

滴灌条件下秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区春玉米产量和土壤理化性质的影响

吴鹏年 王艳丽 李培富* 王西娜 侯贤清

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘 要 围绕宁夏扬黄灌区土壤质地黏重、养分匮乏等导致作物产量低的问题,于2017、2018年在秸秆全量粉碎还田($12000\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的同时配施4个氮肥施用水平(0、150、300、450 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$),以秸秆不还田常规施氮($225\text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)为对照,研究秸秆还田配施不同量氮肥对滴灌玉米田土壤理化性状和产量的影响.结果表明:与秸秆不还田处理相比,秸秆还田配施氮肥300和450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理0~20 cm土层平均土壤容重分别降低3.3%和5.4%,土壤孔隙度分别增加3.7%和7.1%;秸秆还田配施氮肥对土壤养分和玉米产量的提升效果显著,其中以秸秆还田配施氮肥300和450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 表现最佳;秸秆还田配施氮肥可显著增加土壤贮水量和产量,秸秆还田配施氮肥300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理在2017和2018年土壤贮水量最高可分别增加13.6%和22.1%,产量分别增加31.1%和46.0%.分析产量构成因素发现,秸秆还田配施氮肥处理主要是通过增加穗粒数和百粒重而达到高产.对玉米产量-配施纯氮量关系进行曲线拟合发现,该地区秸秆全量还田配施氮肥的最佳用量为260 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.研究结果可为该地区土壤培肥和滴灌玉米生产提供重要依据.

关键词 秸秆还田;氮肥;土壤容重;土壤孔隙度;土壤贮水量;土壤养分;玉米产量

Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on spring maize yield and soil physicochemical properties under drip irrigation condition in Yellow River pumping irrigation area, Ningxia, China. WU Peng-nian, WANG Yan-li, LI Pei-fu*, WANG Xi-na, HOU Xian-qing (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China).

Abstract: Soil compaction and nutrient deficiency are common problems in Ningxia Yellow River pumping irrigation area, which adversely affect crop yield. A two-year (2017–2018) field experiment of straw returning combined with nitrogen fertilizer were designed. Four nitrogen application levels (pure N with 0, 150, 300 and 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) were set under the condition of full smashing of maize straw ($12000\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) returning, with the conventional nitrogen application (pure N with 225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) without straw returning as the control (CK) to investigate the effects of straw returning combined with different amounts of nitrogen fertilizer on soil physical and chemical properties and maize yield under drip irrigation condition. The results showed that, compared with no-straw returning treatment, the treatments of straw returning combined nitrogen fertilizer with 300 and 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ reduced soil bulk density (0–20 cm) by 3.3% and 5.4%, but increased soil porosity by 3.7% and 7.1%, respectively. Straw returning combined with nitrogen with 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was the best treatment which increased soil organic matter content, available K, P, alkaline N and total N in 0–40 cm soil layer. Compared with the non-returning treatment, straw returning combined with nitrogen fertilizer 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ significantly increased soil water storage by 13.6% and 22.1%, increased maize yield by 31.1% and 46.0% in 2017 and 2018, respectively. The analysis of yield components showed that the high maize yield was achieved mainly by increasing grain number and the 100-grain weight. Curve fitting showed that the optimum

本文由“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B05-03)资助 This work was supported by the “Twelfth-Five” National Science and Technology Support Program (2015BAD22B05-03).

2019-01-14 Received, 2019-10-16 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: peifuli@163.com

amount of nitrogen fertilizer was $260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Our results provide important basis for soil fertility improvement and sustainable production.

Key words: straw returning; nitrogen fertilizer; soil bulk density; soil porosity; soil water storage; soil nutrient; maize yield.

我国是农作物秸秆十分丰富的国家,但是作物秸秆的利用效率一直不高,目前还存在焚烧、胡乱堆弃等浪费现象.研究表明,我国的平均秸秆利用率为56.4%^[1].随着农业机械化水平的提高,秸秆还田作为重要的作物秸秆利用方式已被广泛认可^[2].一方面,秸秆还田可有效利用作物秸秆,减少因焚烧、堆弃等带来的环境污染和资源浪费等问题;另一方面,秸秆还田可培肥地力,改善土壤理化性状,进而促进作物增产、增收^[3].作物秸秆直接还田可作为一种有效的土壤快速培肥方式.近年来关于秸秆还田已有诸多报道,大部分研究认为作物秸秆直接还田会导致土壤碳氮比上升^[4-5],不利于作物的生长.因此,秸秆还田配施一定量的氮肥可作为一种有效的土壤培肥措施.

宁夏扬黄灌区是宁夏重要的粮食生产区.但该区土壤质地黏重、有机质含量偏低、养分匮乏,严重制约了作物生长,导致该地区土壤生产效率较低^[6].该区长期以来一直依赖化学肥料的使用,盲目施肥导致大量肥料的浪费和土地地力的持续下滑.秸秆还田配施化学氮肥作为一种有效的土壤快速培肥方式已在该区推广,但是目前对该区秸秆还田配施氮肥的研究相对较少,关于滴灌条件下秸秆还田配施氮肥的研究更少.因此,本试验在滴灌条件下秸秆还田配施不同量氮肥,研究其对该地区土壤理化性状和春玉米产量的影响,并探究该地区滴灌条件下秸秆还田的最佳施氮量,以期为该地区春玉米生产提供一定的理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

