

施氮对黄土高原半湿润区冬小麦产量和水分利用效率的影响

朱云鹏^{1,2}, 王霖^{1,2}, 党亚爱², 王国栋²

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探讨施氮对黄土高原半湿润地区冬小麦产量和水分利用的影响, 通过田间长期定位试验, 设置 0 kg·hm⁻² (N0)、100 kg·hm⁻² (N100)、200 kg·hm⁻² (N200)、300 kg·hm⁻² (N300) 和 400 kg·hm⁻² (N400) 5 个施氮水平, 比较分析了不同处理间冬小麦不同生育时期 0~200 cm 土层土壤剖面水分动态变化及产量和水分利用效率的差异。结果表明, 与未施氮(N0)处理相比较, 施氮处理的冬小麦籽粒产量、籽粒产量水分利用效率、干物质和干物质水分利用效率均显著增加, 而各生育时期土壤水分含量降低。两年的冬小麦耗水量和籽粒产量均表现为 N100、N200>N0>N300、N400; 籽粒产量水分利用效率和干物质水分利用效率均呈增加趋势, 但 N200 与 N300 及 N300 与 N400 处理间差异不显著。综合来看, 在本试验条件下, 施氮 200 kg·hm⁻² 时冬小麦既能高产, 也可高效利用土壤水分。

关键词: 氮肥; 冬小麦; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2019)08-0988-06

Effects of Nitrogen Application on Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat in Semi-Humid Area of the Loess Plateau

ZHU Yunpeng^{1,2}, WANG Lin^{1,2}, DANG Ya'ai², WANG Guodong²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Nitrogen fertilizer has been broadly applied in agriculture practice for a long term. The effects of nitrogen fertilizer on winter wheat yield and water use efficiency in the Loess Plateau of China were studied in two years. The nitrogen fertilizer application were set at four different levels, e.g. 100 kg·hm⁻² (N100), 200 kg·hm⁻² (N200), 300 kg·hm⁻² (N300), and 400 kg·hm⁻² (N400), in the long-term field experiments, and 0 kg·hm⁻² (N0) was set as control. Soil water content and water use efficiency in 0~200 cm soil profile at different growth stages of winter wheat were analyzed. Results showed that grain yield, dry matter weight and water use efficiency (per unit grain yield and dry matter weight) of winter wheat under nitrogen application treatments (N100, N200, N300, and N400) were significantly larger than those of control (N0), while soil water content under all nitrogen treatments were comparatively less during each growth stage. Water consumption and yield under N100 and N200 treatments were consistently larger than those under N0 in the two experimental years, while N300 and N400 treatments showed less water consumption and lower yield, compared to N0. Furthermore, compared to N0, all nitrogen application treatments showed increased water use ef-

收稿日期: 2019-03-12

修回日期: 2019-04-20

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室资助项目 (A314021402-1605); 陕西省自然科学基金项目 (2015JQ4107)

第一作者 E-mail: 1204142014@qq.com

通讯作者: 王国栋 (E-mail: gdwang211@ailiyun.com)

iciency, either in 'per unit grain yield' or in 'per unit dry matter weight', but both of them under N300 treatment had no significant difference with those under N200 and N400 treatments. In a conclusion, the treatment of N200 was found as an optimal nitrogen application scheme in semi-humid area of the Loess Plateau, regarding its comprehensive performance in yield and water use efficiency.

