同降水年型间产量变异系数 (YCV) 范围 2.1%~9.5%, CK 和 N 处理变异系数分别为 15.2% 和 17.8%, 说明氮磷配施或有机肥、秸秆配施氮磷肥处理小麦产量稳定性受年际间降水变化的影响较小。

冬小麦不同降水年型下, SNP 处理的产量可持续性 (SYI) 值最高, 干旱年、平水年和丰水年分别为 52.6%、59.1% 和 48.5%, 平均为 53.4%, 然后依次是 MNP、M、NP、CK, SYI 值平均分别为 50.9%、49.4%、46.6% 和 36.6%。N 处理 SYI 值最低, 并且在不同年型间表现出较大不同, 在干旱年、平水年和丰水年分别为 38.7%、10.3% 和 20.4%。

表 1 不同降水年型冬小麦和春玉米的产量
Table 1 Yields of winter wheat and spring maize under different precipitation years

处理 Treatment	干旱年 Dry year	平水年 Normal year		丰水年 Wet year	
	产量 (kg/hm ²) Yield	产量 (kg/hm ²) Yield	增产 (%) Increase	产量 (kg/hm ²) Yield	增产 (%) Increase
冬小麦 Winter wheat					
CK	1158 ± 142	1571 ± 255	35.8*	1672 ± 223	44.4*
N	1624 ± 232	1706 ± 466	5.1	2380 ± 459	46.6*
NP	3737 ± 392	3551 ± 428	-5.0	3620 ± 352	-3.1
SNP	3890 ± 340	3636 ± 313	-6.5	4060 ± 364	4.4
M	3081 ± 251	3806 ± 394	23.5*	3782 ± 405	22.8*
MNP	4069 ± 358	4665 ± 483	14.7*	4806 ± 450	18.1*
春玉米 Spring maize					
CK	3508 ± 357	3207 ± 1410	-8.6	3833 ± 576	9.3
N	4401 ± 427	2841 ± 996	-35.4	4487 ± 160	2.0
NP	6880 ± 510	5151 ± 1414	-25.1	9214 ± 612	33.9*
SNP	7459 ± 822	5428 ± 1465	-27.2	9202 ± 595	23.4*
M	7167 ± 887	5415 ± 1651	-24.4	9766 ± 763	36.3*
MNP	8797 ± 1011	5791 ± 1598	-34.2	10186 ± 678	15.8*

注 (Note): 种植冬小麦和夏玉米的干旱年、平水年和丰水年分别有 9、7、10 年和 7、2 和 3 年 There are 9, 7, 10 years and 7, 2 and 3 years of dry year, normal year and wet year for planting winter wheat and summer maize respectively. *—同一处理下, 与干旱年相比增产效应在 0.05 水平上差异显著 Yield increase is significant relative to dry year for the same treatment ($P < 0.05$);

上述结果说明, 秸秆 + 氮磷和有机肥 + 氮磷配施是保障旱地农田生产力可持续的有效措施。同一施肥处理干旱年、平水年和丰水年 SYI 值总体表现为先增加后下降趋势。

相同降水年型下, 与 CK 处理相比, 干旱年 M、MNP 和 SNP 处理的玉米产量稳定性较低 (表 2)。随降水增加, NP、SNP、M 和 MNP 处理玉米产量稳定性随之提高。说明降水可促进玉米产量稳定性提高。相同施肥处理下, 不同降水年型间 N、M、MNP、NP 和 SNP 施肥处理产量 YCV 值范围为 19.3%~24.0%, 说明年际间降水变化对产量稳定性有较大影响。

春玉米不同降水年型各处理 SYI 值表现为丰水年 > 干旱年 > 平水年 (表 2)。丰水年 SYI 值表现为 N > SNP > NP > MNP > M > CK, 其范围为 58.1%~87.6%。干旱年为 NP > N > SNP > CK > MNP > M, 其范围为 46.8%~65.7%。平水年为 SNP > NP > MNP > M > N > CK, 其范围为 23.3%~44.8%。结果说明 SNP 和 NP 处理产量受降水影响相对较小, 在水分少或多的年份均能保持较高的产量可持续性, 而有机肥处理在水分充足的情况下, 对