本试验于2016年10月—2018年10月在宁夏同心县王团镇旱作节水高效农业科技园进行,地理位置为 $36^{\circ}51'42''\text{N}$, $105^{\circ}59'27''\text{E}$,海拔1370 m,地处黄土高原与内蒙古高原交界地带,地势由南向北逐渐倾斜(南高北低),以山地为主,地形复杂,属中温带干旱大陆性气候,干旱少雨,年降水量150~300 mm,年际变幅大,无霜期120~218 d,年平均气温 $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温约 $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$,热量充足、昼夜温差大,水分蒸发强烈.2017年降水总量为286.1 mm,

其中玉米生育期(4—9月)降雨量为231.4 mm,占全年的80.9%,有效降雨量为167.5 mm;2018年降水总量为302.2 mm,其中玉米生育期(4—9月)降雨量为274.4 mm,占全年的90.8%,有效降雨量为224.5 mm.该园区土壤类型为灰钙土,2017年试验地土壤0~40 cm土层基础肥力为:有机质 $6.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $12.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $9.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $84.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 8.4,属低等肥力水平.试验区2017、2018年玉米生育期内日平均温度和降雨量见图1.

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,在玉米秸秆粉碎全量还田($12000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,SR)措施下,设置4个纯氮施用水平:SR+N₀(秸秆还田不配施氮肥)、SR+N₁(秸秆还田配施氮肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、SR+N₂(秸秆还田配施氮肥 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、SR+N₃(秸秆还田配施氮肥 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),对照(CK)为秸秆不还田常规施氮($225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理.共5个处理,4次重复,20

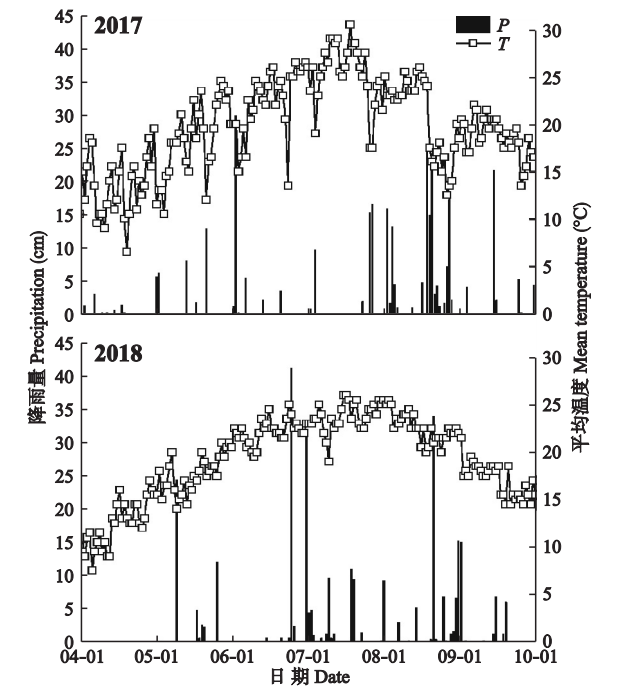


图1 试验地点2017—2018年生育期内日降雨量(P)和平均气温(T)
Fig.1 Daily precipitation (P) and mean temperature (T) in growth period at experimental station in 2017–2018.

个小区.小区面积 $15\text{ m}\times5\text{ m}=75\text{ m}^2$.

具体操作:秸秆还田方式采用玉米秸秆全量粉碎还田,分别于 2016 年 10 月、2017 年 10 月在上一季玉米收获后,将玉米秸秆粉碎后均匀撒入小区,同时分别在各小区撒入设计用量的尿素(含氮量 46%),用旋耕机将秸秆和尿素旋入土壤;秸秆不还田处理将玉米秸秆移出田块.两年玉米播种日期分别为 2017 年 4 月 20 日和 2018 年 4 月 25 日.

供试玉米品种为‘先玉 335’.宽窄行种植,宽行 70 cm,窄行 40 cm,株距 20 cm,种植密度为 $90000\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$;播种时于窄行铺设滴灌带.施肥方式:基施磷酸二铵(N-P-K: 15-46-0) $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、复合肥料(硫酸钾型 N-P-K: 15-15-15) $495\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,于播种前一天按小区面积称好各处理所需的量,在玉米播种前结合整地撒施后深翻入土(深翻深度 20 cm);在玉米各关键生育期结合滴灌追施尿素 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.2017、2018 两个试验年田间管理措施一致,玉米关键生育期灌水、施肥方案见表 1.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 玉米生育期 定期观测玉米出苗、拔节、抽雄、吐丝、灌浆、成熟等情况.并记录生育期.

1.3.2 土壤水分 在玉米关键生育期,采用土钻取土烘干法测定 0~100 cm 土层土壤含水量,每 20 cm 一层取土样,并结合降雨量和灌水量计算作物的耗

水量. $W=h\times\gamma\times\theta\times10$.其中: W 为土壤贮水量(mm); h 为土层深度(cm); γ 为土壤容重; θ 为土壤水分含量(%).作物耗水量: $ET=P+I+\Delta W$.其中: W 为作物生育期降雨量; I 为生育期灌水量; ΔW 为玉米播种期和收获期土壤贮水量之差.

1.3.3 土壤养分 根据文献[7]方法测定播种前和玉米各关键生育期及收获后 0~40 cm 土层土壤有机质(重铬酸钾容量法-外加热法)、全氮(半微量开氏法)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷($0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 法)、速效钾((NH_4OAc 浸提-火焰光度法)等养分指标.

1.3.4 土壤容重和孔隙度 分别在 2017、2018 年 4 月中旬试验处理前及 2017、2018 年 10 月初玉米收获后,每处理小区以“S”型布置 5 个采样点,按 0~20 cm 和 20~40 cm 用环刀取样,采用环刀法测定各土层土壤容重.土壤密度近似取值 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,根据文献[7]计算土壤总孔隙度:土壤总孔隙度=(1-容重/密度) $\times100\%$.

