

秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响

黄婷苗¹, 郑险峰^{1*}, 侯仰毅¹, 李晓¹, 王朝辉^{1,2}

(1 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2 西北农林科技大学, 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】陕西关中平原是我国典型的冬小麦—夏玉米轮作区, 冬小麦播种前将上季收获后的玉米秸秆还田是当地普遍采用的作物秸秆管理方式。本研究以优化秸秆还田条件的小麦养分资源管理, 实现作物增产和肥料增效为目标, 通过 2 年的田间定位试验, 探索关中地区玉米秸秆还田条件下, 冬小麦高产高效的最佳养分管理措施。

【方法】试验于 2011 年 10 月至 2013 年 5 月在陕西省周至县终南镇进行, 供试冬小麦品种为周麦 23, 夏玉米品种为郑单 958。采用裂区设计, 主处理为玉米秸秆全量还田 (S1) 和秸秆不还田 (S0), 副处理为 5 个不同氮肥施用水平 (N 0、84、168、252 和 336 kg/hm²), 种植作物为冬小麦。通过不同氮水平的回归分析, 研究了玉米秸秆还田对后茬冬小麦的籽粒产量、生物量和收获期地上部氮、磷、钾养分吸收利用的影响。【结果】与玉米秸秆不还田相比, 秸秆还田对冬小麦籽粒产量和收获期地上部氮、磷、钾养分吸收量的影响均表现出低氮降低、高氮增加的趋势。第一年和第二年在施氮量分别低于 N 153 和 187 kg/hm² 时, 秸秆还田处理小麦减产, 相反则增产, 并且增产随着氮肥用量的增加而增大; 生物量与产量趋势一致, 前后两年玉米秸秆还田与不还田条件下, 冬小麦生物量相等时的氮肥用量分别为 N 190 和 202 kg/hm²。在产量构成要素中, 同一氮水平时, 秸秆还田对小麦穗粒数和千粒重没有明显影响, 而每公顷穗数却表现为低氮降低、高氮增加的趋势, 所以秸秆还田后穗数增加是小麦增产的主要原因。同时, 在玉米秸秆还田条件下, 小麦地上部氮、磷、钾吸收量增加时, 第一年的氮肥用量分别高于 N 275、123 和 213 kg/hm², 第二年分别高于 N 200、165 和 241 kg/hm², 但氮、磷、钾的收获指数不随施氮量的增加而递增。而且过量施氮也会造成小麦籽粒磷含量的降低。【结论】在综合同一施氮水平时, 秸秆还田后的冬小麦籽粒产量和地上部氮、磷、钾养分吸收利用的变化, 建议在陕西关中平原的冬小麦—夏玉米轮作区域, 氮肥用量应控制在 N 150 ~ 200 kg/hm², 以保证在玉米秸秆还田条件下小麦的增产和氮、磷、钾养分资源的高效合理利用。

关键词: 秸秆还田; 冬小麦; 产量; 养分吸收; 养分调控

中图分类号: S512.01; S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)04-0853-11

Yield and N, P and K uptake and utilization of winter wheat affected by straw return to soil

HUANG Ting-miao¹, ZHENG Xian-feng^{1*}, HOU Yang-yi¹, LI Xiao¹, WANG Zhao-hui^{1,2}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Northwest A&F University/State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】 Guanzhong Plain in Shaanxi province is a typical winter wheat-summer maize rotation region in China, where maize straw returned to soil before winter wheat sowing is one of main crop straw management patterns. In order to increase crop yield and fertilizer utilization efficiency by optimizing nutrient management of winter wheat under the maize straw return to soil, a two-year location-fixed field experiment was carried out to explore the best nutrient management measure for high yield and high efficiency production of winter wheat when the straw was returned to soil in Guanzhong Plain. 【Methods】 The field experiment was initiated in

收稿日期: 2014-03-10

接受日期: 2014-05-09

网络出版日期: 2015-05-06

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-3-1-31); 国家公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201303104); 西北农林科技大学基本科研业务费专项 (Z109021202) 资助。

作者简介: 黄婷苗 (1990—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与调控研究。E-mail: woshitiao@163.com

* 通信作者 E-mail: zhengxf@nwsuaf.edu.cn

October 2011 and ended in May 2013 at Zhongnan town, Zhouzhi county in Shaanxi province. Local winter wheat cultivar of Zhoumai 23 and summer maize cultivar of Zhengdan 958 were used as test crops. The experiment was arranged in a split block design with two main treatments and five subplots. The main treatments included all the maize straw return to soil (S1) and all straw removal treatment (S0), and the subplots were five N application rates of 0, 84, 168, 252 and 336 kg/hm² with four replicates. Effects of the maize straw return to soil on grain yield of the following wheat and its nitrogen, phosphorus and potassium (N, P and K) uptake and utilization were studied. **【Results】** The results show that the winter wheat grain yield and the amounts of N, P and K uptake in aboveground part at the maturity stage are decreased when the N rate is low under the straw return, while they are increased under the high N rates, compared with the maize straw removal treatment. The grain yields are decreased under the straw return treatments when the N rates are lower than 153 and 187 kg/hm², respectively in the first and second year, and the yields are increased when the N rates are higher than them, even with more yield increases under much higher N rates. The response of the biomass to the straw return is the same as the grain yield, and under the same amount of biomass and the maize straw return or removal, the N rates are 190 and 202 kg/hm² in the first and second year, respectively. Among the wheat yield component factors, grain number per spike and 1000-grain weight are not significantly affected by the straw return under the same N rate, while the spike number per hectare is different, and the increased grain yield under the straw return condition at higher N rate is mainly caused by the enhanced spike number. The amounts of N, P and K uptake in aboveground part of winter wheat are increased by the straw return when the N application rates are higher than 275, 123 and 213 kg/hm² in the first year and 200, 165 and 241 kg/hm² in the second year, respectively, but their harvest indexes are not in the increasing tendency under high levels of N rates. Also, the reduction of P concentration in winter wheat grain is found due to over-fertilization of nitrogen. **【Conclusions】** Comprehensive consideration of the changes of winter wheat grain yield, N, P and K uptake and their utilization in aboveground part under the same N level and the straw return to soil condition, the N application rates for winter wheat are suggested to be within the range of N 150 to 200 kg/hm² in the winter wheat-summer maize rotation region of Guanzhong Plain for ensuring higher wheat yield and utilization efficiencies of N, P and K nutrient resource when the maize straw is returned to soil before winter wheat sowing.