玉米的持续增产有积极意义。

2.3 不同降水年型下的肥料贡献率

不同降水年型下, 冬小麦和春玉米肥料贡献率 (FCR) 均表现为 N 处理低于 NP、SNP、M 和 MNP 处理 (图 1)。干旱年冬小麦和春玉米 N、NP、SNP、M 和 MNP 处理 FCR 分别为 23.6%、69.0%、70.2%、62.9%、71.7% 和 18.1%、48.9%、49.2%、47.2%、57.4%。平水年分别为 -8.7%、53.0%、56.5%、56.5%、64.6% 和 -3.5%、44.4%、47.3%、46.7%、50.5%, 丰水年分别为 8.5%、54.1%、58.9%、52.7%、64.0% 和 15.6%、27.8%、21.9%、23.5%、22.5%。同一施肥处理下, NP、SNP、M 和 MNP 处理冬小麦平水年和丰水年 FCR 分别较干旱年下降 9.9%~23.3% 和 10.6%~23.3%, 而春玉米丰水年较干旱年和平水年分别增加 6.0%~25.0% 和 20.4%~27.7%。结果表明, 与长期单施氮肥相比, 氮磷配施或有机肥、秸秆配施氮磷肥提高了肥料贡献率和降水利用率。

2.4 不同降水年型下的降水利用率

不同降水年型下, 冬小麦和春玉米降水利用率

表 2 不同降水年型下冬小麦和春玉米的产量稳定性和可持续性指数 (%)

Table 2 Yield stability and sustainable indexes of winter wheat and spring maize under different precipitation years

处理 Treatment	干旱年 Dry year		平水年 Normal year		丰水年 Wet year		YCV
	DCV	SYI	NCV	SYI	WCV	SYI	
冬小麦 Winter wheat							
CK	36.7	43.8	43.0	28.0	42.2	38.1	15.2
N	42.9	38.7	72.2	10.3	61.0	20.4	17.8
NP	31.5	45.8	31.9	49.3	30.8	44.6	2.1
SNP	26.2	52.6	22.8	59.1	28.4	48.5	4.5
M	24.5	48.6	27.4	55.6	33.8	44.1	9.5
MNP	26.4	52.0	27.4	53.5	29.6	47.3	7.1
春玉米 Spring maize							
CK	26.9	54.6	62.2	23.3	26.1	58.1	7.3
N	25.7	56.0	49.6	33.7	6.2	87.6	19.3
NP	19.6	65.7	38.8	44.1	11.5	80.3	23.5
SNP	29.2	55.0	38.2	44.8	11.2	81.7	20.9
M	32.8	46.8	43.1	39.7	13.5	73.0	24.0
MNP	30.4	51.6	39.0	43.9	11.5	76.4	22.2

注 (Note): DCV、NCV、WCV、YCV 分别表示干旱年、平水年、丰水年和降水年型间的变异系数 DCV, NCV, WCV and YCV represent the variation coefficients of wet, normal, wet years and among the precipitation years; SYI—可持续性指数 Sustainable index.

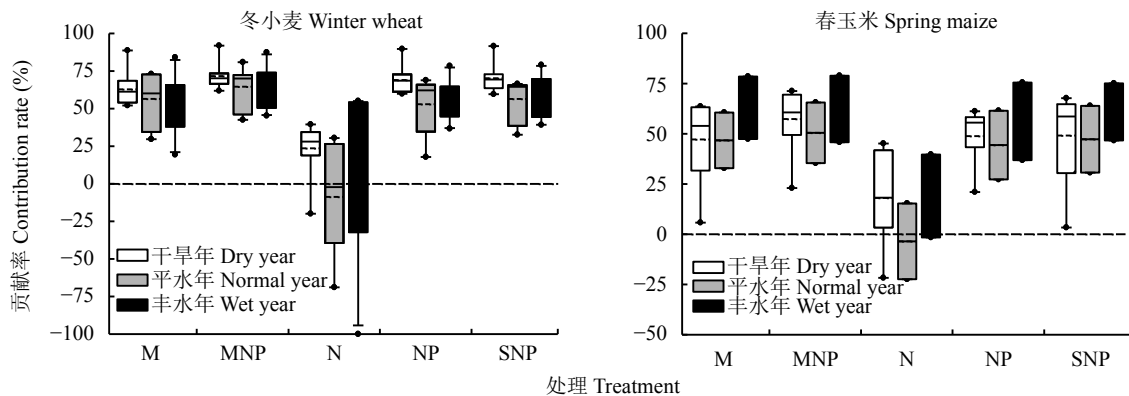


图 1 不同降水年型下各施肥处理的冬小麦和春玉米肥料贡献率

Fig. 1 Fertilizer contribution rate of winter wheat and maize under different fertilization treatments in different precipitation patterns

