

施氮对关中还田玉米秸秆腐解和养分释放特征的影响

黄婷苗¹ 王朝辉^{1,2} 侯仰毅¹ 顾灿明¹ 李 晓¹ 郑险峰^{1*}

(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 在陕西关中平原的冬小麦-夏玉米轮作区,采用尼龙网袋田间填埋与¹⁵N 同位素标记玉米秸秆相结合的方法,设置不施氮和施氮 200 kg·hm⁻²两个处理,研究施氮对小麦生长期还田玉米秸秆腐解的影响以及腐解过程中秸秆碳、氮、磷、钾的养分释放.结果表明:从小麦播种到越冬期,施用氮肥对秸秆碳和干物质分解无显著影响,但可促进秸秆中磷的释放,抑制氮和钾的释放.灌浆到成熟期,氮肥对秸秆腐解及其 N、P、K 养分的释放无显著影响,但秸秆碳的释放显著增加.不同生育期,玉米秸秆碳的释放与干物质分解变化趋势一致,C/N 逐渐下降.种植一季小麦后,秸秆干物质累计腐解率不足 50%;秸秆碳释放率为 47.9%~51.1%,不施氮和施氮处理的秸秆 C/N 分别由 32.2 降低到 20.2 和 17.9.小麦收获时,秸秆氮、磷、钾均为净释放,氮释放量为 7.2~9.4 kg·hm⁻²,占秸秆氮的 12.7%~16.6%;磷释放量为 1.29~1.44 kg·hm⁻²,占 29.0%~32.4%;钾的释放量大、释放快,越冬前超过 80%,成熟时释放量为 51.8~52.5 kg·hm⁻²,占 90.5%~91.7%.在秸秆还田条件下,应考虑秸秆归还的钾,减少小麦钾肥用量,适量补充氮、磷.

关键词 冬小麦; 轮作; 玉米秸秆; 碳; 氮、磷、钾; 腐解

Effects of nitrogen application on decomposition and nutrient release of returned maize straw in Guanzhong Plain, Northwest China. HUANG Ting-miao¹, WANG Zhao-hui^{1,2}, HOU Yang-yi¹, GU Chi-ming¹, LI Xiao¹, ZHENG Xian-feng^{1*} (¹Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture/College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Area, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: With ¹⁵N isotope labeled maize straw in nylon net bags and buried in the wheat field at two N rates of 0 and 200 kg N·hm⁻², the effects of nitrogen application on the decomposition of straw dry matter and the release dynamics of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium (C, N, P and K) after maize straw retention were investigated in the winter wheat-summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Shaanxi, China. Results showed that N application did not affect the decomposition of the returned straw C and dry matter, but promoted the release of P and inhibited the release of N and K from straw during sowing to wintering periods of winter wheat. From the grain filling to the harvest of winter wheat, the decomposition of the returned straw and the release of N, P and K were not affected, but the release of straw C was significantly enhanced by N application. The release dynamic of straw C was synchronized with the decomposition of the dry matter, and the C/N of straw declined gradually with the extension of wheat growing. Until the harvest of winter wheat, the accumulative decomposition rate of straw dry matter was less than 50%, and the total straw C release rate was around 47.9% to 51.1%. The C/N ratio of the returned straw was decreased from 32.2 to 20.2 and 17.9, respectively at N rates of 0 and 200 kg N·hm⁻². From sowing to har-

本文由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(201303104, 201503124)、农业科研杰出人才及其创新团队培养计划项目和国家科技支撑计划项目(2015BAD23B04)资助 This work was supported by the China Agricultural Research System (CARS-3-1-31), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201303104, 201503124), the Agricultural Scientific Research Talent and Team Program, and the National Key Science and Technology Support Program of China (2015BAD23B04).

2016-11-14 Received, 2017-03-29 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengxf@nwsuaf.edu.cn

vest of winter wheat, the net release of N, P and K from the straw was observed. The N release was $7.2\text{--}9.4\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $12.7\%\text{--}16.6\%$ of the total straw N, and the P release was $1.29\text{--}1.44\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $29.0\%\text{--}32.4\%$ of the total straw P, while a great deal of K was released quickly, with approximately 80% of the straw K released before wintering, $51.8\text{--}52.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $90.5\%\text{--}91.7\%$ of the total straw K released at wheat harvest. It was suggested that the K fertilizer application should be decreased for the winter wheat due to the great amount K release from the returned maize straw, and an extra amount of N and P fertilizer should be applied under the straw retention cropping system.

Key words: winter wheat; rotation; maize straw; C; N, P, K; decomposition.