Key words: straw return; winter wheat; yield; nutrient uptake; nutrient management

陕西关中平原位于黄土高原南部,以小麦—玉米轮作为主,是我国粮食主产区之一。近年来,玉米收获后多实行秸秆还田。秸秆含有供作物生长所需的氮、磷、钾、硫、钙和镁等营养元素,是一种重要的养分资源^[1]。所以,充分发挥和利用秸秆还田的积极效应,对促进冬小麦生长和养分资源的高效利用具有重要意义。已有研究表明,长期秸秆还田,能增加土壤有机质,改善土壤理化性状。河北潮土 13 年长期定位试验发现,小麦秸秆还田比不还田的土壤速效钾含量增加了 10.2%^[2]。加拿大连续 8 年大麦—豌豆—小麦—油菜的轮作试验结果表明,秸秆还田的 0—15 cm 土层的土壤轻质有机质增加 23.8%,轻质有机氮增加 9.7%^[3]。可见,秸秆还田确能提高耕层土壤养分含量。关于秸秆还田对作物产量的影响目前已有较多报道,山西临汾的长期定位试验发现,与传统耕作无秸秆覆盖处理相比,连续

11 年和 15 年免耕覆盖的小麦分别增产 19.2% 和 27.6%,尤其是在干旱年份,增产率可高达 85.0% 和 97.6%^[4]。关中灌区 7 个小麦品种的田间试验表明,秸秆粉碎入土还田与化肥配施比常规栽培增产 5.4%~13.1%^[5]。但也有秸秆还田导致作物减产的报道,英格兰粉质黏壤土的研究表明,秸秆入土还田比秸秆不还田的小麦籽粒产量降低了 3.9%^[6]。在陕西杨凌的田间试验也发现,小麦播前将玉米秸秆翻压,还田量为 9730 kg/hm² (干重)时,小麦明显减产^[7]。减产的原因可能是秸秆还田后的土壤水分不均,紧实度差影响了小麦出苗^[8-9],也可能是秸秆还田导致土壤的碳氮比失调^[10-11]等等。随着农业机械化程度的提高,秸秆粉碎还田技术不断完善。因此,与现代农机技术相结合,在保障田间小麦播种质量良好、严格控制病虫害的前提下,优化肥料管理应能实现秸秆还田后的作物增产。

同时,国内外进行秸秆还田养分管理的研究不少^[12-15],但大多数集中在土壤养分变化方面,缺乏秸秆还田对小麦养分吸收利用影响的研究。因此本研究组于2010~2011年在陕西关中设置了一个施氮水平下玉米秸秆还田和不还田对比的田间试验,结果发现施纯氮 N 175 kg/hm² 时,秸秆还田小麦籽粒产量明显增加^[16],但秸秆还田的产量效应是否与施氮水平变化有关? 本研究继续在陕西关中冬小麦一夏玉米轮作区进行两年田间定位试验,增设不同氮肥水平,研究秸秆还田对小麦产量及养分吸收利用的影响,以进一步明确秸秆还田究竟能否使作物增产,增产的条件是什么? 增产条件下的氮、磷、钾养分吸收利用有什么变化? 旨在为秸秆还田小麦

增产和肥料增效、优化养分管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

试验于2011~2013年在陕西省周至县终南镇王才屯村(东经 108°22'4", 北纬 34°07'20")进行。试验点位于关中平原,属半湿润易旱气候,以冬小麦夏玉米轮作为主,一年两熟,年均气温 13℃,降水量 674 mm,无霜期 225 d。试验开始前 0—20 cm 土层土壤有机质含量 18.6 g/kg,全氮 1.13 g/kg,硝态氮 4.03 mg/kg,有效磷 43.5 mg/kg,速效钾 188 mg/kg, pH 7.28,容重 1.21 g/cm³。2011年7月到2013年5月试验区降水量如图 1。

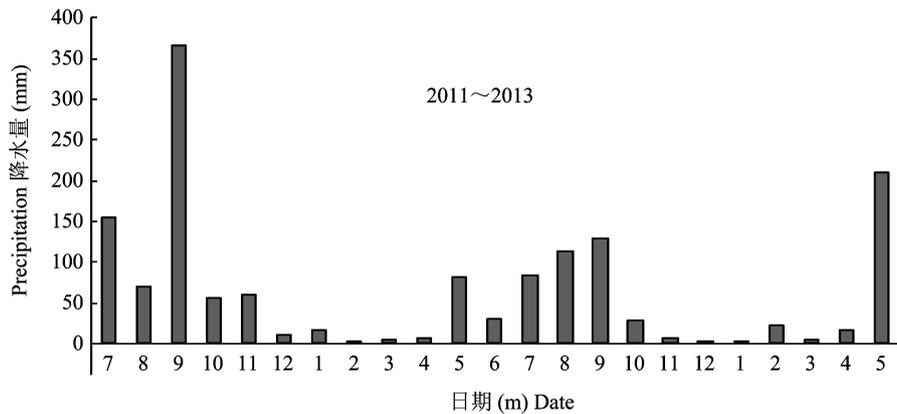


图 1 2011年7月~2013年5月试验地点降水量

Fig. 1 The monthly precipitation from July 2011 to May 2013 at the experimental site

[注(Note): 资料来源于周至县气象局 Data from Meteorological Administration of Zhouzhi County, Shaanxi Province.]

1.2 试验设计

试验开始于2011年10月。采用裂区设计,主处理为玉米秸秆还田(S1)和还不还田(S0),其中秸秆还田是将玉米秸秆机械粉碎后全量还田,在小麦播种前深翻(30 cm)入土,然后撒施肥料,用旋耕机旋耕 20 cm,再用带有土壤压实器的播种机播种小麦;秸秆不还田是将玉米秸秆移出田块,其他耕作措施同秸秆还田处理。副处理为 5 个施氮水平,用量为 N 0、84、168、252、336 kg/hm² (中间用量为 N 168 kg/hm²,根据当地农技部门推荐用量设置),共 10 个处理。小区面积 34.5 m²,重复 4 次。各处理磷、钾肥料用量一致,2011 年为 P₂O₅ 150 kg/hm² 和 K₂O 135 kg/hm²,2012 年根据小麦播前土壤速效养分测定结果调整为 P₂O₅ 100 kg/hm² 和 K₂O 75 kg/hm²。氮肥用尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。氮肥用量的 60% 和全部磷、钾肥在小麦播前作底肥一次