Key words: Nitrogen fertilizer; Winter wheat; Yield; Water use efficiency

水分和养分是作物良好生长的重要条件,土壤水分不足和肥力低下是制约农业发展的主要因素。黄土高原的旱作农业历史悠久,其南部属于半湿润易旱地区,该地区土壤湿度适中,年均降水量在 640 mm 左右,主要集中在 7—10 月。研究表明,适量的降水量可满足作物正常生长发育的需要,轻度干旱条件下追施氮肥能够缓解水分胁迫对植物造成的不良影响^[1-3]。在华北平原年降水量为 515 mm、冬小麦生育期降水量为 222 mm、施氮量为 300 kg·hm⁻²时,小麦生长良好,产量能达到较高水平(4.6 t·hm⁻²)^[4]。在黄土高原南部的关中平原区冬小麦生育期降水量为 256 mm 时,增施氮肥能显著增加产量,当施氮量为 262.5 kg·hm⁻²时,产量达到最高值 8.4 t·hm⁻²^[5]。在降水适量时,合理施肥对提高作物产量尤为重要^[6]。黄土高原南部半湿润区土壤肥力较低,土壤有机质含量平均为 1%,改善土壤养分是该区提高有限降水生产能力的关键^[1]。在秸秆还田条件下合理配施氮肥可显著增大冬小麦根量,扩大水分、养分吸收的空间,提高水分利用效率^[5,7],能增加小麦产量、干物质转运量和氮肥利用率,有利于小麦产量和品质形成^[8-10]。秸秆配施氮肥能促进秸秆腐解,提高耕层土壤的有机质含量,增加土壤肥力,改善土壤结构和理化性质,增强土壤保水保肥能力,优化农田生态环境^[11]。但是过量施氮不仅不会增加作物产量,而且还会导致土壤 pH、有机质明显下降;施氮量越大,土壤酸化越严重,破坏土壤环境,降低土壤质量^[12]。本研究在前人研究的基础上,在黄土高原南部杨凌地区,以冬小麦为研究对象,在秸秆全量还田条件下,进行了田间试验,分析施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响,以期对冬小麦生产的合理施氮提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间定位试验自 2016 年 6 月在陕西省杨凌区下川口村(北纬 34°16'8",东经 108°04'25",海拔

460 m)进行。该区域属于暖温带半湿润季风气候区,年均气温为 12.9 °C,年均降水 640 mm,约 60%的降水集中在 7—10 月份。该区土壤类型为土垫旱耕人为土,主要耕作方式为冬小麦与夏玉米轮作。试验地 0~20 cm 耕层土壤容重 1.3 g·cm⁻³,pH 8.1,有机碳含量 11.76 g·kg⁻¹,总氮含量 1.13 g·kg⁻¹,总磷含量 1.06 g·kg⁻¹,总钾含量 19.66 g·kg⁻¹。本研究数据来源于 2016 年 10 月—2018 年 5 月冬小麦生长季测定结果。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置 0 kg·hm⁻²、100 kg·hm⁻²、200 kg·hm⁻²、300 kg·hm⁻²和 400 kg·hm⁻² 5 个不同的施氮量处理,分别用 N0、N100、N200、N300 和 N400 表示。每个处理 3 个重复,共 15 个小区,小区面积 125 m²(10 m×12.5 m)。冬小麦品种为西农 979,播种量为 300 kg·hm⁻²,播种前基施氮肥,每个处理施用 P₂O₅ 90 kg·hm⁻²和 K₂O 60 kg·hm⁻²,将作物残茬切碎,混入土壤。尿素作为氮肥,Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 作为磷肥,K₂SO₄ 作为钾肥。

1.3 测定项目和方法

在 2017 和 2018 年冬小麦返青期、拔节期、扬花期和成熟期四个生育时期取样。每个小区随机取 0.1 m² 样品,用于测定干物质质量;成熟期每个小区取 3 m²(1 m×3 m)样品,用于测定籽粒产量;小麦干物质质量和籽粒产量均以 75 °C 烘干后质量表示。同时在每个小区中使用直径为 4 cm 的螺旋钻随机钻取 0~200 cm 土壤样品,每 20 cm 一层,每个土壤样品去除可见的植物残体和砾石后,采用烘干法在 105 °C 下烘 24 h 用于测定土壤含水量。

1.4 数据计算

土壤质量含水量 = (烘干前鲜土质量 - 烘干后干土质量)/烘干后干土质量 × 100%。

土壤蓄水量 = $\sum(a_i \times b_i \times c_i)$, 式中 i 为土层, a_i 为土壤质量含水量(%), b_i 为土层的土壤容重(g·cm⁻³), c_i 为土层厚度。