秸秆还田作为农业可持续发展和土壤耕地质量提升的重要措施之一,在近些年来的研究中越来越受到重视。目前,关于秸秆还田下作物产量的研究已有较多报道,Huang 等^[1]对我国的水稻研究进行总结发现,与不还田相比,秸秆还田平均增产 5.2%。也有研究报道,在一定范围内,随着氮肥用量增加,秸秆还田的小麦籽粒产量显著增加^[2-3];同时,秸秆还田后配施钾肥有更明显的增产效果^[4]。可见,要维持秸秆还田条件下作物的增产潜力,需增加养分供应。

秸秆是一种重要的养分资源,还田后在土壤微生物作用下逐渐腐烂分解,释放出供下季作物生长所需的营养元素。大量研究表明,长期秸秆还田可提高耕层土壤养分含量^[5-6],并可藏碳于土,增加土壤碳库储量^[7],即使短期内也发现秸秆还田有提高土壤肥力的趋势^[8],究其原因,一方面可能源于秸秆自身养分的释放,另一方面,也可能是新鲜有机物的加入,促进了土壤原有有机养分的矿化。对于前者,目前多采用尼龙网袋埋法,网袋内外的水分状况相近,而且可定量反映秸秆腐解程度。然而,由于根系和部分土壤动物不能及时穿过网袋分解秸秆,与实际相比,该方法测得的秸秆腐解速率可能偏低,但仍为目前研究秸秆腐解的主要方法^[9]。用网袋法对安徽不同水稻栽培模式的研究表明,节水灌溉栽培的水稻秸秆累计腐解率比常规栽培增加了 $17.3\%\text{--}18.5\%$,C、N、P 等养分也有不同程度的增加^[10]。同时,秸秆化学组分(如 C/N、木质素含量等)不同造成的微生物活性差异,也会影响腐解进程^[11]。在农业生产中,氮肥可增加作物产量,也可调节土壤 C/N,改变微生物生物量和活性,那么施氮是否会促进秸秆腐解呢?在一年两熟的关中冬小麦-夏玉米轮作区还未见报道。随着机械化程度的不断提高,玉米收获后,直接粉碎翻压还田正逐步成为该区作物秸秆管理的主要方式,前后两季作物之间的间隔时间缩短,玉米秸秆在小麦生长季腐解并释放出氮、磷、钾等养分,但因自身 C/N 较高,还田后易使微生物

在分解秸秆时与小麦“争氮”,造成土壤氮素暂时亏缺。因此,秸秆的腐解既是养分逐渐释放的过程,又是自身 C/N 不断变化和影响土壤养分供应的过程。

本试验在陕西关中平原采用尼龙网袋^[12]田间填埋与¹⁵N 同位素标记秸秆相结合的方法,设置不施氮和施氮 $200\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个处理,研究了施氮对玉米秸秆腐解的影响,以及腐解过程中秸秆碳、氮、磷、钾养分的释放情况,为该区秸秆还田条件下的土壤培肥和小麦养分管理提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2012—2013 年在陕西省周至县终南镇王才屯村($34^{\circ}07'20''\text{N}$, $108^{\circ}22'4''\text{E}$)进行,该地位于关中平原,属半湿润易旱气候,平均海拔 524 m,年均气温 13°C ,降水量 674 mm,且主要集中在 7—9 月,无霜期 225 d。主要的粮食作物种植制度为冬小麦-夏玉米轮作,一年两熟。受秦岭北麓冲积物堆积和渭河下切的影响,该区属下湿地^[13],地下水埋藏浅、补充量充足,10 m 内有水的地区较为广泛^[14],当地农田管理中不灌水,作物生长主要依赖地下水和自然降水。试验期间,小麦播种至越冬、越冬至返青、返青至拔节、拔节至灌浆以及灌浆至成熟期的降水量分别为 5.9、24.6、4.0、16.8 和 175.7 mm。试验前 0~20 cm 耕层土壤的基本理化性状为:有机质 $18.8\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.38\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,矿质氮 $22.1\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $75.5\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $167\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 7.28,容重 $1.21\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,砂粒 27%,粉粒 64%,黏粒 9%。还田玉米秸秆的初始养分含量为:总有机碳 $369.7\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $11.45\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.9\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $11.59\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

田间小麦于 2012 年 10 月播种,磷、钾肥作为基肥在小麦播前一次施入,用量分别为 $100\text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $75\text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同时,设置不施氮肥和当

地常规施氮量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 两个处理,随机区组排列,重复4次.供试肥料分别为尿素、重过磷酸钙和氯化钾.在各处理小麦行间设置微区,面积约为 0.53 m^2 , 填埋装有 ^{15}N 标记玉米秸秆的尼龙网袋21个.其中, ^{15}N 标记玉米秸秆的丰度为 3.00% .

^{15}N 标记玉米秸秆的制作:在试验区以外选择长势均匀的玉米,于拔节期施入 ^{15}N 丰度为 10.18% 的尿素(购于上海化工研究院),收获时采集植株地上部分,即为 ^{15}N 标记的玉米秸秆.

尼龙网袋法的具体操作步骤:将采集的玉米地上部去除尘土等,风干,将其分为茎秆、叶片、叶鞘、雄花4部分,称量后分别剪碎混匀(叶片约 1.0 cm^2 , 茎秆长约 1.0 cm),各取 $30\sim 50\text{ g}$,于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量后称量,计算秸秆各部位质量.再按各器官占原玉米植株比例分别称取风干的茎秆、叶片、叶鞘和雄花4部分,共 5.00 g ,充分混合后,装入 $9\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、300目的尼龙网袋中,用封口机封好,埋入小麦行间,埋深 10 cm .田间填埋时,将小麦行间 20 cm 深的土壤全部取出,破碎土块.不施氮小区中,称量一半数量的土壤回填至 10 cm 厚,然后水平铺放尼龙网袋,再将剩余土壤全部填回,压实至与地面齐平;施氮处理中,先将土壤与尿素充分混匀,再按同样的方法埋入网袋.