施入,其余 40% 的氮肥于拔节期开沟追施。小麦品种为周麦 23,2011~2012 年小麦播量 187.5 kg/hm²;2012~2013 年播量 165 kg/hm²。小麦生育期不灌水,按时防病虫害、除草,管理措施与当地农户一致。小麦收获后种植夏玉米,品种为郑单 958,播量 45 kg/hm²,机械播种,施氮量 N 108 kg/hm²,磷肥用量 P₂O₅ 138 kg/hm²。第一年玉米秸秆还田量为 5500 kg/hm²,第二年为 4910 kg/hm²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品 试验开始前(2011年10月),采用 5 点混合法取 0—20 cm 土层基础土样,风干后分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛。有机质含量用油浴加热—重铬酸钾容量法;全氮用浓硫酸消煮—半微量开氏法;硝态氮用 1 mol/L 氯化钾浸提—连续流动分析仪测定;有效磷用 0.5 mol/L 碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法;速效钾用 1 mol/L 乙酸铵提取—火

焰光度法;pH(水土比为2.5:1)用电位法;土壤容重用环刀法测定^[17]。

1.3.2 植株样品 于冬小麦出苗后在各小区随机选取3个1 m长的样段,并标记,用于调查小麦田间分蘖数。在成熟期(2012年6月5日,2013年5月27日)采集植株样品,各小区随机选取3个1 m²具有代表性的样点,风干后用脱粒机脱粒、称重;取部分籽粒样品,于65℃烘干至恒重,测定水分含量,计算小麦籽粒产量。同时,每个小区随机采集3个1 m长的样段混合后,沿根茎结合处剪掉根系,将地上部作为一个分析样品,风干后分为籽粒、茎叶和颖壳三部分,分别称重后,各取部分样,于65℃烘干至恒重,计算各处理小麦收获指数。各部位烘干样粉碎后,用浓H₂SO₄-H₂O₂消煮,AA3连续流动分析仪测定氮、磷含量,火焰光度计测定钾含量。小麦籽粒氮、磷、钾含量,产量和生物量均以65℃烘干后的干物质量表示。

1.4 数据处理

地上部吸氮(磷、钾)量(kg/hm²) = [籽粒含氮(磷、钾)量(g/kg) × 籽粒产量(kg/hm²) + 茎叶含氮(磷、钾)量(g/kg) × 茎叶生物量(kg/hm²) + 颖壳含氮(磷、钾)量(g/kg) × 颖壳生物量(kg/hm²)] / 1000

氮(磷、钾)收获指数(%) = 籽粒吸氮(磷、钾)量(kg/hm²) / 地上部吸氮(磷、钾)量(kg/hm²) × 100^[18]

试验数据用Excel 2007进行处理,SAS 8.1软件进行方差分析,作图工具为Sigmaplot 12.0。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒产量

对小麦产量和施氮量的回归分析(图2)发现,秸秆还田与不还田的肥料效应曲线相交,与不还田相比,秸秆还田小麦有低施氮量减产、高氮量时增产的趋势。第一年,施氮量低于N 153 kg/hm²时,秸秆还田处理的产量低于不还田处理,不施氮时,秸秆还田的籽粒产量为3427 kg/hm²,比不还田处理减少3.0%,当施氮量高于N 153 kg/hm²时,秸秆还田处理的小麦产量增加,施氮量252和336 kg/hm²时,产量分别为7077和7320 kg/hm²,比不还田处理增加3.2%和7.2%。第二年,两条曲线交点处施氮量为N 187 kg/hm²,不施氮肥时,秸秆还田的小麦产量为4317 kg/hm²,比不还田减产8.4%;施氮量为N 252和336 kg/hm²时,小麦产量分别为5801和5833 kg/hm²,比不还田处理增加2.4%和5.6%。由此可见,秸秆还田后小麦是否增产受氮肥用量的影响。秸秆还田与不还田两个处理的产量曲线相交,施氮量低于交点值时,秸秆还田小麦减产;高于此值则增产,且增产量随着氮肥用量的增大更加明显。

2.2 小麦生物量

对生物量与施氮量进行回归分析,其结果(图3)表明,秸秆还田对小麦生物量的影响与产量有相似的趋势,即低氮降低、高氮增加。第一年,施氮量低于N 190 kg/hm²时,秸秆还田的小麦生物量降低,高于N 190 kg/hm²时,生物量增加。不施氮肥

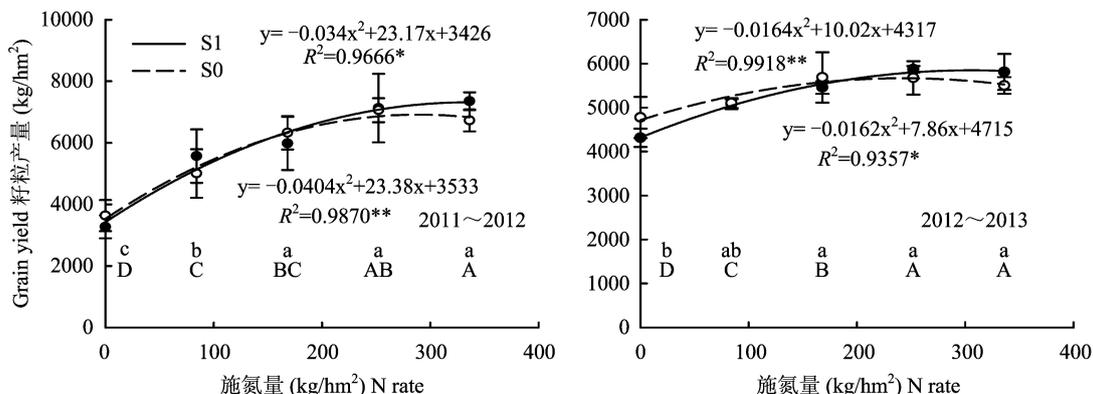


图2 玉米秸秆还田对冬小麦籽粒产量的影响

Fig. 2 Effects of the maize straw return to soil on grain yield of winter wheat

[注(Note): S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return. 图中不同小、大写字母分别表示秸秆不还田和秸秆还田条件下氮水平间的差异达5%显著水平 Different small and capital letters indicate differences among different N rates at the 5% level under the straw removal treatments and straw return to soil treatments, respectively.]