土壤蓄水消耗量 = 播种前 0~200 cm 土层

土壤蓄水量 - 收获后 0~200 cm 土层土壤蓄水量。

农田总耗水量(ET)利用水量平衡方程式计算(因试验地平坦,未考虑地表径流渗漏等):

ET = 土壤蓄水消耗量 + 生长期有效降雨量。

干物质量水分利用效率 = 干物质量/总耗水量。

籽粒产量水分利用效率 = 籽粒产量/总耗水量。

1.5 数据处理

所有的试验数据均采用 Origin 2017 软件作图和 SPSS 23.0 数据处理系统进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 施氮对冬小麦干物质量、产量及收获指数的影响

表 1 施氮对冬小麦产量及收获指数的影响

Table 1 Effects of nitrogen fertilizer on winter wheat yield and harvest index

年份 Year	处理 Treatment	干物质量 Dry matter/(t · hm ⁻²)				粒产量 Yield/ (t · hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%
		返青期 Reviving	拔节期 Jointing	扬花期 Anthesis	成熟期 Maturity		
2017	N0	0.92b	2.63b	3.79b	9.67c	2.83c	29.27b
	N100	1.85a	6.12a	9.30a	16.48b	6.36b	38.59a
	N200	1.92a	6.76a	10.34a	20.20a	7.49a	37.08a
	N300	1.94a	6.42a	9.72a	19.86a	7.66a	38.57a
	N400	1.73a	6.38a	9.99a	21.04a	7.77a	36.93a
2018	N0	0.75b	2.20c	3.71c	4.18c	1.13c	27.03b
	N100	1.26a	4.29b	6.66b	10.55b	2.54b	24.08b
	N200	1.30a	4.62ab	8.74a	15.20a	4.96a	32.63a
	N300	1.34a	4.86ab	8.79a	15.55a	4.72a	30.35a
	N400	1.38a	5.85a	9.66a	16.14a	5.47a	33.89a

同一列相同年份数据后不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。下表同。

Different lower-case letters following data in the same columns in the same year indicate significant difference among the treatments at 0.05 level. The same in table 2.

2.2 施氮对麦田土壤含水量及蓄水量的影响

施氮明显降低了麦田土壤含水量(图 1)。冬小麦在返青前主要利用 50 cm 以上土层水分,由于此时植株耗水较少及降水的补充,不同处理间土壤含水量差异不显著。由于拔节前降水较多,拔节期各处理 0~50 cm 土层的含水量均升高,且冬小麦主要吸收水分的土层深度超过 100 cm,施氮处理的 0~100 和 100~200 cm 土层含水量均低于 N0 处理。在扬花期,0~90 cm 土层的含水量在不同处理间差异不显著,施氮处理的 90~

影响

施氮对 2017 和 2018 年冬小麦不同生育时期的干物质量、籽粒产量和收获指数均有显著影响(表 1)。施氮处理(N100~N400)的冬小麦在返青期、拔节期和扬花期的干物质量均显著高于未施氮处理(N0),但 N200~N400 处理间差异均不显著;成熟期 N200~N400 处理的干物质量和籽粒产量显著高于 N100 处理,但是 N200~N400 处理间干物质量和籽粒产量均差异不显著。这说明适量施氮可促进小麦干物质积累及高产,增进同化物向籽粒产量的转化。

170 cm 土层含水量低于 N0 处理,尤其是 90~150 cm 土层含水量差异更明显。在成熟期,0~90 cm 土层含水量在不同处理间差异不显著,90~170 cm 土层的含水量表现为施氮处理低于 N0 处理,说明冬小麦在成熟前主要利用 90~170 cm 土层水分。2017 和 2018 年冬小麦成熟期,N0 处理的 0~200 cm 土层蓄水量显著高于 N100~N400 处理,施氮处理间差异不显著(图 2),说明施氮可促进小麦对土壤水分的吸收,但过多施氮对小麦吸收水分的效应不明显。