1.3 样品采集与测定

在小麦苗期(2012年11月11日)、分蘖期(11月21日)、越冬前(12月12日)、返青期(2013年3月11日)、拔节期(3月31日)、灌浆初期(5月2日)和成熟期(5月27日)分别采集埋于土壤中的网袋,各小区每次取样均为3个重复,采回的样品去除网袋表面泥土和根系杂物,于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量,粉碎后,测定埋入田间前及网袋中剩余秸秆的干物质质量、总有机碳、全氮、全磷、全钾含量以及 ^{15}N 丰度.用有机碳分析仪(岛津,日本)测定秸秆有机碳含量;用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,AA3连续流动分析仪测定消煮液中的氮、磷含量;火焰光度计测定钾含量;腐解样品的 ^{15}N 丰度用上海化工研究院 MAT-271 气体同位素质谱计测定.干物质残留量以 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干后的干物质质量表示.

1.4 数据处理

还田后不同时期秸秆中总养分和秸秆自身氮残留量的计算公式如下:

秸秆中总碳(全氮、全磷、全钾)残留量 $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) = \text{秸秆残留量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \times \text{秸秆总碳(全氮、全磷、全钾)含量}(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})/1000$

秸秆自身氮的残留量 $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) = \text{秸秆中残留的}^{15}\text{N}\text{ 总量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})/\text{秸秆初始}^{15}\text{N}\text{ 原子百分超}$

秸秆自身氮含量 $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}) = \text{秸秆自身氮残留量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \times 1000/\text{秸秆残留量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$

运用 Excel 2007 进行数据处理, SAS 8.1 软件进行统计分析,多重比较采用 LSD 法,差异显著性水平为 $\alpha = 0.05$,作图工具为 SigmaPlot 12.5.

2 结果与分析

2.1 还田秸秆的干物质残留量和 C/N 变化

分析还田玉米秸秆的干物质残留量(图1)发现,小麦生长季秸秆逐渐分解,残留量随时间而降低,除越冬和返青期外,施氮对田间秸秆的腐解没有显著影响.从播种到越冬前,秸秆腐解较快,施氮和不施氮处理的秸秆腐解量分别为 1237 和 $1141\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,腐解率为 25.0% 和 23.1% .此后至返青期,秸秆继续腐解,但速率减慢,两处理的秸秆腐解量分别为 554 和 $719\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分解率为 11.2% 和

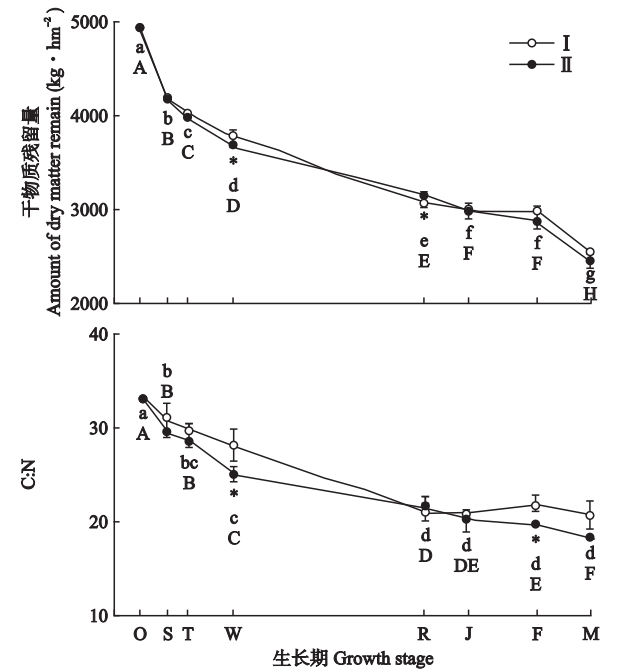


图1 还田玉米秸秆干物质残留量和碳氮比变化
Fig.1 Changes of residual dry matter and C/N of returned maize straw.

I: $0\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$; II: $200\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$. O: 初始值 Original value; S: 苗期 Seedling stage; T: 分蘖期 Tillering stage; W: 越冬期 Wintering stage; R: 返青期 Reviving stage; J: 拔节期 Jointing stage; F: 灌浆期 Filling stage; M: 成熟期 Maturity stage. 不同小写字母表示不施氮肥时不同时期差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示施氮时不同时期差异显著 ($P<0.05$). Different small and capital letters indicated significant difference among different stages at 0 and $200\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ at 0.05 level, respectively. * 表示同一时期不施氮和施氮处理间差异显著 ($P<0.05$). * indicated significant difference among 0 and $200\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ at the same stage at 0.05 level. 下同 The same below.

14.5%.返青至灌浆初期,腐解量仅为 244 和 89 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.灌浆至成熟期,腐解速率加快,施氮的秸秆腐解量为 437 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不施氮的为 419 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.小麦生长季结束时,施氮与不施氮条件下,残留在田间未腐解的玉米秸秆分别为 2469 和 2574 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,秸秆累计腐解率为 49.7%和 47.6%,腐解量为 2367 和 2472 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,两处理间差异不显著.