1.3.5 玉米生长指标 在玉米生育期测定植株株高、茎粗和地上部生物量等生物学性状.

1.3.6 产量性状 在玉米收获期采用样方法取样,分小区进行测产,选取 20 株玉米进行考种,记录穗数、穗粒数和百粒重,计算出籽率.理论产量=单位面积穗数 \times 穗粒数 \times 百粒重 $\times85\%$,出籽率=20 个穗重/20 个穗籽粒重量 $\times100\%$.

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素(one-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分析和多重比较($P<0.05$).利用 Origin 9.5 软件作图.图表中数据为平均值 \pm 标准差.

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施氮肥对玉米产量及产量构成因素的影响

由表 2 可知,秸秆还田配施氮肥对春玉米籽粒产量影响显著.2017 年不同处理下玉米籽粒产量随施氮量的增加呈逐渐上升的趋势,SR+N₁ 和 SR+N₂ 处理分别较 CK 增产 26.8%、31.1%;SR+N₀ 处理则与 CK 无显著差异;但当秸秆还田配施纯氮量增加到一定程度时玉米产量有所下降,SR+N₃ 处理较 SR+N₂ 处理减产 9.3%.2018 年玉米籽粒产量变化趋势同 2017 年,且各处理间差异显著,SR+N₁ 和 SR+N₂ 处理分别较 CK 增产 21.9%和 46.0%;SR+N₃ 处理部分玉米植株出现倒伏,较SR+N₂ 处理减产32.8%.秸

表 1 玉米关键生育时期追肥灌水分配方案
Table 1 Fertilizer and irrigation allocation scheme in key growth periods of maize

生育时期 Growth period	灌水量 Irrigation amount (mm)	施肥量 Fertilizer amount (kg·hm ⁻²)	
		尿素 Urea	水溶性硫酸钾 Water-soluble potassium sulfate
播种后 After sowing	30.0	—	—
苗期 Seedling stage	22.5	—	—
	30.0	150	60
	37.5	—	—
拔节期 Jointing stage	37.5	150	60
	37.5	—	—
	37.5	150	60
小喇叭口期 Small trumpet period	37.5	—	—
大喇叭口期 Flaring stage	37.5	150	60
抽穗-开花期 Heading-flowering stage	37.5	—	—
	37.5	150	60
灌浆期 Filling stage	22.5	—	—
	15.0	—	—
总量 Total	420	750	300

表 2 不同处理对春玉米产量及产量构成因素的影响
Table 2 Effects of different treatments on maize yield and yield components

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number (ind · hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	百粒重 100-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg · hm ⁻²)	出籽率 Rate of seed (%)
2017	CK	91111±4157b	480±32bc	37.87±3.57a	11032±508c	83.9±0.81b
	SR+N ₀	88889±6849c	454±35b	39.43±5.76a	11906±129c	88.0±0.85a
	SR+N ₁	96667±2721a	582±29b	40.38±3.55a	13993±419ab	85.4±0.54b
	SR+N ₂	92222±3849b	662±44a	41.42±2.29a	14462±441a	85.2±1.95b
	SR+N ₃	85556±8314c	578±43b	38.68±4.66a	13123±185b	84.9±1.83b
2018	CK	80000±4532e	664±22a	37.31±4.32a	11733±278d	81.5±2.34b
	SR+N ₀	76666±5422d	606±32b	32.67±5.45b	10467±206e	81.2±4.28b
	SR+N ₁	86666±2988c	663±45a	36.48±4.22ab	15300±164b	83.9±1.45a
	SR+N ₂	106667±3679a	657±52a	40.78±2.22a	17133±122a	84.1±2.23a
	SR+N ₃	90000±5210b	675±30a	31.05±1.98b	12900±225c	81.4±1.04b

SR+N₀: 秸秆还田不施氮肥 Straw returning with no N fertilizer; SR+N₁: 秸秆还田配施氮肥 150 kg · hm⁻² Straw returning with 150 kg N · hm⁻²; SR+N₂: 秸秆还田配施氮肥 300 kg · hm⁻² Straw returning with 300 kg N · hm⁻²; SR+N₃: 秸秆还田配施氮肥 450 kg · hm⁻² Straw returning with 450 kg N · hm⁻²; CK: 秸秆不还田常规施氮 225 kg · hm⁻² No straw returning with 225 kg N · hm⁻². 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

秆还田条件下,配施一定量的氮肥均有助于玉米增产,而不配施氮肥处理则会减产,SR+N₀处理较 CK 平均减产 11.2%.

秸秆还田配施氮肥对产量构成因素的影响不同.单位面积穗数以 SR+N₂处理表现最显著,两年平均较 CK 增加 17.5%.SR+N₀处理两年均值较 CK 减少 3.3%.秸秆还田配施氮肥各处理下穗粒数两年均值则与 CK 无显著差异,而 SR+N₀处理则较 CK 平均减少 8.5%.百粒重表现为 2017 年各处理间无显著差异,2018 年 SR+N₂处理表现最佳,分别较 CK 和秸秆还田不施氮肥 (SR+N₀) 处理增加 9.3%和 24.8%;SR+N₃处理则较 CK 显著减少 20.2%.分析籽粒产量与穗数、穗粒数和百粒重的相关性(如表 3),结果表明,玉米籽粒产量与穗粒数和百粒重的相关系数分别为 0.918 和 0.865,差异显著.说明秸秆还田配施氮肥处理主要通过增加玉米的穗粒数和百粒重达到高产.