[注 (Note): 箱形框中的实线和虚线分别表示数据集的中值和平均值, 上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 位分数, 上下水平短线表示数据集的 5% 和 95% 区间, 箱外上下圆点分别表示数据集的最大值和最小值。The horizontal solid lines and short dash inside boxes indicate the median and the mean of dataset, the upper and lower limits of box represent 25% and 75% of dataset, the upper and lower short lines outside box indicate the 5% and 95% of dataset, the upper and lower dots outside box indicate the maximum and minimum, respectively.]

(RUE) 均表现为 CK 和 N 处理低于 NP、SNP、M 和 MNP 处理 (图 2)。冬小麦 CK 和 N 处理 RUE 平均分别为 $2.7 \text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ 和 $3.5 \text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$, 春玉米 CK 和 N 处理 RUE 平均分别为 $6.9 \text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ 和 $7.7 \text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ 。干旱年冬小麦 NP、SNP、M 和

MNP 处理 RUE 分别比 N 处理增加 140%、153%、100% 和 164%, 春玉米分别增加 56.0%、70.5%、62.1% 和 99.2%。平水年冬小麦 NP、SNP、M 和 MNP 处理 RUE 分别比 N 处理增加 112%、118%、129% 和 180%, 春玉米分别增加 81.1%、90.9%、

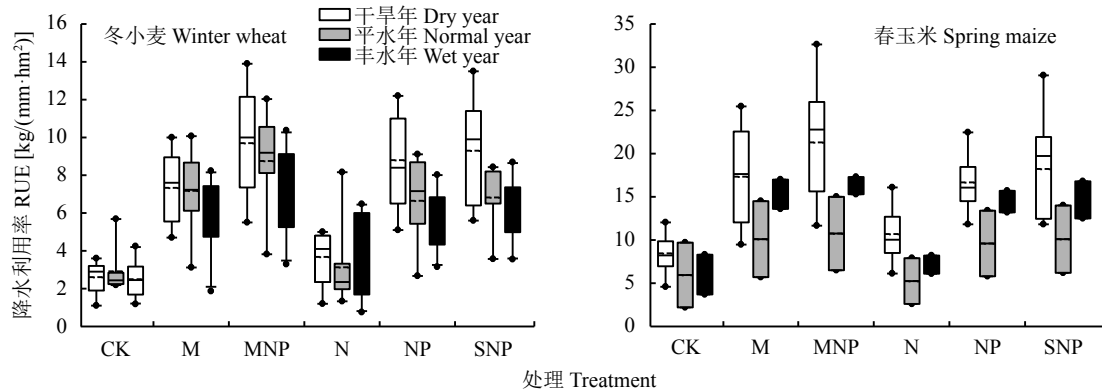


图 2 不同降水年型下各施肥处理的冬小麦和春玉米降水利用率

Fig. 2 Rainfall use efficiency (RUE) of winter wheat and maize under different fertilization treatments in different precipitation years

[注 (Note): 箱形框中的细实线和短虚线分别表示数据集的中值和平均值, 上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 位分数, 上下水平短线表示数据集的 5% 和 95% 区间, 箱外上下圆点分别表示数据集的最大值和最小值。The horizontal solid lines and short dash inside boxes indicate the median and the mean of dataset, the upper and lower limits of box represent 25% and 75% of dataset, the upper and lower short lines outside box indicate the 5% and 95% of dataset, the upper and lower dots outside box indicate the maximum and minimum, respectively.]

90.5% 和 103.6%。丰水年冬小麦 NP、SNP、M 和 MNP 处理 RUE 分别比 N 处理增加 53.4%、72.7%、59.6% 和 105%, 春玉米分别增加 104%、104%、116% 和 125%。同一处理冬小麦 RUE 随降水增加而下降, 春玉米平水年 RUE 低于干旱年和丰水年。