和施纯氮 $N 84 \text{ kg/hm}^2$ 时, 秸秆还田处理的生物量分别为 9634 和 13032 kg/hm^2 , 比不还田处理降低 5.0% 和 3.5% ; 施氮量提高到 $N 336 \text{ kg/hm}^2$ 时, 生物量为 17732 kg/hm^2 , 比不还田处理增加 8.9% 。第二年, 施氮量为 $N 202 \text{ kg/hm}^2$ 时, 秸秆还田与不还田的小麦生物量 (10811 kg/hm^2) 相等, 不施氮肥时, 秸秆还田的小麦生物量为 8068 kg/hm^2 , 比不还田处理降低 11.3% , 差异达显著水平; 施氮量为 $N 336 \text{ kg/hm}^2$ 时, 比不还田处理增加 5.6% 。可见, 要使秸秆还田条件下的生物量高于不还田, 氮肥用量应不低于 $N 190 \text{ kg/hm}^2$ 。

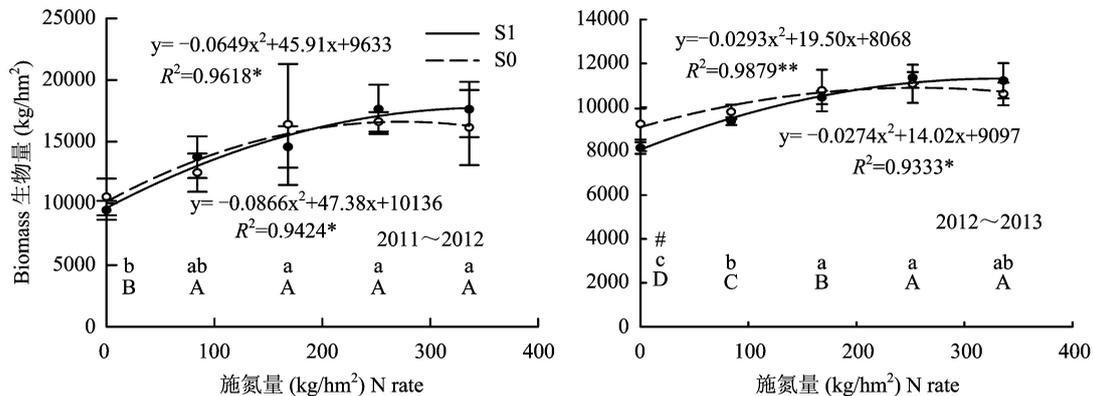


图 3 玉米秸秆还田对冬小麦生物量的影响

Fig. 3 Effects of the maize straw return to soil on biomass of winter wheat

[注 (Note): 图中不同小、大写字母分别表示秸秆不还田和秸秆还田条件下氮水平间的差异达 5% 显著水平 Different small and capital letters indicate differences among different N rates at the 5% level under the straw removal treatments and straw return to soil treatments, respectively. “#”表示同一氮水平玉米秸秆还田与不还田处理间差异达到 5% 显著水平 Indicates that the differences between the maize straw return to soil and straw removal treatments under the same N rate at the 5% level. S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return.]

2.3 小麦冬前分蘖与产量构成要素

表 1 表明, 秸秆还田对小麦冬前分蘖和公顷穗数的影响也呈现出低氮降低, 高氮增加的趋势, 在试验的第 2 年更为明显。第一年, 不施氮秸秆还田处理的冬前分蘖和公顷穗数分别比不还田处理降低 7.9% 和 17.3% , 第二年, 不施氮肥和施氮量 $N 84 \text{ kg/hm}^2$ 时, 冬前分蘖分别降低 6.8% 和 6.0% , 公顷穗数分别降低 10.3% 和 5.1% , 但当施氮量增至 $N 252 \text{ kg/hm}^2$ 时, 小麦穗数比不还田处理增加 11.0% , 差异达显著水平。

小麦穗粒数和千粒重的分析结果表明, 无论施氮量高低, 秸秆还田均没有对其产生显著影响 (数据未列出)。随氮肥用量的增加, 第一年, 秸秆还田的小麦穗粒数为 $28.0 \sim 34.8$ 粒/穗, 千粒重为 43.8

对小麦收获指数的分析表明, 秸秆还田与否没有显著影响, 但低施氮量 ($N 0$ 和 84 kg/hm^2) 时, 秸秆还田的小麦收获指数有增加趋势。施氮量为 $N 0$ 、 84 、 168 、 252 和 336 kg/hm^2 时, 第一年秸秆还田和不还田的小麦收获指数分别为 35.6% 、 39.4% 、 40.9% 、 41.4% 、 41.3% 和 34.9% 、 38.6% 、 40.4% 、 41.4% 、 42.0% , 第二年分别为 53.5% 、 53.1% 、 52.7% 、 52.2% 、 51.6% 和 51.8% 、 52.2% 、 52.2% 、 52.0% 和 51.6% 。说明秸秆还田条件下, 施氮量不足 $N 168 \text{ kg/hm}^2$ 时, 由于氮素相对缺乏, 小麦生长受到抑制, 会将有限的干物质更多地向籽粒转移。

$\sim 46.6 \text{ g}$, 秸秆不还田的穗粒数为 $30.5 \sim 34.5$ 粒/穗, 千粒重为 $43.7 \sim 47.0 \text{ g}$; 第二年, 秸秆还田处理的穗粒数为 $42.7 \sim 47.8$ 粒/穗, 千粒重为 $38.1 \sim 41.8 \text{ g}$, 秸秆不还田处理的穗粒数为 $42.4 \sim 47.0$ 粒/穗, 千粒重为 $37.6 \sim 42.0 \text{ g}$ 。

2.4 小麦籽粒氮、磷、钾含量

籽粒养分含量是评价小麦营养品质的主要因素。表 2 结果表明, 小麦籽粒含氮量随着氮肥用量的增加而递增, 与不施氮相比, 第一年, 秸秆还田与不还田的小麦籽粒含氮量分别增加 $25.0\% \sim 41.1\%$ 和 $23.5\% \sim 44.1\%$, 第 2 年分别增加 $4.4\% \sim 9.2\%$ 和 $4.9\% \sim 9.4\%$, 但同一施氮水平相比较, 秸秆还田对小麦籽粒含氮量无显著影响。

表 1 小麦冬前分蘖数和公顷穗数
Table 1 Tiller number before winter and spike number per hectare

年份 Year	氮肥用量 N rate (kg/hm ²)	冬前分蘖数(×10 ⁴ /hm ²) Tiller No. before winter		公顷穗数(×10 ⁴ /hm ²) Spike No. per hectare	
		S0	S1	S0	S1
		2011 ~ 2012	0	584 bA	538 bA
	84	703 aA	690 aA	433 bcA	450 bA
	168	729 aA	754 aA	461 bcA	435 bA
	252	756 aA	773 aA	508 abA	502 abA
	336	757 aA	753 aA	543 aA	533 aA
2012 ~ 2013	0	132 aA	123 aA	300 aA	269 bA
	84	134 aA	126 aA	293 aA	278 bA
	168	154 aA	144 aA	290 aA	280 bA
	252	123 aA	143 aA	317 aB	352 aA
	336	116 aA	133 aA	327 aA	343 aA

注(Note): S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return. 同行数据后不同大写字母表示玉米秸秆还田与不还田的差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in same row are significantly different between treatments of the maize straw return to soil or not at the 5% level in the same year; 同列数据后不同小写字母表示氮水平间的差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among different N rates at the 5% level.