通过对玉米产量和秸秆还田配施氮量进行曲线拟合(图2),发现在秸秆还田的基础上配施氮肥对

玉米产量的影响呈二次函数,随着施氮量的持续增加,玉米产量呈现减少的趋势.2017 年施氮量(x)与玉米产量(y)的回归方程为: $y = -0.0381x^2 + 19.873x + 11897$ ($R^2 = 0.9995$);2018 年施氮量(x)与玉米产量(y)的回归方程为: $y = -0.1035x^2 + 52.75x + 10179$ ($R^2 = 0.9941$).当 2017 年、2018 年秸秆还田配施氮肥用量(x)分别为 260.8 和 254.8 kg · hm⁻²时,玉米产量(y)得到最大值,分别为 14489 和 16900 kg · hm⁻²;继续加大氮肥配施量会抑制玉米产量.结合两年产出投入比,该地秸秆还田配施的纯氮用量不宜超过 260 kg · hm⁻².

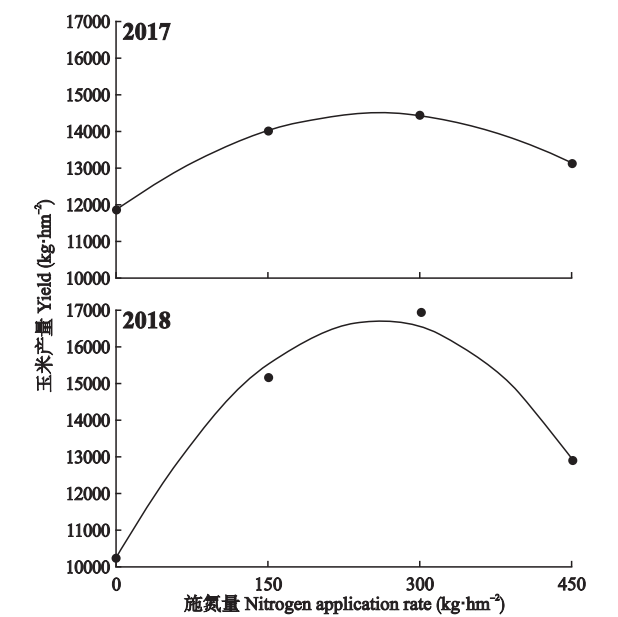


图 2 2017、2018 年不同处理施氮量-玉米产量拟合曲线
Fig.2 Fitting curves of nitrogen application rate and maize yield under different treatments in 2017and 2018.

表 3 各产量构成因素相关系数
Table 3 Correlation coefficients between yield components

	穗数 Spike number	穗粒数 Grain number per spike	百粒重 100-grain weight
穗粒数 Grain number per spike	0.260		
百粒重 100-grain weight	0.514	0.724 *	
籽粒产量 Grain yield	0.476	0.918 **	0.865 *

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

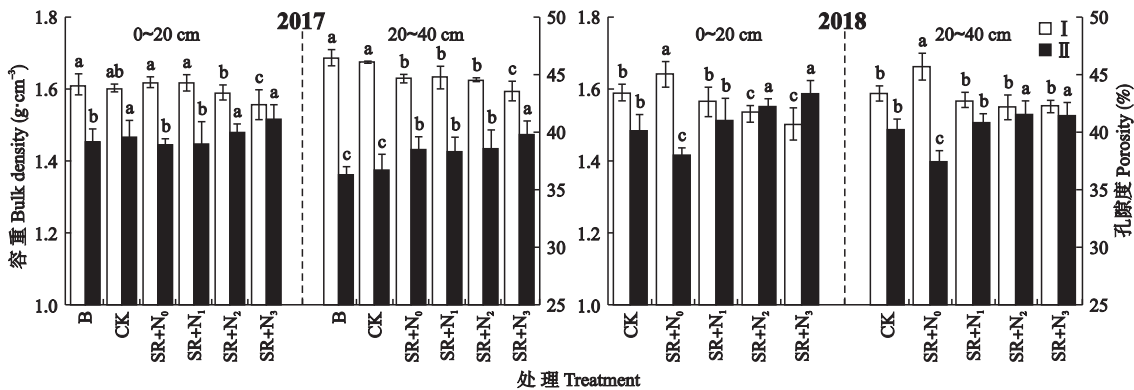


图3 秸秆还田配施氮肥对土壤容重 (I) 和孔隙度 (II) 的影响

Fig.3 Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil bulk density (I) and porosity (II).

SR+N₀: 秸秆还田不施氮肥 Straw returning with no N fertilizer; SR+N₁: 秸秆还田配施氮肥 150 kg · hm⁻² Straw returning with 150 kg N · hm⁻²; SR+N₂: 秸秆还田配施氮肥 300 kg · hm⁻² Straw returning with 300 kg N · hm⁻²; SR+N₃: 秸秆还田配施氮肥 450 kg · hm⁻² Straw returning with 450 kg N · hm⁻²; CK: 秸秆不还田常规施氮 225 kg · hm⁻² No straw returning with 225 kg N · hm⁻². B: 处理前 Before treatment. 不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 秸秆还田配施氮肥对土壤容重和孔隙度的影响