整体来看,随小麦生育期推进,还田秸秆的 C/N 不断降低(图 1),施氮处理的 C/N 下降速率高于不施氮处理.返青期,施氮的秸秆 C/N 与不施氮处理差异不显著,其余时期,不施氮的玉米秸秆 C/N 均不同程度高于施氮处理,尤其在越冬和灌浆初期,分别高 10.9%和 9.3%,差异显著.从动态变化来看,不施氮时,秸秆 C/N 从试验开始的 32.2 降低到小麦成熟时的 20.2,施氮处理降至 17.9,两处理分别降低 37.4%和 44.6%.可见,玉米秸秆的分解也是秸秆 C/N 不断下降的过程.

2.2 还田秸秆中碳残留量和碳含量的变化

还田秸秆总碳残留量的分析结果表明(图 2),小麦不同生育期还田玉米秸秆碳不断释放,成熟期,施氮处理秸秆碳残留明显少于对照.从播种至灌浆期,施氮和不施氮处理秸秆向土壤释放的碳分别为 759 和 739 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,释放率为 41.5%和 40.4%.灌浆至成熟期,秸秆碳残留量继续降低,不施氮时,降

至 952 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于施氮处理的 894 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.种植一季小麦后,两处理秸秆碳的释放率分别为 47.9%和 51.1%,释放量分别为 875 和 933 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

秸秆碳含量在小麦整个生长过程中呈现波动式变化(图 2).不施氮处理的秸秆碳含量变化介于 364~380 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,施氮处理介于 357~376 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,与试验开始时相比,变幅分别为 -1.7%~2.7%和 -3.6%~1.6%.小麦收获时,施氮和不施氮处理的秸秆含碳量分别为 357 和 370 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,仅比试验开始时降低 3.6%和 0%,两者间差异显著.

2.3 还田秸秆中氮残留量和氮含量的变化

随小麦生育期推进,秸秆自身氮的残留量逐渐降低,而秸秆总氮残留量呈先下降再上升、之后逐渐降低的趋势.不同生育时期,秸秆自身氮残留均低于秸秆总氮(图 2).除拔节期外,施氮处理的秸秆自身氮和秸秆总氮残留量均不同程度高于不施氮处理.从动态变化来看,试验开始到越冬前,不施氮和施氮处理的秸秆自身氮残留量分别降低 22.7%和 18.2%,总氮残留量分别降低 9.0%和 5.8%.此后至返青期,施氮处理的秸秆自身氮和秸秆总氮残留量变化不明显.到小麦成熟时,不施氮和施氮处理的秸秆自身氮残留量分别降至36.8和38.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,总

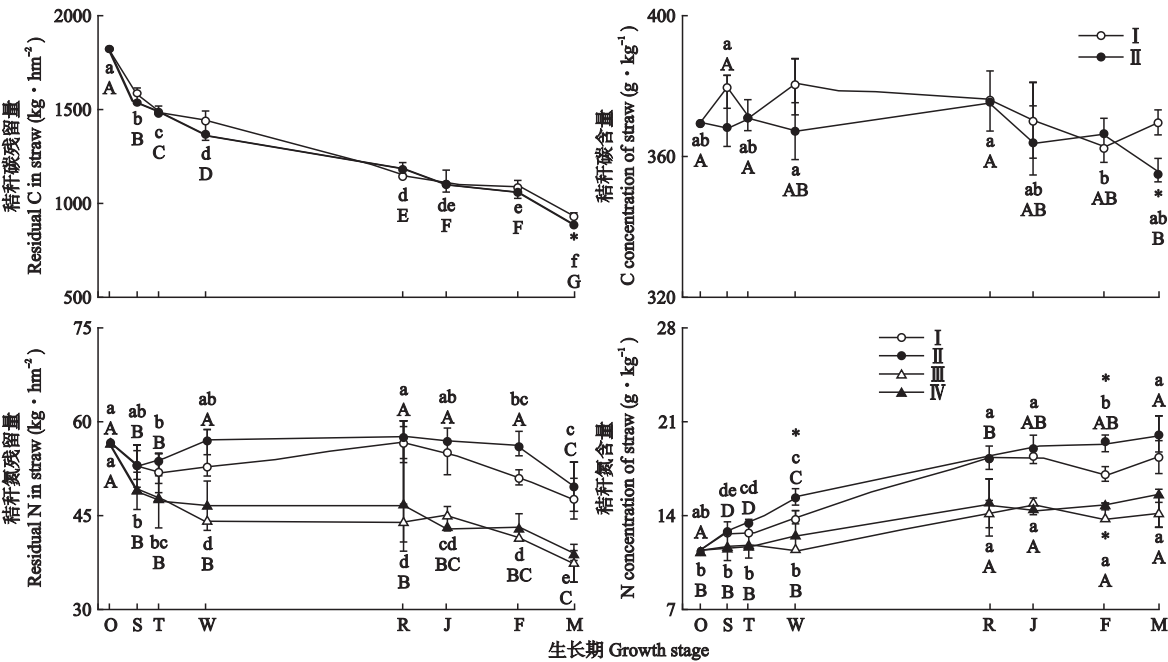


图 2 还田玉米秸秆碳、氮残留量和碳、氮含量的变化
Fig.2 Changes of residual C, N and C, N contents of returned maize straw.