表 2 小麦籽粒氮、磷、钾含量(g/kg)
Table 2 Nitrogen, phosphorus and potassium contents in wheat grain

年份 Year	氮肥用量 N rate (kg/hm ²)	籽粒含氮量 Grain N content		籽粒含磷量 Grain P content		籽粒含钾量 Grain K content	
		S0	S1	S0	S1	S0	S1
		2011 ~ 2012	0	17.9 cA	18.0 cA	4.27 aA	4.48 aA
	84	22.1 bA	22.5 bA	4.47 aA	4.41 aA	4.90 aA	4.64 aA
	168	25.8 aA	24.6 abA	4.33 aA	4.48 aA	4.52 aA	4.59 aA
	252	24.3 aA	23.3 abA	4.21 aA	4.47 aA	4.47 aA	4.73 aA
	336	24.5 aA	25.4 aA	4.16 aA	4.22 aA	4.39 aA	4.73 aA
2012 ~ 2013	0	20.3 bA	20.6 cA	3.25 aA	3.11 aA	4.43 aA	4.32 aA
	84	21.3 abA	21.9 abA	2.84 bA	2.84 bA	4.27 aA	4.13 aA
	168	22.2 aA	21.5 bA	2.61 bA	2.61 cA	4.28 aA	4.15 aA
	252	21.7 aA	21.5 bA	2.69 bA	2.55 cA	4.39 aA	4.31 aA
	336	22.2 aA	22.5 aA	2.52 bA	2.58 cA	4.19 aA	4.33 aA

注(Note): S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return. 同行数据后不同大写字母表示玉米秸秆还田与不还田的差异达5%显著水平 Values followed by different capital letters in same row are significantly different between treatments of the maize straw return to soil or not at the 5% level in the same year; 同列数据后不同小写字母表示氮水平间的差异达5%显著水平 Values followed by different small letters in a column are significantly different among different N rates at the 5% level.

无论秸秆还田与否,不同氮肥用量对第一年小麦籽粒含磷量和前后两年的籽粒含钾量均无明显影

响,第二年,籽粒的含磷量随施氮量的增加而递减,与不施氮肥相比,秸秆还田和还不还田施氮处理的籽

粒含磷量分别降低了 8.7%~18.0% 和 12.6%~22.5%, 可见, 过量施用氮肥会造成小麦籽粒磷营养水平的下降。然而, 当施氮量相等时, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田处理对小麦籽粒含磷量和含钾量均无明显影响。

2.5 小麦氮素吸收与利用

从图 4 可以看出, 在低氮量时, 秸秆还田较秸秆不还田处理的小麦地上部吸氮量降低, 施氮量高时则相反。前后两年氮肥用量分别低于 N 275 和 200 kg/hm² 时, 秸秆还田的小麦吸氮量低于不还田; 第

一年, 施氮量为 N 168 kg/hm² 时, 小麦吸氮量比不还田处理显著降低 13.6%, 第二年不施氮肥和施氮 N 84 kg/hm² 时, 分别降低 8.2% 和 5.4%。两年氮肥用量分别高于 N 275 和 200 kg/hm² 时, 秸秆还田的小麦吸氮量增加, 施氮 N 336 kg/hm² 时, 第一年和第二年的吸氮量分别比不还田处理增加 6.4% 和 10.3%。可见, 由于还田的秸秆腐解需要消耗一部分氮素, 导致小麦地上部吸氮量降低、氮素累积下降, 但施氮量充足时, 这一影响不仅可以消除, 秸秆还田还能促进小麦吸收更多的氮素。

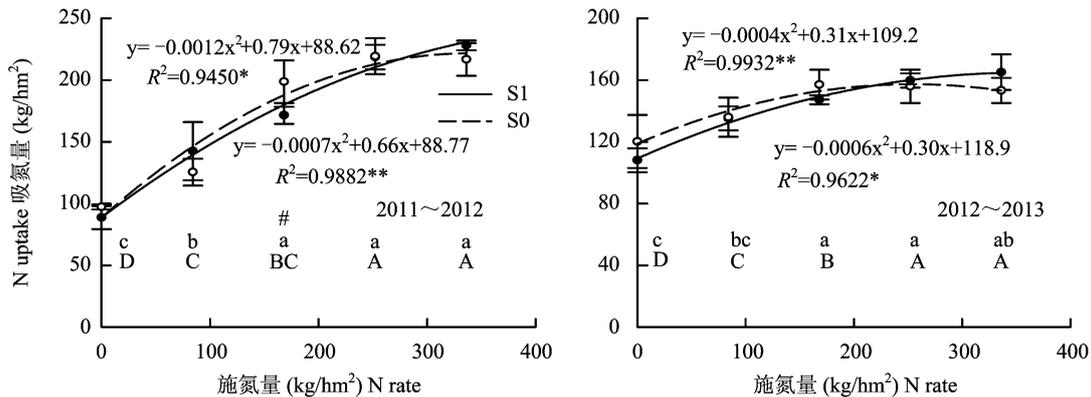


图 4 玉米秸秆还田对冬小麦地上部吸氮量的影响

Fig. 4 Effects of the maize straw return to soil on nitrogen uptake in aboveground of winter wheat

[注 (Note): 图中不同小、大写字母分别表示秸秆不还田和秸秆还田条件下氮水平间的差异达 5% 显著水平 Different small and capital letters indicate differences among different N rates at the 5% level under the straw removal treatments and straw return to soil treatments, respectively. “#” 表示同一氮水平玉米秸秆还田与不还田处理间差异达到 5% 显著水平 Indicates that the differences among means of the maize straw return to soil and straw removal treatments under the same N rate at the 5% level. S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return.]