2.5 降水量、施肥量与产量的关系

用逐步回归法建立不同降水年型下冬小麦产量 (Y)、氮磷肥料用量 (N、 P_2O_5) 和生育年降水 (P_{An}) 三者之间的多元一次回归方程。结果表明, 冬小麦在干旱年, $Y = -941.017 + 14.212N + 5.628P_{An}$ ($R^2 = 0.426$, $F = 18.919$, $P < 0.001$); 在平水年, $Y = 2203.134 + 13.527P_2O_5$ ($R^2 = 0.392$, $F = 25.767$, $P < 0.001$); 在丰水年, $Y = -3499.8 + 15.514N + 8.063P_{An}$ ($R^2 = 0.449$, $F = 23.243$, $P < 0.001$)。春玉米在干旱年, $Y = -1393.965 + 26.586N + 12.039P_{An}$ ($R^2 = 0.449$, $F = 15.904$, $P < 0.001$); 在平水年, $Y = 5221.13 + 18.375P_2O_5$ ($R^2 = 0.777$, $F = 13.928$, $P < 0.001$); 在丰水年, $Y = 5623.979 + 29.345P_2O_5$ ($R^2 = 0.546$, $F = 19.215$, $P < 0.001$)。在干旱年, 冬小麦和春玉米产量均与施氮量和生育年降水呈极显著正相关关系, 偏相关系数分别为 0.621、0.321 和 0.642、0.322。在平水年, 冬小麦和春玉米产量均仅与施磷量呈极显著正相关关系, 偏相关系数分别为 0.626 和 0.881。在丰水年, 冬小麦产量与施氮量和降水量呈极显著正相关关系, 偏相关系数分别为 0.622 和 0.394。春玉米产量仅与施磷量呈极显著正相关关系, 偏相关系数为 0.739。

3 讨论

3.1 长期施肥下的产量稳定性与可持续性

有关该长期定位试验的已有研究表明, 相对于不施肥处理, 各施肥处理均使作物增产, 氮磷肥与有机肥/秸秆配施处理尤为显著^[10, 14, 23]。本研究进一步证实, 不同降水年型下, 秸秆还田的 SNP 处理和含有机肥的 M 和 MNP 处理冬小麦和春玉米的平均产量均高于 CK、N 和 NP, 增产幅度高于 N 和 NP。这是因为长期施用有机肥及秸秆还田显著增加了土壤有机质、全氮^[14]、有效磷^[11]和速效钾含量^[8], 维持了土壤养分供给能力。本研究中, 年降水量对 CK 和 N 处理的小麦产量影响显著, 而对 NP、SNP、M 和 MNP 处理的影响较小, 与胡雨彤等^[1]发现丰水年和平水年冬小麦产量高于干旱年, 且丰水年产量显著高于干旱年这一结论不同。该研究是在关中平原进行的, 其降水量较高, 且化肥施用量也高于本试验。本研究中, NP、SNP、M 和 MNP 处理冬小麦产量较 N 处理在干旱年和平水年增产幅度较大 (89.8%~173.5%), 而丰水年增产幅度较小 (52.1%~101.9%)。由于供试土壤有机质、全氮、有效氮和有效磷含量均较为缺乏^[24], 土壤肥力越低, 产量对外源养分投入的依赖性就越高^[7]。因此, 土壤养分, 特别是氮素是本试验中限制小麦和玉米生长的重要因素。年降水量影响外源养分和土壤养分的有效性。另一方面, 受施肥养分供给能力制约, NP、SNP、M 和 MNP 处理并没有表现出随着降水的增加冬小麦产量表现为

显著增加。李晓州等^[16]研究认为黄土高原冬小麦在不同降水年型下,平水年最佳经济施氮量为 161 kg/hm²、施磷量为 151 kg/hm²,干旱年最佳氮、磷用量为 135 kg/hm²、143 kg/hm²,丰水年最佳经济氮、磷量分别为 167 kg/hm²、153 kg/hm²。这与本试验的氮、磷投入量相差较大。这也可能是单施有机肥 M 处理效果好于 N、NP 处理的原因。说明在水分不成为限制产量增加的因素情况下,冬小麦仍然具有一定的增产空间,应进一步优化施肥,以达到水肥协调供应,增加产量的目的。与冬小麦相反,相同降水年型下, NP、SNP、M 和 MNP 处理春玉米增产效应在干旱年和平水年增产幅度较小(56.3%~103.8%),而丰水年增产幅度较大(105.3%~127.0%),结果说明降水保障了氮磷配施或施用有机肥/秸秆+氮磷配施春玉米产量增加。玉米产量在不同降水年型下存在差异的原因可能和玉米生长季水热供应因素与其需水需肥特征匹配的吻合度有关^[18]。此外,水肥交互作用^[25]也影响产量的形成。平水年较干旱年和丰水年各处理均表现为负增产效应(24.4%~34.2%),具体原因在于 12 年的春玉米种植期内,仅有 2 年为平水年,其中 1992 年玉米种植季由于品种更替原因导致低产(产量范围 1213.5~3531.0 kg/hm²),严重拉低了平水年平均产量,这有待今后持续观测与研究。