Ⅲ: 不施氮肥的秸秆自身氮 Straw N with 0 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ application; Ⅳ: 施氮 200 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的秸秆自身氮 Straw N with 200 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ application.

氮量降至 47.2 和 49.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 分别比开始时降低 34.9% 和 32.3% 及 16.6% 和 12.7%。可见, 秸秆腐解期间, 在自身氮素逐渐释放的同时, 也会吸收土壤氮和施入土壤的肥料氮。但从小麦整个生长期来看, 不施氮和施氮处理的秸秆自身氮释放量分别为 19.7 和 18.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 秸秆总氮减少量分别为 9.4 和 7.2 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 两处理间差异均不显著。

与氮素残留类似, 秸秆全氮含量也高于秸秆自身氮(图 2), 小麦整个生育期内两者均呈递增趋势。施氮 200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 秸秆自身氮含量由试验开始时的 11.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到小麦收获时的 15.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秸秆全氮含量增加到 20.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别增加了 36.0% 和 75.4%。不施氮肥时, 秸秆自身氮含量增加到拔节期的 14.8 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 到返青期有下降趋势, 并且明显低于施氮处理, 成熟期其含量为 14.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比开始时增加了 25.0%。秸秆全氮含量与秸秆自身氮的规律一致, 由刚埋入田间的 11.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到小麦收获时的 18.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加了 60.2%。

2.4 还田秸秆中磷残留量和磷含量的变化

还田秸秆的全磷残留量亦随时间延长而降低(图 3)。除灌浆、成熟期, 施氮的磷残留量略高于不施氮处理, 其余时期均低于不施氮肥处理, 冬季分蘖时两者差异显著, 降幅为 32.2%。整体看, 秸秆磷释放主要发生在播种至出苗和拔节至成熟两个时期, 播种至出苗时, 施氮与不施氮处理的磷释放量分别为

0.7 和 0.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 拔节至成熟期, 分别为 0.3 和 0.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在一个小麦生长季结束时, 施氮和不施氮处理秸秆磷的释放率分别为 29.0% 和 32.4%, 但因秸秆初始全磷量较低, 秸秆向土壤释放磷的数量有限, 仅为 1.44 和 1.29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

小麦不同生育期内, 秸秆含磷量呈逐渐增加趋势, 但与磷残留量不同, 施氮对秸秆磷含量没有显著影响(图 3)。施氮时, 从开始的 0.90 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至小麦收获时的 1.24 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 不施氮时, 播种至拔节期的秸秆含磷量持续增加到 1.28 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后, 开始下降, 灌浆到成熟期又增至 1.17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。至小麦成熟期, 施氮与不施氮处理的秸秆含磷量比还田初始时分别增加了 29.8% 和 38.1%。

2.5 还田秸秆中钾残留量和钾含量的变化

小麦生长期间, 还田秸秆的钾残留量与钾含量的变化规律一致(图 3), 均随生长期推进迅速降低。苗期, 施氮的秸秆钾残留量和含钾量显著高于不施氮处理, 分别高 22.5% 和 22.6%, 其余时期无明显差异。从小麦整个生长期来看, 还田秸秆钾的释放和秸秆钾含量的降低主要发生在越冬前, 越冬后变化较小。从播种至越冬, 两处理还田秸秆的钾残留量分别由 57.3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 迅速降低到 9.6 和 9.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 钾的释放率分别达到 83.2% 和 83.4%, 残留秸秆的钾含量也由 11.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 2.6 和 2.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低了 77.7% 和 78.4%; 越冬至成熟期, 施氮和不施氮