秸秆还田配施氮肥能显著改善 0~20 和 20~40 cm 土层土壤容重和孔隙度 (图 3), 且年际之间差异显著.2017 年收获后, 秸秆还田配施高量氮肥处理可显著降低土壤容重, 0~20 cm 土层土壤容重随配施氮肥量的增加呈下降趋势, SR+N₂ 和 SR+N₃ 处理土壤容重分别较 CK 降低 1.9% 和 3.6%, 而 SR+N₀、SR+N₁、CK 间无明显差异. 与 CK 相比, 秸秆还田配施氮肥下各处理 20~40 cm 土层土壤容重显著降低, 尤以 SR+N₃ 处理表现最显著, 较 CK 降低 5.8%, 其他处理之间则无明显差异. 2018 年为秸秆还田配施氮肥处理第二年, 秸秆还田配施氮肥处理下 0~20、20~40 cm 土层土壤容重较 2017 年有大幅降低, 0~20 cm 土层土壤容重随施氮量的增加逐渐降低, SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 降低 3.9% 和 6.0%, 而单纯秸秆还田处理 (SR+N₀) 则较 CK 显著提高 3.4%; 20~40 cm 土层土壤容重与 0~20 cm 变化趋势一致, SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 降低 2.1%, 而 SR+N₀ 则较 CK 增加 4.7%. 可见, 相对于秸秆不还田施氮肥, 秸秆还田配施一定量的氮肥可有效降低土壤容重.

秸秆还田配施一定量的氮肥可增加 0~40 cm 土层土壤孔隙度, 2018 年较 2017 年增效显著. 2017 年收获后, 0~20 cm 土层土壤孔隙度随施氮量的增加呈逐渐上升趋势, SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 增加 5.3% 和 6.3%, 其他处理则较处理前无显著差异. 秸秆还田配施氮肥各处理下 20~40 cm 土层土壤孔隙度增加显著, 尤以 SR+N₃ 处理表现最佳, 较 CK

处理增加 8.3%. 2018 年收获后, 秸秆还田配施氮肥各处理 0~40 cm 土层土壤孔隙度较 CK 增效显著, 且随施氮量的增加呈逐渐上升趋势. 0~20 cm 土层土壤中, SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 增加 5.3% 和 8.1%, 而 SR+N₀ 处理则较 CK 显著降低 5.3%. 20~40 cm 土层土壤孔隙度变化趋势同 0~20 cm 变化趋势一致, SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 增加 3.5% 和 3.8%, SR+N₀ 处理则较 CK 降低 7.5%. 这说明在秸秆还田基础上配施氮肥可有效改善耕层土壤孔隙度, 增加土壤透气性和贮水能力.

2.3 秸秆还田配施氮肥对土壤水分的影响

由图 4 可知, 秸秆还田配施氮肥不同处理对土壤贮水量的影响不同, 整体上, 2017 年土壤贮水量呈先上升后下降的趋势, 而 2018 年则表现为玉米生育前中期土壤贮水量高于生育后期. 与秸秆不还田 (CK) 相比, 秸秆还田配施氮肥处理可显著增加土壤含水量, 2017 年增幅为 1.7%~6.4%, 2018 年为 3.4%~18.9%. 与秸秆还田不施氮肥处理 (SR+N₀) 相比, 秸秆还田配施氮肥各处理土壤含水量均有一定程度的增加, 2017 年提高 7.3% (抽雄期)~13.6% (拔节期), 2018 年提高 7.6% (成熟期)~22.1% (拔节期); 两年均以 SR+N₂ 处理最显著, 可能是由于 SR+N₀ 处理秸秆没有腐熟, 导致土壤容重增大, 土壤孔隙度减小, 因而土壤贮水量较低. 因此, 秸秆还田配施氮肥处理较秸秆不还田处理可显著增加土壤贮水量, 从而保证了关键生育期的水分供给.

2.4 秸秆还田配施氮肥对土壤养分的影响

秸秆还田配施氮肥下 2017 年处理前及 2017 年、2018 年收获后 0~40 cm 土层土壤养分状况见表 4.

表 4 秸秆还田配施氮肥对 0~40 cm 土层土壤养分含量的影响
Table 4 Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on nutrient content of 0~40 cm soil layer

年份 Year	处理 Treatment	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N (mg · kg ⁻¹)
2017	B	6.80±0.12	0.37±0.007	84.66±3.22	9.26±1.56	12.34±1.12
	CK	7.01±0.24d	0.46±0.024c	97.33±5.51c	10.76±1.14c	14.35±1.44b
	SR+N ₀	7.64±0.08c	0.52±0.026b	128.38±3.46b	12.97±1.45b	13.83±1.43b
	SR+N ₁	8.32±0.27b	0.55±0.032ab	149.45±3.85a	13.59±1.06a	17.50±1.93b
	SR+N ₂	8.80±0.12ab	0.57±0.008a	127.33±4.03b	15.84±1.31a	21.02±2.47a
2018	SR+N ₃	9.31±0.16a	0.49±0.023c	100.99±0.85c	16.71±0.59a	23.98±2.03a
	CK	8.35±0.96d	0.45±0.020e	111.90±13.20d	10.27±1.61c	11.62±1.65d
	SR+N ₀	9.31±0.107c	0.48± 0.031d	187.59±14.02c	19.76±0.93b	24.12±2.12c
	SR+N ₁	10.48±0.43b	0.52±0.035c	214.67±15.28a	22.05±1.01ab	32.45±1.78b
	SR+N ₂	12.93±0.57a	0.64±0.021b	227.17±21.52a	23.13±1.62a	40.12±2.89a
	SR+N ₃	13.17±0.59a	0.68± 0.04a	199.49±16.22ab	23.53±1.73a	39.28±1.53a