作物产量稳定性是判断农田生态系统质量好坏的重要指标^[26],而产量可持续性衡量农田生态系统是否能持续生产的一个重要参数^[27]。本研究中,相同降水年型, NP、SNP、M 和 MNP 处理冬小麦 26 年种植期产量稳定性和可持续性指数均高于 CK 和 N 处理,且其随降水略减但变幅较小。这与李秀英等^[28]和 Manna 等^[29]研究认为化肥 NPK 均衡施用及 NPK 配施有机肥可提高小麦产量稳定性和可持续性的结论较为一致。对于春玉米,秸秆或有机肥+氮磷处理在丰水年能极大提高玉米产量稳定性和可持续性,而在干旱年其配施效果并不明显。原因在于作物可持续性指数因施肥、作物种类和水热等气象因子不同而呈显著差异^[30],在不同的降水年型下有机无机合理配施才能保持农田生产力的稳定性,而不均衡施肥导致农业生态系统养分不均衡,可持续性差。门明新等^[26]对华北平原潮土长期施肥试验的结果表明,产量稳定性与施肥量无明显关系,但与氮、磷、钾肥配比明显相关。本研究结论也进一步证实了我们所提出的在陇东旱塬冬小麦和春玉米生产中针对不同降水年型应进一步优化施肥的建议。

3.2 长期施肥不同降水年型的肥料贡献率和降水利用率

樊廷录等^[6]在黄土高原黑垆土进行的 24 年定位试验的研究认为,在干旱、正常、丰水年型中,氮磷肥与有机肥/秸秆配施处理的肥料贡献率均高于单施氮处理。本研究也证实,与长期单施氮肥相比,施用氮磷配施有机肥/秸秆提高了肥料贡献率和降水利用率,这也与胡雨彤等^[1]研究结论一致。肥料贡献率和降水利用率受作物类型、土壤条件、气候、施肥措施和其他因素综合影响^[1-5]。本研究表明,冬小麦降水利用率随降水增加而下降,春玉米平水年降水利用率低于干旱年和丰水年。NP、SNP、M 和 MNP 处理冬小麦平水年和丰水年肥料贡献率低于干旱年,春玉米丰水年肥料贡献率高于干旱年和平水年。主要原因与不同处理的产量对降水的响应程度差异有关。对于冬小麦,CK 处理产量随降水增加增产幅度较大,而 NP、SNP、M 和 MNP 处理随降水增加增产幅度较小,导致了较低的肥料贡献率。对于春玉米,丰水年 CK 处理产量随降水增加无明显差异,而 NP、SNP、M 和 MNP 处理产量随降水增加而增加,因此导致了较高的肥料贡献率。本研究结果说明,水分并不是唯一限制该地区冬小麦产量的主导贡献因素,更多的应考虑施肥因素,而对于春玉米结果相反,水分成为限制产量提高的主导因素。

3.3 施肥、降水和产量的关系

在不同的降水年型下合理施肥达到“以肥调水,以水促肥”是黄土高原作物高产稳产的关键^[17]。胡雨彤等^[1]研究得出不同降水年型下冬小麦产量主要受氮磷肥施用量、休闲期降水和越冬期降水影响。本研究建立的不同降水年型下施肥、降水和产量多元一次回归方程表明,氮肥施用和生育年降水是影响干旱年、丰水年冬小麦和干旱年春玉米产量的制约因素。磷肥施用是影响平水年冬小麦、春玉米和丰水年春玉米产量的制约因素。降水制约产量形成的原因主要在于,一方面陇东旱塬降水分布与冬小麦生长期需水错位,降水对小麦产量的关键限制时期逐步从小麦营养生长期前期向生殖生长期推移^[18],另一方面陇东旱塬冬小麦生产中土壤水库贮水是冬小麦安全生产的重要保证,仅靠生育期自然降水很难满足冬小麦生长需要^[31]。氮肥对于干旱年冬小麦和春玉米产量的限制可能是由于土壤水分较低,水氮交互作用较弱,水分限制了氮肥的增产效应,而在丰水年由于氮肥投入不足,不能给冬小麦提供足够的养