2.3 施氮对冬小麦水分利用效率的影响

由表 2 可以看出,2017 和 2018 年冬小麦耗水量随施氮量的增加呈先增后减趋势,N100 和 N200 处理显著高于其他处理,但此二处理差异不

显著。籽粒产量水分利用效率和干物质水分利用效率随施氮量增加而增加,N400 处理与 N0~N200 处理间差异均显著,但与 N300 处理差异不显著。这表明适量施氮可促进水分有效利用。

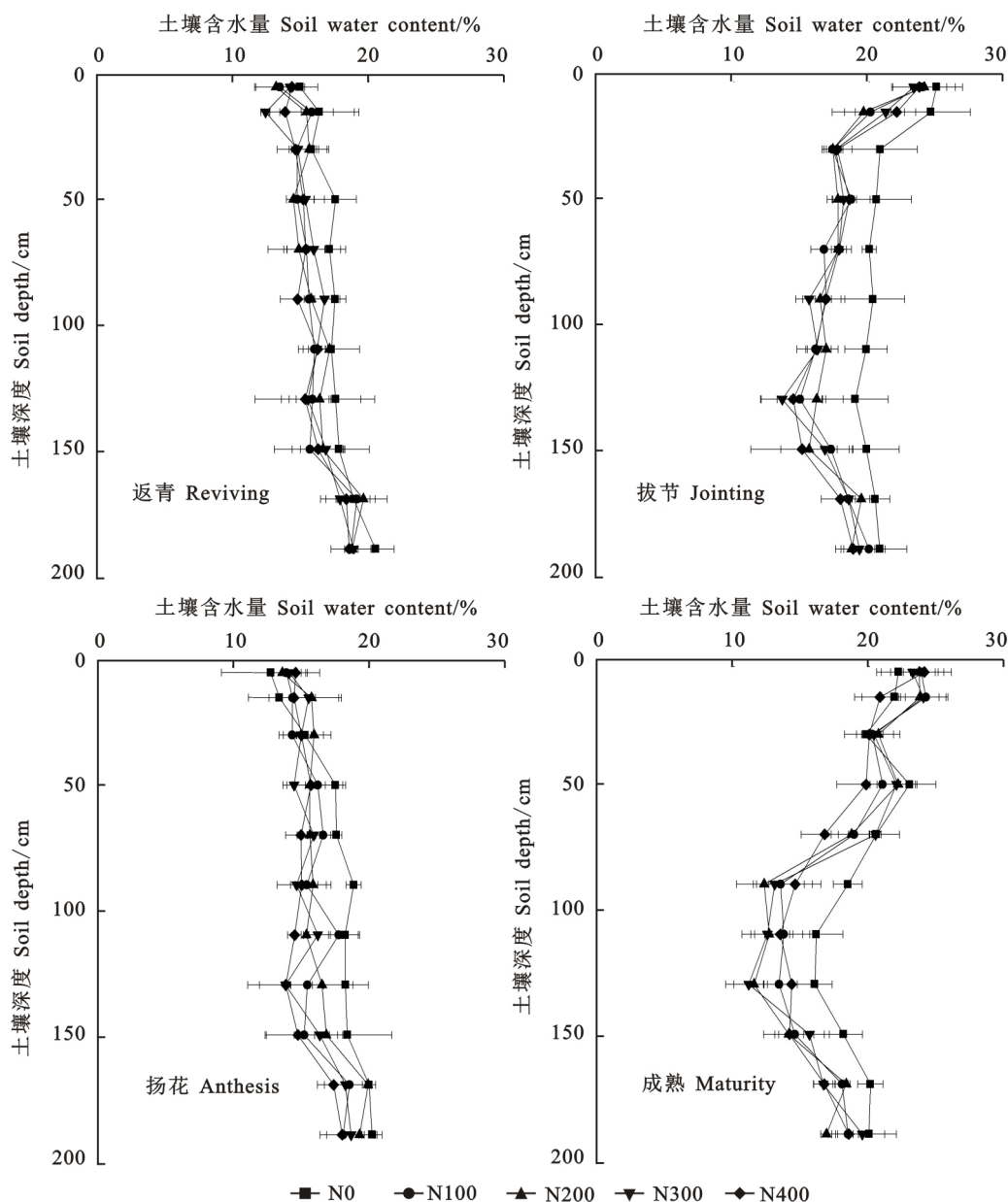


图 1 2017 年不同施氮处理冬小麦生育期 0~200 cm 土层含水量变化

Fig.1 Variation of soil water content in 0–200 cm soil layer during the growth stages of winter wheat under different nitrogen application treatments in 2017