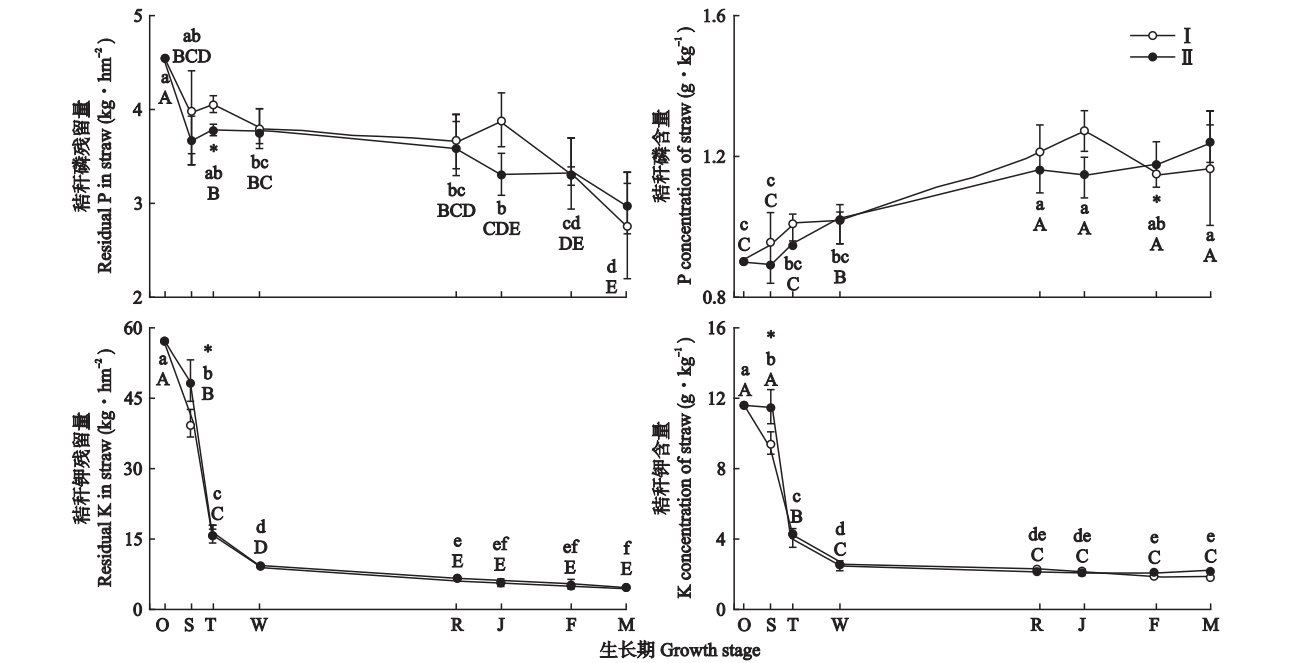


图 3 还田玉米秸秆磷、钾残留量和磷、钾含量变化
Fig.3 Changes of residual P, K and P, K contents of returned maize straw.

处理的秸秆向土壤释放的钾量分别为 4.2 和 4.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 含钾量仅降低了 0.4 和 0.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 小麦收获时, 两处理累计释放的钾分别为 51.8 和 52.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 释放率为 90.5% 和 91.7%, 秸秆钾含量也分别降低了 81.5% 和 84.2%. 可见, 大量钾素在玉米秸秆还田初期即迅速释放, 增加土壤钾素含量, 以供小麦吸收利用.

3 讨 论

3.1 小麦生长季还田玉米秸秆的腐解

作物秸秆归还土壤后伴随着复杂的微生物分解过程. 网袋法研究表明, 小麦收获时, 施氮对玉米秸秆腐解没有显著影响, 与河北曲周的研究结果相似^[15]. 但也有氮肥促进秸秆分解的报道^[16], 可能主要由于秸秆腐解受土壤有效氮含量的影响, 有效氮含量低时促进腐解, 相反则抑制或无明显作用^[17]. 就秸秆腐解动态来看, 呈现出“快-慢-快”的规律, 因为秸秆还田初期, 微生物优先分解秸秆中的可溶性有机物, 如多糖、氨基酸、有机酸等; 新鲜秸秆也为微生物提供了丰富的能源和养分, 微生物活性和数量增加, 促进了玉米秸秆腐解. 越冬后, 气温骤降, 土壤温度降低, 微生物活性减弱, 因此腐解速率降低, 而细菌数量的缓慢增加^[18]仍使秸秆继续分解. 返青至灌浆期, 气温升高, 但田间降水量仅为 20.8 mm, 有限的降水及较高的蒸发导致耕层土壤水分相对缺乏, 限制秸秆腐解. 灌浆到成熟期的田间降水量达到 175.7 mm, 适宜的土壤湿度为微生物活动创造了有利的条件^[19], 腐解速率加快. 戴志刚等^[20]对水稻、油菜和小麦秸秆的培养试验发现, 秸秆腐解经历快速腐解期、腐解减缓期和腐解停滞期, 与本研究不同, 说明作物秸秆的腐解过程受田间条件影响较大. 小麦收获时, 秸秆累计腐解率不足 50%, 研究采用网袋法, 秸秆平铺于 10 cm 土层处, 与实际生产中粉碎的秸秆、土壤和肥料充分混合存在差异, 所以, 这一数值可能因尼龙网袋的存在在一定程度上降低了秸秆与土壤的接触而被低估^[21]. 陕西田间砂滤管法的研究发现, 240 d 后, 玉米秸秆的累计腐解率达到 73%~81%^[22]; 山东龙口的网袋法研究表明, 小麦成熟时翻耕还田的玉米秸秆腐解率为 59%~61%^[23], 数值较高; 主要由于本试验区作物生育期不灌水, 返青至灌浆期, 较低的耕层土壤水分及小麦生长的水分需求导致秸秆腐解较少. 因此, 小麦生长季玉米秸秆的腐解受温度、降水等气候因子及田间管理方式

的影响^[24].

3.2 小麦生长季还田玉米秸秆的碳、氮变化

秸秆还田对土壤碳、氮有重要影响, 随腐解释放出的秸秆碳, 或参与土壤有机物的合成, 或在微生物作用下分解为 CO_2 气体排出^[25]. 试验结束时, 秸秆碳的释放率为 47.9%~51.1%, 施用氮肥的碳累计释放量显著高于不施氮处理, 主要因为灌浆至成熟期, 土壤温度、湿度等不再是秸秆腐解的限制因子, 充足的氮肥可以补充微生物合成和活动的氮素营养, 促进秸秆碳的释放. 不施氮肥的微生物作用相对较弱^[26], 秸秆碳的释放降低. 小麦生长过程中, 秸秆碳的释放动态与干物质分解变化趋势基本一致, 意大利沼泽地的不同作物秸秆^[27]、苏丹干旱地区小麦秸秆腐解^[16]的研究也有类似报道.