分, 从而限制冬小麦产量形成。同样, 磷肥对平水年冬小麦、春玉米和丰水年春玉米产量的限制也可能是由于作物不能获得足够的养分而造成。综上所述, 实践中应多采取保墒蓄水措施, 使土壤水库发挥节水调水作用。在进一步优化施肥时, 应考虑氮、磷肥的适当投入, 以保证作物高产。

4 结论

38 年的冬小麦-春玉米轮作期, 在干旱年、平水年和丰水年, 氮磷肥配合施用有机肥或者秸秆还田较单施氮肥显著提高了作物产量及其稳定性和可持续性, 提高了肥料对籽粒的贡献率和降水利用率, 增产效应冬小麦在干旱年和平水年大于丰水年, 而春玉米在干旱年和平水年增产幅度较小, 丰水年增产幅度较大。

降水年型对冬小麦产量稳定性和可持续性影响较小, 对春玉米影响较大。冬小麦施肥处理肥料贡献率和降水利用率随降水增加而降低, 而春玉米肥料贡献率随降水增加而增加, 降水利用率表现为干旱年 > 丰水年 > 平水年。

在陇东旱塬实行秸秆 + 氮磷或有机肥 + 氮磷的施肥策略是保障旱地农田生产力可持续的有效措施, 然而在冬小麦丰水年和春玉米干旱年, 仍需进一步优化施肥, 促进水肥耦合, 以保证作物高产稳产。

参 考 文 献:

- [1] 胡雨彤, 郝明德, 王哲, 等. 不同降水年型下长期施肥旱地小麦产量效应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 135-141.
Hu Y T, Hao M D, Wang Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on winter wheat yield from the dry land under different precipitation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 135-141.
- [2] 李军, 邵明安, 王立祥. 黄土高原地区粮食生产潜力与粮食生产发展战略探讨[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 122-124.
Li J, Shao M A, Wang L X. Developing strategy of grain crop production in Loess Plateau Region of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(1): 122-124.
- [3] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 926-933.
Huang Q R, Hu F, Li H X, *et al.* Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 926-933.
- [4] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1-9.
Shen S M. The scientific value of long-term soil fertility experiment[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, 1(1): 1-9.
- [5] 方日尧, 同延安, 耿增超, 等. 黄土高原区长期施用有机肥对土壤肥力及小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 53-55.
Fang R Y, Tong Y A, Geng Z C, *et al.* Effect of a long-term organic fertilization on wheat yield and soil fertility on Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(2): 53-55.
- [6] 樊廷录, 周广业, 王勇, 等. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 127-131, 136.
Fan T L, Zhou G Y, Wang Y, *et al.* Long-term fertilization on yield increase of winter wheat-maize rotation system in Loess Plateau dryland of Gansu[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 127-131, 136.
- [7] 郝明德, 王旭刚, 党廷辉, 等. 黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析[J]. 作物学报, 2004, 30(11): 1108-1112.
Hao M D, Wang X G, Dang T H, *et al.* Analysis of long term fertilization effect on yield of wheat in dry land on Loess Plateau[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(11): 1108-1112.
- [8] 王婷, 周海燕, 李利利, 等. 长期不施化学钾肥对陇东旱塬作物产量及土壤速效钾含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (5): 44-49.
Wang T, Zhou H Y, Li L L, *et al.* Effect of different long-term fertilizations without chemical potassium on crop yield and soil available potassium contents in Loess Plateau of Eastern Gansu[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (5): 44-49.
- [9] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期施肥下黄土旱塬黑垆土供氮能力的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1487-1495.
Wang S Y, Fan T L, Ding N P, *et al.* Changes of soil nitrogen supply in black loessial in Loess Plateau under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1487-1495.
- [10] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 长期施肥条件下黄土高原黑垆土作物产量与土壤碳氮的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4047-4055.
E S Z, Ding N P, Li L L, *et al.* Relationship of crop yield and soil organic carbon and nitrogen under long term fertilization in black loessial soil region on the Loess Plateau in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4047-4055.
- [11] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 黄土旱塬黑垆土长期肥料试验土壤磷素和磷肥效率的演变特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 1038-1047.
Wang S Y, Fan T L, Ding N P, *et al.* Change characteristics of soil phosphorus and phosphorus fertilizer efficiency in black loessial soil of dryland in the Loess Plateau under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(7): 1038-1047.
- [12] 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.
Zhang S M, Hao M D, Chen L. Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(6): 85-89.
- [13] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 黄土旱塬小麦长期施肥的产量效应及土壤肥力变化[J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 75-79, 88.
Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Yield effects and soil evolution of long-term application of fertilizer on wheat in dry land of Loess Plateau[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2007, 16(5): 75-79, 88.
- [14] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 黄土高原黑垆土施肥的作物累积产量及土壤肥力贡献[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 195-206.