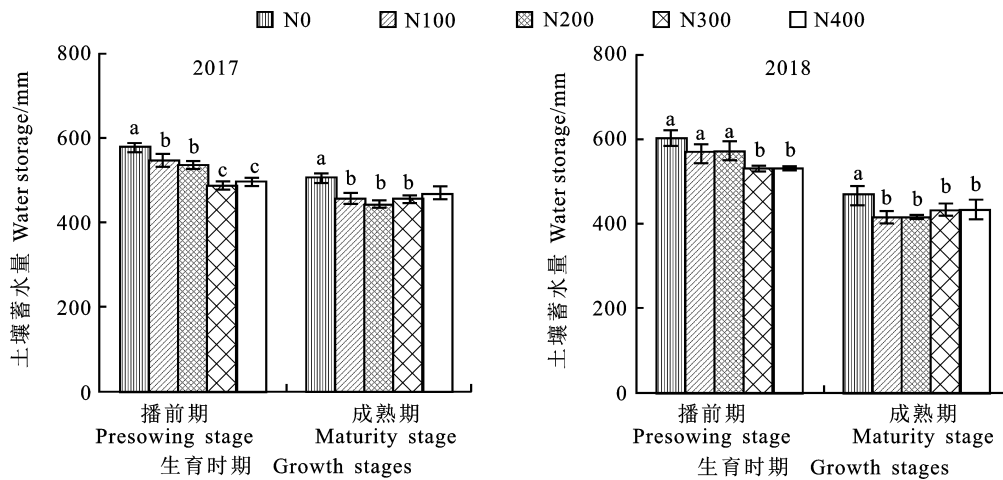
3 讨论

施氮和秸秆还田是黄土高原南部半湿润区常用的农田管理模式。合理施氮与秸秆还田相结合可为作物生长和养分吸收提供更好的条件^[13]。秸秆还田条件下,施氮能够促进冬小麦分蘖及其

成穗,增加有效穗数和产量^[14],提高氮素利用效率,但当施肥量达到一定值时,籽粒产量不再显著增加^[15]。而在华北平原的研究表明,秸秆覆盖显著减少了小麦穗数,增加了穗粒数,对千粒重无明显影响,导致产量下降^[4]。本研究中,在秸秆全量还田条件下,与 N0 处理相比,N200 处理能显著

提高小麦干物质质量和籽粒产量,但进一步提高施氮量,二指标不再显著增加。相比 2017 年,2018

年冬小麦干物质质量和籽粒产量减少,这可能归因于播种期出现连续降雨,小麦播期延后,播种后



图柱上不同字母表示处理间差异显著。

Different letters on the columns indicate significant differences among the treatments at 0.05 level.

图 2 施氮对冬小麦不同生育期 0~200 cm 土壤蓄水量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer on soil water storage of 0~200 cm at different growth stages of winter wheat

表 2 施氮对冬小麦水分利用的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer on water use of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	生育时期降水量 Precipitation during growing season/mm	作物耗水量 Crop water consumption/mm	籽粒产量水分利用效率 Yield water use efficiency/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	干物质质量水分利用效率 Dry matter water use efficiency/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
2017	N0	288.1	360.83b	7.84d	26.80d
	N100		378.30a	16.81c	43.56c
	N200		379.94a	19.71b	53.17b
	N300		322.54c	23.75ab	61.57ab
	N400		317.64c	24.46a	66.24a
2018	N0	328.0	459.21b	2.46d	9.10d
	N100		481.05a	5.28c	21.93c
	N200		479.64a	10.34b	31.69b
	N300		427.86c	11.03ab	36.34ab
	N400		423.65c	12.91a	38.09a