^{15}N 示踪技术研究表明, 小麦不同生育期秸秆总氮的残留量高于秸秆自身氮, 由于秸秆还田后有机氮被矿化分解的同时, 也伴随着微生物利用土壤中的氮素满足自身合成, 以及土壤有机氮的矿化、肥料氮的固定等一系列复杂过程的交互作用, 导致源于土壤、肥料的氮素进入秸秆^[28], 小麦生长后期这些氮素再缓慢释放, 或被吸附在逐渐疏松的秸秆组织中^[29], 因网袋隔离暂时未进入土壤. 同样, 田间小麦、水稻秸秆的腐解过程中, 也有秸秆残留氮量增加的现象^[30]. 本研究中, 小麦收获时, 秸秆自身氮的释放率为 32.3%~34.9%, 而秸秆总氮的减少量仅为 12.7%~16.6%, 低于其他地区的研究结果^[31-32], 可能与秸秆初始含氮量、土壤环境条件等存在差异有关. 在作物生产系统中, 土壤供氮与小麦生长氮需求的同步性可以提高氮素利用, 降低淋溶和气态损失. 小麦氮吸收的两个高峰期分别为分蘖期和拔节期, 尤其以拔节至孕穗期的吸收量最大^[33], 试验条件下, 无论施氮与否, 秸秆总氮的释放与冬小麦氮吸收并不吻合, 所以, 生产中应结合土壤有效氮库的变化适时补充氮源, 保障作物正常生长. 另外, 种植一季小麦后, 仍有 65% 以上 ($36.8 \sim 38.3 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的氮残留于秸秆中, 这些氮素在下季作物生长期如何变化? 还有待进一步研究.

有机物 C/N 是影响微生物活性和秸秆腐解的重要因子. 因施肥、耕作等田间管理方式不同, 秸秆初始养分含量存在差异, 还田后有机碳、氮的矿化能力不同, 因此, 目前关于秸秆腐解过程中 C/N 的变化报道不尽相同^[34-35]. 本试验秸秆碳含量虽上下波动却保持相对稳定, 而总氮含量则持续上升, 是玉米

秸秆 C/N 由 32.3 下降到 17.9~20.2 的直接原因。

3.3 小麦生长季还田玉米秸秆的磷、钾变化

秸秆腐解释放的磷、钾可提高土壤供肥能力。本研究中, 一个小麦季后, 秸秆中全磷的释放率为 29.0%~32.4%。Villegas-Pangga 等^[34] 在秸秆初始含磷量不同的培养试验中发现, 42 d 后, 水稻秸秆磷的释放率为 10.5%~46.9%; 安徽稻田 90 d 的腐解试验表明, 小麦秸秆全磷的累积释放率高于 60%^[36]。可见, 不同类型秸秆的磷释放率变幅较大。虽然小麦拔节期后, 还田玉米秸秆的磷释放与小麦吸磷高峰同步, 然而秸秆总磷量较低, 且秸秆腐解归还的磷远低于小麦生长的需磷量, 因此, 在推荐施肥过程中, 即使采用秸秆还田, 也应根据土壤供磷能力保障磷肥用量, 避免生长后期小麦缺磷。另外, 秸秆养分含量的变化也反映了干物质腐解与养分释放的相对快慢。还田玉米秸秆含磷量在小麦生长季节不断增加, 说明秸秆磷的矿化速率小于干物质分解, 大量磷还残留在田间未分解的玉米秸秆中, 这与试验区域的室内模拟研究结果一致^[37]。与磷不同, 秸秆中钾的释放快、释放大。这主要是因为钾在植物组织中以离子形态存在, 还田后极易溶于土壤水。试验中, 越冬前秸秆钾的释放率超过 80%, 大约 50 kg·hm⁻² 的钾进入土壤, 折合成肥料, 相当于 60 kg K₂O·hm⁻²。受气候、成土母质等条件的综合影响, 西北地区土壤有效钾含量普遍在 150 mg·kg⁻¹ 以上^[38], 供钾能力较高, 但有研究表明, 长期秸秆还田不施钾也会造成小麦减产^[39-40]。因此, 秸秆还田后可根据秸秆钾素释放情况, 适当减少钾肥用量, 或推迟钾肥施用时期, 同时考虑小麦需钾量, 避免土壤钾素的耗竭。

参考文献

- [1] Huang S, Zeng Y, Wu J, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2013, **154**: 188-194
- [2] Brennan J, Hackett R, McCabe T, *et al.* The effect of tillage system and residue management on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat in a cool Atlantic climate. *European Journal of Agronomy*, 2014, **54**: 61-69
- [3] Zhao P (赵 鹏), Chen F (陈 阜). Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(6): 1014-1018 (in Chinese)
- [4] Wang Z-Y (王志勇), Bai Y-L (白由路), Yang L-P (杨俐苹), *et al.* Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**