B: 处理前 Before treatment

2017 年和 2018 年秸秆还田配施不同量氮肥处理下土壤养分含量均显著高于处理前.两年间土壤有机质含量均随施氮量的增加而增加,2017 年有机质增幅为 9.0%~32.8%,2018 年为 11.5%~57.7%.2017 年以 SR+N₃ 处理表现最佳,2018 年以 SR+N₂、SR+N₃ 处理表现最优.两年间秸秆还田不同处理下 0~40 cm 土层土壤全氮含量随施氮量的增加呈逐渐上升趋势,以 SR+N₂ 表现最佳,SR+N₁ 和 SR+N₂ 处理两年平均全氮含量分别较 CK 增加 17.6%、33.1%.秸秆还田配施氮肥处理可显著增加 0~40 cm 土层

土壤速效钾、速效磷和碱解氮含量;2017 年速效钾含量 SR+N₂ 处理较 CK 增加 30.8%,2018 年则较 CK 增加 78.3%,其余各处理均有不同程度的增加.速效磷变化幅度与速效钾类似,2017 年 SR+N₂、SR+N₃ 处理分别较 CK 增加 47.2%、55.3%,而 2018 年两者则较 CK 分别增加 125.2%和 129.1%.碱解氮含量则以 SR+N₁、SR+N₂、SR+N₃ 增加显著,两年平均分别较 CK 增加 146.0%和 152.6%.由此可见,秸秆还田配施氮肥可显著增加 0~40 cm 土层土壤养分,从而改善土壤肥力.

3 讨 论

3.1 秸秆还田配施氮肥对土壤物理性状的影响

土壤容重是衡量土壤物理性状的重要指标之一,直接影响土壤孔隙度大小和孔隙分配,以及土壤水、肥、汽、热的变化^[8].秸秆还田配施氮肥可改善耕层土壤物理性状^[9-12].赵亚丽等^[13]认为,秸秆还田措施可显著降低土壤容重,增加土壤三相比和水分利用效率;白伟等^[14]研究表明,秸秆还田配施氮肥较秸秆不还田分别使 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤容重降低 3.2%和 2.0%.本研究结果表明,连续两年秸秆还田配施氮肥处理可显著降低土壤容重,增加土壤孔隙度,且施氮量越高,改善效果越明显.温美娟等^[15]研究认为,秸秆还田条件可有效降低表层土壤容重,改善土壤三相比.本研究结果表明,秸秆还田条件下不配施氮肥处理土壤容重增加,与温美娟等^[15]的研究结果不一致.分析其原因,可能是作物秸秆腐熟过程需要消耗土壤中大量养分^[16],从而导致土壤质地黏重,土壤孔隙度变小,最终使土壤容重变大.

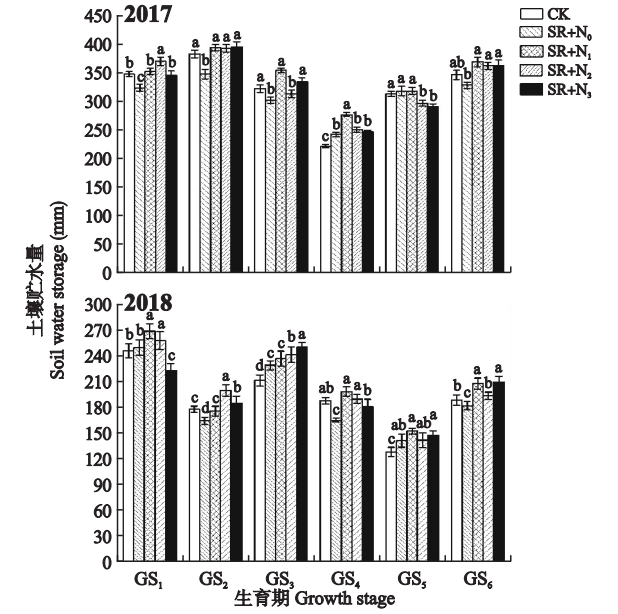


图 4 秸秆还田配施氮肥对 0~100 cm 土层土壤贮水量的影响
Fig.4 Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on soil water storage in 0~100 cm soil layer.

GS₁: 苗期 Seedling stage; GS₂: 拔节期 Jointing stage; GS₃: 大喇叭口期 Elongation stage; GS₄: 抽雄期 Tasseling stage; GS₅: 灌浆期 Filling stage; GS₆: 成熟期 Maturation stage.

秸秆还田条件下适量施用氮肥能调节土壤养分供应状况,增加土壤蓄水保墒效果^[17].不同施氮水平对玉米不同生育时期土壤保水效果影响不同^[18].王维钰等^[19]研究认为,秸秆还田配施氮肥处理 0~30 cm 土层土壤含水率显著高于秸秆不还田处理.解文艳等^[20]研究发现,秸秆还田秋施肥比秸秆不还田玉米水分利用效率显著提高.本研究结果表明,两年秸秆还田配施氮肥可显著增加土壤贮水量,且随施氮量的增加呈上升趋势,以 SR+N₂ 处理表现最佳;而 SR+N₀ 处理保水效果低于秸秆不还田处理,可能是由秸秆还田不配施氮肥处理下秸秆不腐熟或腐熟不完全造成的.整体蓄水效果表现为秸秆还田处理第二年大于秸秆还田处理第一年.这与王旭东等^[16]的研究结果相一致.