- E S Z, Ding N P, Li L L, *et al.* Contribution of fertilization to accumulative crop yield and soil fertility in Heilusoil region of the loess plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 195–206.
- [15] 李芳林, 郝明德, 杨晓, 等. 黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(1): 154–157.
- Li F L, Hao M D, Yang X, *et al.* Effects of fertilization on soil water and winter wheat yield in dry land of Loess Plateau[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 154–157.
- [16] 李晓州, 郝明德, 赵晶, 等. 不同降水年型下长期施肥的小麦产量效应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3237–3244.
- Li X Z, Hao M D, Zhao J, *et al.* Effect of long-term fertilization on wheat yield under different precipitation patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3237–3244.
- [17] 李婷, 刘文兆, 张益望, 等. 不同降水年型氮磷配施对冬小麦产量形成及水量平衡的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(3): 156–160.
- Li T, Liu W Z, Zhang Y W, *et al.* Effects of fertilizer N and P on winter wheat yield and water balance in different years of precipitation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(3): 156–160.
- [18] 李兴茂, 倪胜利, 王立明. 陇东旱塬区降水量演变与冬小麦产量和生长发育变化关系的探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 28–31.
- Li X M, Ni S L, Wang L M. Relationship between rainfall variation with yield and growth of winter wheat in Loess Plateau of east Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 28–31.
- [19] Guo S, Zhu H, Dang T, *et al.* Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid loess plateau in China[J]. *Geoderma*, 2012, 189–190: 442–450.
- [20] Piepho H. Methods for comparing the yield stability of cropping systems[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1998, 180(4): 193–213.
- [21] Singh P R, Das S K, Bhaskara R U M. Towards sustainable dryland agricultural practices[M]. Hyderabad, India: Central Research Institute for Dryland Agriculture, 1990. 106.
- [22] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 3997–4007.
- Wang W N, Lu J W, Li Y S, *et al.* Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 3997–4007.
- [23] 周海燕, 丁宁平, 王婷, 等. 黑垆土长期施肥对冬小麦-玉米轮作产量的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2017, (1): 34–37.
- Zhou H Y, Ding N P, Wang T, *et al.* Effects of long-term fertilization on winter wheat-maize rotation yield in Black Loess Soil[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2017, (1): 34–37.
- [24] 张树清, 孙小凤. 甘肃农田土壤氮磷钾养分变化特征[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 13–18.
- Zhang S Q, Sun X F. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients of arable soil in Gansu[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 13–18.
- [25] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 II. 不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(1): 9–14.
- Jin K, Wang D S, Cai D X, *et al.* Response and interaction for water fertilizer II. The effect of different compositions of N, P, water on the yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1999, 5(1): 9–14.
- [26] 门明新, 李新旺, 许皞. 长期施肥对华北平原潮土作物产量及稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, (8): 2339–2346.
- Men M X, Li X W, Xu H. Effects of long-term fertilization on crop yields and stability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, (8): 2339–2346.
- [27] Bhattacharyya R, Kundu S, Prakash V, *et al.* Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean-wheat system of the Indian Himalayas[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(1): 33–46.
- [28] 李秀英, 李燕婷, 赵秉强, 等. 褐潮土长期定位不同施肥制度土壤生产功能演化研究[J]. *作物学报*, 2006, 32(5): 683–689.
- Li X Y, Li Y T, Zhao B Q, *et al.* The dynamics of crop yields under different fertilization systems in drab fluvo-aquic soil[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(5): 683–689.
- [29] Manna M, Swarup A, Wanjarri R, *et al.* Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2): 397–409.
- [30] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1264–1269.
- Li Z F, Xu M G, Zhang H M, *et al.* Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1264–1269.
- [31] 郭海英. 陇东黄土高原光、热、水对冬小麦产量的贡献及水资源开发利用研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(6): 128–131.
- Guo H Y. Contribute of sunlight temperature water to wheat output in winter and exploitation of water resource in loess plateau of Longdong[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(6): 128–131.