试验结果还表明, 秸秆还田的氮收获指数在低施氮量时增加, 施氮量高时无差异。第一年秸秆还田和还不还田不同施氮水平的氮素收获指数分别为 78.1%、81.4%、79.7%、79.1%、79.0% 和 73.9%、78.9%、82.2%、78.3%、76.0%, 第二年分别为 82.3%、82.4%、79.5%、79.1%、79.2% 和 80.9%、80.0%、80.1%、79.1%、79.6%。说明施氮量低时, 作物氮素营养不足, 秸秆还田小麦将更多的氮素转向籽粒, 以保证籽粒正常生长所需的氮营养。

2.6 小麦磷素吸收与利用

地上部吸磷量和施氮量的回归分析 (图 5) 表明, 在秸秆还田条件下, 随着氮肥用量增加, 第一年和第二年小麦地上部吸磷量分别为 21.2~40.6 kg/hm² 和 15.0~17.3 kg/hm²。与秸秆不还田相比, 秸秆还田在低施氮量时小麦吸磷量降低、高氮时

有增加趋势。前后两年施氮量分别为 N 123 和 165 kg/hm² 时, 秸秆还田与不还田处理的小麦吸磷量相等。第二年不施氮肥时, 秸秆还田的小麦吸磷量为 15.2 kg/hm², 比不还田明显降低 14.0%, 施氮量为 N 252 和 336 kg/hm² 时, 前后两年的地上部吸磷量分别增加 4.7%、7.7% 和 2.5%、1.5%。因此, 在施氮量低时, 秸秆还田影响小麦地上部对磷素的吸收。

秸秆还田对磷的收获指数亦无显著影响, 但施氮量较低 (N 0 和 84 kg/hm²) 时, 与不还田相比, 秸秆还田的磷收获指数有增加趋势。随着施氮量的增加, 第一年, 秸秆还田和还不还田的磷收获指数分别为 69.0%、75.0%、74.0%、78.4%、80.7% 和 67.0%、73.4%、74.5%、77.6%、79.1%, 第二年分别为 89.1%、87.6%、87.3%、87.2%、86.6% 和 87.1%、87.0%、87.1%、87.8%、86.1%。

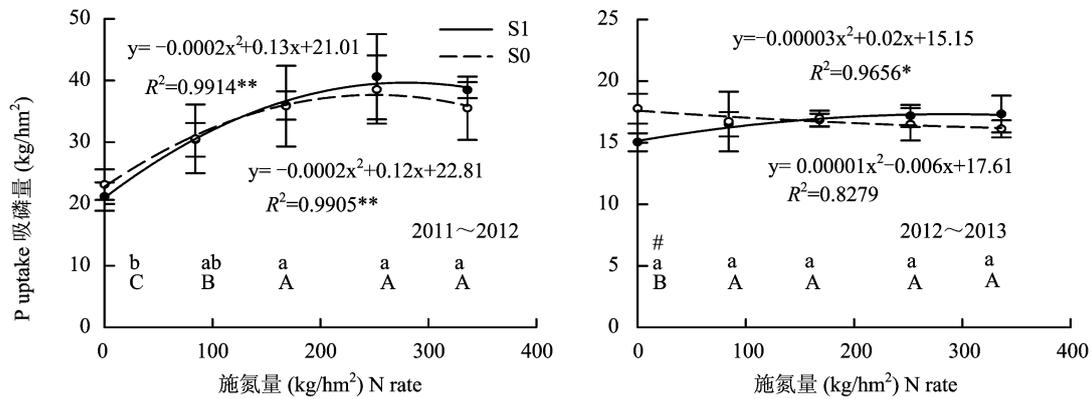


图5 玉米秸秆还田对冬小麦地上部吸磷量的影响

Fig. 5 Effects of the maize straw return to soil on phosphorus uptake in aboveground of winter wheat

[注(Note): 图中不同小、大写字母分别表示秸秆不还田和秸秆还田条件下氮水平间的差异达5%显著水平 Different small and capital letters indicate differences among different N rates at the 5% level under the straw removal treatments and straw return to soil treatments, respectively. “#”表示同一氮水平玉米秸秆还田与不还田处理间差异达到5%显著水平 Indicates that the differences among means of the maize straw return to soil and straw removal treatments under the same N rate at the 5% level. S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return.]

2.7 小麦钾素吸收与利用

秸秆还田对小麦地上部吸钾量的影响与吸磷量相似(图6),即低施氮量下降低,施氮量高时增加。秸秆还田与不还田处理的小麦吸钾量相等时,两年的施氮量分别为 N 213 和 241 kg/hm²。不施氮和施氮 N 84 kg/hm² 时,第一年秸秆还田的小麦吸钾量分别比不还田处理降低 8.4% 和 3.6%,第二年分别降低 15.2% 和 8.9%。低施氮量时,秸秆还田抑制了小麦地上部的钾素吸收。当氮肥用量达 N 336 kg/hm² 时,两年的小麦地上部吸钾量分别增加 2.3% 和 4.6%。随施氮量的增加,前后两年的秸秆

还田处理的小麦地上部吸钾量分别介于 98 ~ 257 kg/hm² 和 92 ~ 144 kg/hm² 之间,均高于当年的钾肥投入,因此,秸秆还田条件下,应注意小麦钾素营养的调控。

低氮时秸秆还田处理的钾收获指数增加,尤其在试验持续到第二年时更加明显,高氮量时无显著影响。不同氮水平时,第一年秸秆还田与不还田的钾收获指数分别为 16.4%、15.5%、13.1%、16.3%、13.8% 和 15.1%、15.1%、15.4%、12.8%、12.5%,第二年分别为 21.2%、21.6%、19.4%、18.5%、17.5% 和 19.9%、19.6%、19.5%、18.4%、

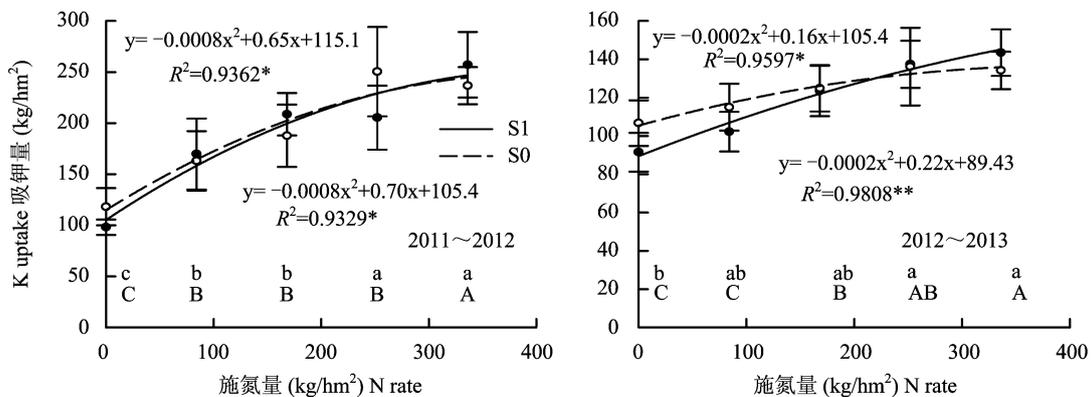


图6 玉米秸秆还田对冬小麦地上部吸钾量的影响

Fig. 6 Effects of the maize straw return to soil on potassium uptake in aboveground of winter wheat

[注(Note): 图中不同小、大写字母分别表示秸秆不还田和秸秆还田条件下氮水平间的差异达5%显著水平 Different small and capital letters indicate differences among different N rates at the 5% level under the straw removal treatments and straw return to soil treatments, respectively. S0—玉米秸秆不还田 Without maize straw return; S1—玉米秸秆还田 With maize straw return.]