3.2 秸秆还田配施氮肥对土壤化学性状的影响

秸秆还田与氮肥配施可显著改善土壤养分状况^[2,21].Limon-Ortega 等^[22]认为,长期秸秆还田与氮肥配施处理可显著提高小麦地耕层土壤养分含量和养分利用效率;Whitbread 等^[23]研究发现,秸秆还田配施氮肥可有效提升土壤有机碳,平衡土壤养分.土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标之一,秸秆还田配施氮肥可有效提高土壤有机质含量.李孝勇等^[24]研究发现,秸秆还田配施适量化学氮肥可有效提升土壤有机质,增幅在 17.5%~28.7%.相关研究表明^[25-26],秸秆还田配施氮肥可提高土壤速效氮、磷、钾等养分含量,且随施氮量的增加呈逐渐上升的趋势.本研究表明,秸秆还田配施氮肥可显著提高 0~40 cm 土壤有机质、全氮和速效养分含量.这与 Wang 等^[27]的研究结果一致.可能是因为秸秆还田后增施化学氮肥有助于秸秆腐解,使土壤有机质含量增加,同时,秸秆还田后补充氮素可降低速效养分淋溶^[28],提升土壤速效养分含量;而且无机氮的施入可改善土壤氮素供给水平,改善土壤全氮含量.

3.3 秸秆还田配施氮肥对玉米产量性状的影响

白伟等^[29]研究发现,秸秆还田和适宜的氮肥施用量可以显著增加玉米产量,其增产效果主要表现在百粒重和行粒数的显著提升.庞党伟等^[30]研究发现,秸秆还田配施氮肥主要通过改善土壤物理状况,进而增加单位面积穗数和穗粒数,使玉米产量增加.本试验结果表明,秸秆还田配施一定量氮肥可显著提高玉米产量.相关性分析表明,秸秆还田配施氮肥处理增产效果主要表现在增加玉米的穗粒数和百粒重.这与侯贤清等^[6]的研究结果一致,可能是处理后土壤中充足的有机质和含氮量有助于玉米籽粒的形

成^[31],而秸秆还田在改善玉米穗部基本性状方面发挥着一定的作用^[32].不同年份同一处理下玉米产量出现的差异则与年际间降雨和温度差异有关.

3.4 秸秆还田最佳氮肥配施量

由于土壤类型、气候条件、种植作物和耕作方式的不同,不同学者得出的秸秆还田量与施氮量的配比结果不同.张哲等^[33]研究认为,秸秆还田量 9000 kg·hm⁻²配施纯氮量 210~245 kg·hm⁻²可作为提高辽西风沙半干旱区土地生产力和作物产量的较优方案.白伟等^[9]研究认为,秸秆还田量为 9000 kg·hm⁻²(全量还田)配施纯氮 112.5 kg·hm⁻²是辽西北地区比较理想的秸秆还田模式.周怀平等^[34]研究认为,不同的秸秆还田方式和不同降水年型对玉米产量和经济效益的影响存在明显差异.本研究两年试验结果表明,秸秆还田 12000 kg·hm⁻²配施纯氮 260 kg·hm⁻²种植模式下玉米产量最佳,高于该值则会导致玉米不同程度减产.这与前人研究结果略有不同,主要原因是土壤类型、气候条件之间的差异,加之本结果只是通过两年试验得出的结论,更加精准的施氮范围有待后续试验进一步探究.

4 结 论

通过两年田间定位试验,研究了滴灌条件下秸秆还田对宁夏扬黄灌区滴灌春玉米产量和土壤理化性状的影响,结果表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田配施氮肥可有效降低 0~20、20~40 cm 土层土壤容重,增加土壤孔隙度,进而增加土壤贮水量,以秸秆还田配施纯氮 300 和 450 kg·hm⁻²处理表现最佳.秸秆还田配施纯氮 300 和 450 kg·hm⁻²处理较秸秆不还田处理可显著增加土壤养分含量,且处理第二年较第一年增效明显.秸秆还田配施纯氮 300 kg·hm⁻²处理下玉米产量最高,通过产量-配施氮肥量拟合曲线发现,该地区秸秆还田配施氮肥量为 260 kg·hm⁻²时玉米可获得最大产量,过高的氮肥配比会导致玉米减产.

参考文献

- [1] Wang R-F (王如芳), Zhang J-W (张吉旺), Dong S-T (董树亭), et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, 22(6): 1504-1510 (in Chinese)
- [2] Zhang J (张 静), Wen X-X (温晓霞), Liao Y-C (廖允成), et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat.

- Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(3): 612–619 (in Chinese)
- [3] Wang J (王 静), Qu K-W (屈克伟). Effects of straw returning on soil nutrients and crop yield. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2008(20): 179 (in Chinese)
- [4] Li T (李 涛), He C-E (何春娥), Ge X-Y (葛晓颖), *et al.* Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2016, **24**(12): 1633–1642 (in Chinese)
- [5] Zhao P (赵 鹏), Chen F (陈 阜), Ma X-M (马新明), *et al.* Effects of integrated straw on crop yield and nitrogen balance in winter wheat & summer maize. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2010, **28**(2): 162–166 (in Chinese)
- [6] Hou X-Q (侯贤清), Wu P-N (吴鹏年), Wang Y-L (王艳丽), *et al.* Effects of returning straw with nitrogen application on soil water and nutrient status, and yield of maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(6): 1928–1934 (in Chinese)
- [7] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [8] Ma X-H (马祥华), Jiao J-Y (焦菊英), Wen Z-M (温仲明), *et al.* The changes of soil physical properties in abandoned lands during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, **12**(1): 17–21 (in Chinese)
- [9] Bai W (白 伟), Pang H-C (逢焕成), Niu S-W (牛世伟), *et al.* Effects of straw incorporation and nitrogen rate on spring maize yield and soil physicochemical property. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2015, **23**(3): 99–106 (in Chinese)
- [10] Li W (李 玮), Qiao Y-Q (乔玉强), Chen H (陈欢), *et al.* Effects of combined straw and N application on the physicochemical properties of lime concretion black soil and crop yields. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(17): 5052–5061 (in Chinese)
- [11] Tian S-Z (田慎重), Wang Y (王 瑜), Li N (李娜), *et al.* Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(22): 7116–7124 (in Chinese)
- [12] López-Fando C, Dorado J, Pardo MT. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. *Soil and Tillage Research*, 2007, **95**: 266–276
- [13] Zhao Y-L (赵亚丽), Xue Z-W (薛志伟), Guo H-B (郭海斌), *et al.* Effects of tillage methods and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat-summer maize. 2014 National Youth Crop Cultivation and Physiology Academic Seminar, Yangzhou, Jiangsu, China, 2014 (in Chinese)
- [14] Bai W (白 伟), An J-W (安景文), Zhang L-Z (张立祯), *et al.* Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turnover plus nitrogen fertilizer. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2017, **33**(15): 168–176 (in Chinese)
- [15] Wen M-J (温美娟), Wang C-B (王成宝), Huo L (霍 琳), *et al.* Effects of subsoiling and straw returning on soil physical properties and maize production in Yellow River irrigation area of Gansu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2019, **30**(1): 224–232 (in Chinese)
- [16] Wang X-D (王旭东), Chen X-N (陈鲜妮), Wang C-X (王彩霞), *et al.* Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(10): 252–257 (in Chinese)
- [17] Ma X-L (马晓丽), Jia Z-K (贾志宽), Xiao E-S (肖恩时), *et al.* Effects of wheat-residue application on soil water and water use efficiency in the Weibei Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2010, **28**(5): 59–64 (in Chinese)
- [18] Xu Y-Y (徐莹莹), Wang J-H (王俊河), Liu Y-T (刘玉涛), *et al.* Effects of different returning methods of straw on soil physical property, yield of corn. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2018, **26**(5): 78–84 (in Chinese)
- [19] Wang W-Y (王维钰), Qiao B (乔 博), Kashif A, *et al.* Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49**(11): 2136–2152 (in Chinese)
- [20] Xie W-Y (解文艳), Fan G-S (樊贵盛), Zhou H-P (周怀平), *et al.* Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2011, **42**(11): 60–67 (in Chinese)
- [21] Miao F (苗 峰), Zhao B-Z (赵炳梓), Chen J-L (陈金林). Effects of straw-return coupled with nitrogen fertilizer application on winter wheat yield and nutrient absorption. *Soils* (土壤), 2012, **44**(3): 395–401 (in Chinese)
- [22] Limon-Ortega A, Govaerts B, Sayre KD. Straw management, crop rotation, and nitrogen source effect on wheat grain yield and nitrogen use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 2008, **29**: 21–28
- [23] Whitbread A, Blair G, Konboon Y, *et al.* Managing crop residues, fertilizers and leaf litters to improve soil C, nutrient balances, and the grain yield of rice and wheat cropping systems in Thailand and Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, **94**: 251–263
- [24] Li X-Y (李孝勇), Wu J (武 际), Zhu H-B (朱宏斌), *et al.* Effects of straw returning on crop yield and soil nutrients. *Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科

学), 2003, **31**(5): 870–871 (in Chinese)

[25] Nan X-X (南雄雄), You D-H (游东海), Tian X-H (田霄鸿), *et al.* Effect of returning of cropland straw to field on soil organic carbon and grain yield in Guanzhong Plain. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2011, **26**(5): 222–229 (in Chinese)

[26] Ma C (马超), Zhou J (周静), Zheng X-B (郑学博), *et al.* Effects of returning rice straw into field on soil nutrients and wheat yields under promoting decay condition. *Soils* (土壤), 2012, **44**(1): 30–35 (in Chinese)

[27] Wang J, Wang D, Zhang G, *et al.* Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention. *Agricultural Water Management*, 2014, **141**: 66–73

[28] Hu H-X (胡宏祥), Wang Y-F (汪玉芳), Chen Z (陈祝), *et al.* Effects of straw return with chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus leaching from yellow cinnamon soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2015, **29**(5): 101–105 (in Chinese)

[29] Bai W (白伟), Zhang L-Z (张立祯), Pang H-C (逢焕成), *et al.* Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on photosynthetic performance and yield of spring maize in Northeast China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2017, **43**(12): 1845–1855 (in Chinese)

[30] Pang D-W (庞党伟), Chen J (陈金), Tang Y-H (唐玉海), *et al.* Effect of returning methods of maize straw and nitrogen treatments on soil physicochemical property and yield of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2016, **42**(11): 1689–1699 (in Chinese)

[31] Zhang P, Wei T, Jia ZK. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China. *Geoderma*, 2014, **230–231**: 41–49

[32] Zhang X-L (张学林), Zhang X (张许), Wang Q (王群), *et al.* Effects of straw returned plus nitrogen fertilizer on summer maize yield and grain quality. *Journal of Henan Agricultural Sciences* (河南农业科学), 2010(9): 69–73 (in Chinese)

[33] Zhang Z (张哲), Sun Z-X (孙占祥), Zhang Y-Q (张燕卿), *et al.* Effects of crop residues incorporation and N-fertilizer on yield and water use efficiency of spring maize. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2016, **34**(3): 144–152 (in Chinese)

[34] Zhou H-P (周怀平), Yang Z-P (杨治平), Li H-M (李红梅), *et al.* Effect of straw return to field and fertilization in autumn on dryland corn growth and on water and fertilizer efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(7): 1231–1235 (in Chinese)

作者简介 吴鹏年, 男, 1992 年生, 硕士研究生. 主要从事土壤培肥研究. E-mail: 15121870790@163.com

责任编辑 张凤丽