又出现寒潮。这些因素均导致小麦苗少苗弱,群体、个体质量变差,从而不利于干物质积累和产量的形成。

施氮会促进作物生长及根系吸收水分和养分,增加作物耗水量,引起土壤蓄水量下降^[16]。本研究中,施氮处理的土壤蓄水量显著低于 N0 处理,但相比 N0 处理,小麦耗水量在低氮处理(N100 和 N200)下增加,在高氮处理(N300 和 N400)下减少。这可能是由于在长期的定位试验中,高氮处理下作物营养生长状况较好,生物量和秸秆还田量均较大,增强了土壤蓄水和抑制棵间土壤水分蒸发的能力,从而减少了小麦耗水量^[11,17](图 2)。冬小麦对土壤各层水分的吸收随着生育时期的变化而变化^[18]。分蘖、返青和拔节期冬小麦主要吸收利用表层土壤水,且对各层土

壤水分的利用随着深度的增加而减少;在孕穗期,冬小麦对 80 cm 处土壤水利用最多;开花期 80~180 cm 处土壤水是冬小麦的重要水源;乳熟期 40~80 cm 土壤水分成为主要水源。本研究结果表明,在返青期以前,冬小麦主要利用土深 50 cm 以上的水分。拔节期前,冬小麦主要利用土深 100 cm 以上的水分。扬花期前,冬小麦主要利用 90~150 cm 土层水分。成熟期前,冬小麦主要利用 90~170 cm 土层水分。

水分利用效率由作物产量和耗水量的比值决定。合理施氮结合秸秆还田可显著提高作物产量和水分利用效率,但是过量施氮会增加耗水量、降低产量和水分利用效率^[6,13,19]。本研究中 2017 和 2018 年 N200 处理的产量、耗水量、籽粒产量水分利用效率和显著高于 N0 处理, N300 和

N400 处理的籽粒产量水分利用效率虽有进一步增加,但变化已不明显。综合来看,在秸秆全量还田的条件下,在 N200 处理下冬小麦产量已经接近饱和值,过多施氮的增产效果不显著,虽然可进一步提高水分利用效率,但会导致经济效益下降,不利于小麦高产高效栽培,因此在黄土高原南部半湿润区小麦以施氮 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 最佳。

参考文献:

- [1] 山 仑.旱地农业技术发展趋向[J].中国农业科学,2002,35(7):848.
SHAN L.Trend of agricultural technology development in dry land [J].*China Agricultural Science*,2002,35(7):848.
- [2] 张慧娜,王志强,林同保.不同水分条件下追施氮肥对小麦生物量及氮素利用的影响[J].麦类作物学报,2010,30(6):1104.
ZHANG H N,WANG Z Q,LIN T B.Effects of top application of nitrogen fertilizer under different water conditions on wheat biomass and nitrogen utilization [J].*Journal of Triticeae Crops*,2010,30(6):1104.
- [3] 孟晓瑜,王朝辉,李富翠,等.底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):369.
MENG X Y,WANG C H,LI F C,et al.Effects of soil moisture and nitrogen application on winter wheat yield and water use in the weibe upland [J].*Journal of Applied Ecology*,2012,23(2):369.
- [4] LI Q,CHEN Y,LIU M,et al.Effects of irrigation and straw mulching on microclimate characteristics and water use efficiency of winter wheat in North China [J].*Plant Production Science*,2008,11(2):161.
- [5] 张 亮,黄婷苗,郑险峰,等.施氮对秸秆还田冬小麦产量和水分利用率的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(1):49.
ZHANG L,HUANG T M,ZHENG X F,et al.Effects of nitrogen application on the yield and water use efficiency of wheat straw returned to field [J].*Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*,2013,41(1):49.
- [6] SOON Y K,MALHI S S,WANG Z H,et al.Effect of seasonal rainfall, N fertilizer and tillage on N utilization by dryland wheat in a semi-arid environment [J].*Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2008,82(2):149.
- [7] 沈玉芳,李世清,邵明安.水肥空间组合对冬小麦光合特性及产量的影响[J].应用生态学报,2007,18(10):2256.
SHEN Y F,LI S Q,SHAO M A.Effects of spatial combination of water and fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J].*Journal of Applied Ecology*,2007,18(10):2256.
- [8] 张传辉,杨四军,顾克军,等.添加秸秆与氮肥用量对冬小麦产量及其构成因素的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):77.
ZHANG C H,YANG S J,GU K J,et al.Effects of straw and nitrogen fertilizer on winter wheat yield and its components [J].*Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*,2014,42(12):77.
- [9] 庞党伟,陈 金,唐玉海,等.玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J].作物学报,2016,42(11):1689.
PANG D W,CHEN J,TANG Y H,et al.Effects of corn straw mulching and nitrogen fertilizer treatment on soil physical and chemical properties and winter wheat yield [J].*Acta Agronomica Sinica*,2016,42(11):1689.
- [10] 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.
HE X Y,HAO M D,LI H C,et al.Effects of wheat fertilization on yield and water and fertilizer utilization efficiency in upland on loess plateau [J].*Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2010,16(6):1333.
- [11] 赵 鹏,陈 卓.豫北秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮利用及土壤硝态氮的短期效应[J].中国农业大学学报,2008,13(4):19.
ZHAO P,CHEN F.Effects of straw mulching combined with nitrogen fertilizer on nitrogen utilization of winter wheat and soil nitrate nitrogen in northern henan province [J].*Journal of China Agricultural University*,2008,13(4):19.
- [12] 娄 庭,龙怀玉,杨丽娟,等.在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2010(2):11.
LOU T,LONG H Y,YANG L J,et al.Effects of nitrogen reduction and combined application of organic and inorganic fertilizer on soil quality and crop yield in fields with excessive nitrogen application [J].*China Soil and Fertilizer*.2010(2):11.
- [13] DEVKOTA M,MARTIUS C,LAMERS J P A,et al.Combining permanent beds and residue retention with nitrogen fertilization improves crop yields and water productivity in irrigated arid lands under cotton, wheat and maize [J].*Field Crops Research*,2013,149:105.
- [14] 董勤各,冯 浩,杜 健.秸秆粉碎还田与化肥配施对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(S2):156.
DONG Q G,FENG H,DU J.Effects of straw pulping and fertilizer application on winter wheat yield and water use efficiency [J].*Journal of Agricultural Engineering*,2010,26(S2):156.
- [15] 顾炽明,郑险峰,黄婷苗,等.秸秆还田配施氮肥对冬小麦产量及氮素调控的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):48.
GU C M,ZHENG X F,HUANG T M,et al.Effects of straw mulching combined with nitrogen fertilizer on winter wheat yield and nitrogen regulation [J].*Agricultural Research in Arid Regions*,2013,31(5):48.
- [16] 孙 敏,高志强,赵维峰,等.休闲期深松配施氮肥对旱地土壤水分及小麦籽粒蛋白质积累的影响[J].作物学报,2014,40(7):1286.
SUN M,GAO Z Q,ZHAO W F,et al.Effects of nitrogen fertilizer application on soil moisture and wheat grain protein accumulation in upland during fallow period [J].*Acta Agronomica Sinica*,2014,40(7):1286.
- [17] LIU C A,LI F R,ZHOU L M,et al.Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment [J].*Agricultural Water Management*,2013,117:123.
- [18] 张丛志,张佳宝,张 辉.不同深度土壤水分对黄淮海封丘地区小麦的贡献[J].土壤学报,2012,49(4):655.
ZHANG C Z,ZHANG J B,ZHANG H.Contribution of soil moisture at different depths to wheat in Fengqiu area of Huang-Huaihai area [J].*Journal of Soil Science*,2012,49(4):655.
- [19] MOHAMMAD W,SHAH S M,SHEHZADI S,et al.Effect of tillage,rotation and crop residues on wheat crop productivity,fertilizer nitrogen and water use efficiency and soil organic carbon status in dry area(rainfed) of north-west Pakistan [J].*Journal of Soil Science & Plant Nutrition*,2012,12(4):715.