17.2%。说明施氮量低时,秸秆还田的小麦茎叶中钾素残留减少,向籽粒转移的比例增加。

3 讨论

3.1 秸秆还田的小麦产量及其构成要素

许多研究表明,与秸秆不还田相比,不施氮肥,秸秆还田作物减产,配施氮肥则产量增加。墨西哥西北部小麦玉米轮作试验表明,不施氮时,秸秆还田的小麦减产 10.8%,施氮量为 N 75 ~ 300 kg/hm² 时,增产 0.7% ~ 10.2%^[19]。河南灌区一年的田间试验表明,不施氮的秸秆还田小麦减产,配施纯氮 N 90、180、270 和 360 kg/hm² 比单施等量氮肥分别增加 7.1%、8.4%、11.1% 和 10.2%^[10]。本研究中,与秸秆不还田相比,当年秸秆还田对小麦籽粒产量和生物量的影响均表现为低施氮量降低,高施氮量增加,那么,究竟配施多少氮肥才能保证秸秆还田小麦不减产呢? 在本试验条件下,第一年和第二年的施氮量分别增加到 N 153 和 187 kg/hm² 时,玉米秸秆还田才使小麦增产,低于此值,小麦减产;生物量与产量的趋势一致。在这一地区,秸秆还田条件下小麦增产的施氮量高于其他地区,可能与土壤肥力状况有关,试验点位于关中腹地,土壤有机质含量为 18.6 g/kg,微生物活动作用强,施入的无机氮肥可能被较多地固定于土壤中,所以秸秆还田后,需配施一定数量的氮肥,才能实现小麦增产。

在产量构成要素中,同一施氮水平时,秸秆还田对小麦的穗粒数和千粒重没有明显影响,而穗数表现为低氮量下减少,施氮量高时增加,与产量的变化趋势一致。说明公顷穗数变化是影响秸秆还田小麦产量的直接原因。主要是因为氮素不足时,在小麦生长前期,如有新鲜有机物的加入,使微生物活动加强,土壤养分过度消耗,后期氮素供应不足,导致形成的无效分蘖增多、有效穗数降低^[20];氮素充足时,不仅满足了微生物分解秸秆需要的氮素,充足的氮素也可保障小麦正常生长,穗数增加。在山东泰安的试验发现,施氮量较高时(N 240 kg/hm²),玉米秸秆还田耙耕处理小麦穗数增加 6.7%,产量增加 4.7%^[21]。因此,玉米秸秆还田条件下,根据目标产量,同时应补充供微生物活动和作物正常生长需要的氮素,是获得小麦增产的关键。

3.2 秸秆还田小麦籽粒氮磷钾含量及其吸收利用

本试验中,秸秆还田对小麦籽粒氮磷钾含量均无明显影响,但第一年施氮量分别低于 N 275、123 和 213 kg/hm²,第二年分别低于 N 200、165 和 241

kg/hm² 时,秸秆还田小麦氮、磷、钾吸收量降低,超过这一施氮量时,氮磷钾吸收量增加。河南小麦玉米轮作试验发现,不施氮肥,秸秆还田小麦地上部吸氮量降低 7.6%,施氮量提高到 N 270 和 360 kg/hm² 时,地上部吸氮量分别增加 5.5% 和 7.9%^[10]。印度西北部田间试验也证明,稻草不还田、推荐施氮 N 120 kg/hm² 时,还田小麦吸氮量降低 9.8%,氮肥利用率降低 21%^[22]。可见,由于秸秆腐解需要消耗氮素,氮肥不足时,土壤中可利用的氮素减少,抑制了作物地上部氮的吸收和累积。氮磷、氮钾间也存在明显的正交互作用^[23],氮素不足导致小麦磷钾吸收降低。氮肥充足时,一方面可为土壤提供足够的养分“源”^[24],另一方面,可促进对磷钾吸收^[25-26]。本研究发现,低氮时秸秆还田有增加氮磷钾收获指数的趋势。说明生长后期土壤氮素供应不足、难以满足作物的氮营养需求时,小麦会将吸收的养分更多地从茎秆转运到籽粒。田间水稻试验也发现,不施氮肥时,与小麦秸秆不还田相比,秸秆还田能显著提高水稻氮磷钾收获指数^[27]。

3.3 秸秆还田小麦增产高效的养分调控

在保障播种质量前提下,增施氮肥可以实现玉米秸秆还田后的小麦增产。试验表明,单从增产方面考虑,第一年和第二年氮肥用量分别高于 N 153 和 187 kg/hm² 时,秸秆还田小麦产量高于不还田。同时施氮量高时,秸秆还田的小麦地上部氮素累积量增加,本研究中,前后两年施氮量分别高于 N 275 和 200 kg/hm² 时,与秸秆不还田相比,秸秆还田的小麦地上部吸氮量增加了 3.3% ~ 10.3%,但氮肥用量过高,小麦氮收获指数却不再增加,说明施氮量低于此值时,秸秆还田不会引起小麦地上部对氮素的“奢侈”吸收,即吸收的氮素并未大量残留于茎叶中,而是更多地转向籽粒,提高了氮的利用效率。因此,从氮素高效利用方面考虑,这一地区秸秆还田的冬小麦施氮量不宜超过 N 200 kg/hm²。与氮的吸收情况类似,试验两年氮肥用量分别高于 N 123 和 165 kg/hm² 时,秸秆还田的小麦地上部吸磷量增加 0.1% ~ 7.7%,当施氮量分别高于 N 213 和 241 kg/hm² 时,小麦吸钾量增加 0.5% ~ 4.6%。但过量施氮,也会造成小麦籽粒磷营养品质的降低,并带来一系列的生态环境问题^[28]。本试验地位于陕西关中平原的冬小麦—夏玉米轮作区,试验区域秸秆还田推广面积逐年增加,但以往的许多推荐施肥研究^[29-30]并未将秸秆还田作为因素考虑。本研究结合不同施氮水平下小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的

变化,以小麦增产与养分资源高效利用为目标,建议该地区秸秆还田条件下冬小麦的氮肥用量应为 N 150 ~ 200 kg/hm²。

4 结论

试验第一年和第二年施氮量分别高于 N 153 和 187 kg/hm² 时,玉米秸秆还田与不还田相比小麦产量增加,低于该施氮量时,秸秆还田处理的小麦减产。公顷穗数是影响秸秆还田条件下小麦产量变化的直接原因。秸秆还田后,小麦地上部氮、磷、钾吸收量增加时,第一年的氮肥用量分别高于 N 275、123 和 213 kg/hm²,第二年分别高于 N 200、165 和 241 kg/hm²,但氮、磷、钾的收获指数不随施氮量的增加而递增,过量施氮也会造成籽粒磷含量下降。综合以上各因素,建议在陕西关中平原秸秆还田条件下小麦的适宜施氮量为 N 150 ~ 200 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 李逢雨,孙锡发,冯文强,等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 374-380.
- Li F Y, Sun X F, Feng W Q *et al.* Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 374-380.
- [2] 谭德水,金继运,黄绍文,等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 133-139.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 133-139.
- [3] Malhi S S, Lemke R. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 269-283.
- [4] 王改玲,郝明德,徐继光,洪坚平. 保护性耕作对黄土高原南部地区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 539-544.
- Wang G L, Hao M D, Xu J G, Hong J P. Effect of conservation tillage on wheat yield and soil physicochemical properties in the south of Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 539-544.
- [5] 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(增刊2): 156-162.
- Dong Q G, Feng H, Du J. Effects of chemical fertilizer combined crushed straw application on yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26 (Supp. 2): 156-162.
- [6] Powlson D S, Jenkinson D S, Pruden G, Johnston A E. The effect of straw incorporation on the uptake of nitrogen by winter wheat [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36: 26-30.
- [7] 郑伟,张静,刘阳,等. 低施肥条件下秸秆还田对冬小麦旗叶衰老的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4967-4975.
- Zheng W, Zhang J, Liu Y *et al.* Physiological effects of ploughing corn straw under soil on flag-leaf resistance of winter wheat under lowly applying fertilizer condition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4967-4975.
- [8] 李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463-465.
- Li S K, Wang K R, Feng J K *et al.* Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463-465.
- [9] 刘义国,林琪,王宁. 秸秆还田与氮供应对小麦灌浆期光合日变化的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 219-223.
- Liu Y G, Lin Q, Wang N. Effects of straw return and N supply on diurnal variation of photosynthesis in grain filling stage of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(5): 219-223.
- [10] 赵鹏,陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
- Zhao P, Chen F. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica* 2008, 34(6): 1014-1018.
- [11] Lemke R L, VandenBygaart A J, Campbell C A *et al.* Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135(1-2): 42-51.
- [12] Roldan A, Caravaca F, Hernández M T *et al.* No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, 72: 65-73.
- [13] Fuentes M, Govaerts B, De León F *et al.* Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30: 228-237.
- [14] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2518-2525.
- Zhang P, Li H, Jia Z K *et al.* Effects of straw returning on soil organic carbon and carbon mineralization in semi-arid areas of southern Ningxia, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2518-2525.
- [15] 王龙昌,邹聪明,张云兰,等. 西南“旱三熟”地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效应的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1880-1890.
- Wang L C, Zou C M, Zhang Y L *et al.* Influences of

- conservation tillage practices on farmland soil ecological factors and productive benefits in dryland region with triple cropping system in southwest China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(10): 1880–1890.
- [16] 沈海军. 秸秆还田和施氮量对关中灌区冬小麦产量形成和养分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.
- Shen H J. Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on yield formation of winter wheat and nutrition use in Guanzhong irrigation area [D]. Yangling: Ms Theses of Northwest Agriculture and Forestry University, 2012.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 56–57, 81–83, 106–107.
- Bao S D. Soil agricultural-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 56–57, 81–83, 106–107.
- [18] 李鸿伟, 杨凯鹏, 曹转动, 等. 稻麦连作中超高产栽培小麦和水稻的养分吸收与积累特征[J]. *作物学报*, 2013, 39(3): 464–477.
- Li H W, Yang K P, Cao Z Q *et al.* Characteristics of nutrient uptake and accumulation in wheat and rice with continuous cropping under super-high-yielding cultivation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(3): 464–477.
- [19] Limon-Ortega A, Sayre K D, Francis C A. Wheat and maize yields in response to straw management and nitrogen under a bed planting system[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 295–302.
- [20] 张定一, 党建友, 王姣爱, 等. 施氮量对不同品质类型小麦产量、品质和旗叶光合作用的调节效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 535–542.
- Zhang D Y, Dang J Y, Wang J A *et al.* Regulative effect of nitrogen fertilization on grain yield, quality and photosynthesis of flag leaves in different wheat varieties[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 535–542.
- [21] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48–53.
- Han B, Li Z J, Wang Y *et al.* Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 48–53.
- [22] Bijay-Singh, Bronson K F, Yadvinder-Singh *et al.* Nitrogen-15 balance as affected by rice straw management in a rice-wheat rotation in northwest India [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59: 227–237.
- [23] 田生昌, 马建军, 叶路明. 宁夏平罗春小麦氮、磷、钾肥肥效及适宜用量[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(4): 396–399.
- Tian S C, Ma J J, Ye L M. Spring wheat N–P–K fertilizer efficiency and the appropriate amount for Pingluo in ningxia[J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2012, 33(4): 396–399.
- [24] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 350–359.
- Yuan L, Zhang X, Yang J *et al.* Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutrition quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 350–359.
- [25] Witt C, Cassman K G, Olk D C *et al.* Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems[J]. *Plant and Soil*, 2000, 225: 263–278.
- [26] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 欧阳竹. 不同肥料结构对水稻群体干物质生产及养分吸收分配的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(2): 199–202.
- Yang C M, Yang L Z, Yan T M, Ouyang Z. Effects of nutrient regimes on dry matter production and nutrient uptake and distribution by rice plant[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 199–202.
- [27] 徐国伟, 杨立年, 王志琴, 等. 麦秸还田与实施氮肥管理对水稻氮磷钾吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(8): 1424–1434.
- Xu G W, Yang L N, Wang Z Q *et al.* Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(8): 1424–1434.
- [28] 王立刚, 李虎, 杨黎, 等. 冬小麦/夏玉米轮作系统不同施氮量的长期环境效应及区域氮调控模拟[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(14): 2932–2941.
- Wang L G, Li H, Yang L *et al.* Simulation of long-term and regional environmental effects of different N applications in the winter wheat/summer maize system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14): 2932–2941.
- [29] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 李生秀. 不同栽培模式对小麦-玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 991–997.
- Wang C Y, Zhou J B, Zheng X F, Li S X. Effects of different cultivation methods on soil residual nitrate under winter wheat-summer maize cropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 991–997.
- [30] 同延安, 赵营, 赵护兵, 樊红柱. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 64–69.
- Tong Y A, Zhao Y, Zhao H B, Fan H Z. Effect of N rates on N uptake, transformation and the yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1): 64–69.