- (4): 900-906 (in Chinese)
- [5] Tang W-G (汤文光), Xiao X-P (肖小平), Tang H-M (唐海明), *et al.* Effects of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(1): 168-176 (in Chinese)
- [6] Tian S-Z (田慎重), Ning T-Y (宁堂原), Wang Y (王 瑜), *et al.* Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 373-378 (in Chinese)
- [7] Palm C, Blanco-Canqui H, DeClerck F, *et al.* Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **187**: 87-105
- [8] Soon YK, Lupwayi NZ. Straw management in a cold semi-arid region: Impact on soil quality and crop productivity. *Field Crops Research*, 2012, **139**: 39-46
- [9] Lin X-X (林心雄), Wu S-L (吴顺龄), Che Y-P (车玉萍). The study of nylon mesh bag method to measure the decomposition rate of organic matter in arid and semi-arid region. *Soils* (土壤), 1992, **24**(6): 315-318 (in Chinese)
- [10] Wu J (武 际), Guo X-S (郭熙盛), Wang Y-Q (王允青), *et al.* Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(16): 3351-3360 (in Chinese)
- [11] Raiesi F. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, **112**: 13-20
- [12] Bockock KL, Gilbert OJW. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. *Plant and Soil*, 1957, **9**: 179-185
- [13] Liu R (刘 瑞), Dai X-L (戴相林), Zhou J-B (周建斌), *et al.* Relationship between accumulated nitrate nitrogen in soil profiles and apparent nitrogen budget in winter wheat fields under nitrogen fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(6): 1335-1341 (in Chinese)
- [14] Guo Y-S (郭永社). Agriculture in Zhouzhi County [EB/OL]. (2016-05-03) [2016-12-29]. <http://www.sxny.gov.cn/templet/zhoushi/showarticle.jsp?id=245427> (in Chinese)
- [15] Ma Y-L (马永良), Yu Z-R (宇振荣), Jiang Y-H (江永红), *et al.* Comparison of decomposition rates of maize straw between two kinds of straw incorporation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **21**(6): 68-70 (in Chinese)
- [16] Rezig FAM, Elhadi EA, Abdalla MR. Decomposition and nutrient release pattern of wheat (*Triticum aestivum*) residues under different treatments in desert field conditions of Sudan. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2014, **3**: 69-77
- [17] Thirukkumaran CM, Parkinson D. Microbial activity, nutrient dynamics and litter decomposition in a Canadian Rocky Mountain pine forest as affected by N and P fertilizers. *Forest Ecology and Management*, 2002, **159**: 187-201
- [18] Ji X-J (姬兴杰), Yang Y-Y (杨颖颖), Xiong S-P (熊淑萍), *et al.* Effect of different fertilization on spatio temporal variability of soil microorganism and total N.

- Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2008, **16**(3): 576–582 (in Chinese)
- [19] Wang X, Sun B, Mao J, *et al.* Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**: 7159–7165
- [20] Dai Z-G (戴志刚), Lu J-W (鲁剑巍), Li X-K (李小坤), *et al.* Nutrient release characteristics of different crops straws manure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(6): 272–276 (in Chinese)
- [21] Vanlauwe B, Sanginga N, Merckx R. Decomposition of four *Leucaena* and senna prunings in alley cropping systems under sub-humid tropical conditions: The process and its modifiers. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**: 131–137
- [22] 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)
- [23] Jiang X-D (江晓东), Chi S-Y (迟淑筠), Wang Y (王芸), *et al.* Effect of less tillage and no-tillage patterns on decomposition of returned maize straw in wheat/maize system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(10): 247–251 (in Chinese)
- [24] Wang J-Z (王金洲), Lu C-A (卢昌艾), Zhang W-J (张文菊), *et al.* Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2016, **53**(1): 12–23 (in Chinese)
- [25] Williams MA, Myrold DD, Bottomley PJ. Distribution and fate of ^{13}C -labeled root and straw residues from ryegrass and crimson clover in soil under western Oregon field conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **42**: 523–531
- [26] Xia X (夏雪), Gu J (谷洁), Che S-G (车升国), *et al.* Effects of nitrogen application rates on microbial community and enzyme activities in lou soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(8): 1618–1627 (in Chinese)
- [27] Bragazza L, Siffi C, Iacumin P, *et al.* Mass loss and nutrient release during litter decay in peatland: The role of microbial adaptability to litter chemistry. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 257–267
- [28] Huang T-M (黄婷苗), Zheng X-F (郑险峰), Wang Z-H (王朝辉). Nitrogen release of returned maize straw and its effects on loess N supply and nitrogen uptake by winter wheat in Guanzhong Plain. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2015, **48**(14): 2785–2795 (in Chinese)
- [29] Dresboll DB, Magid J. Structural changes of plant residues during decomposition in a compost environment. *Bioresource Technology*, 2006, **97**: 973–981
- [30] Liu S-P (刘世平), Chen W-L (陈文林), Nie X-T (聂新涛), *et al.* Effect of embedding depth on decomposition course of crop residues in rice-wheat system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **16**(6): 1049–1053 (in Chinese)
- [31] Partey ST, Preziosi RF, Robson GD. Maize residue interaction with high quality organic materials: Effects on decomposition and nutrient release dynamics. *Agricultural Research*, 2013, **2**: 58–67
- [32] Sun Z (孙哲), Bi J (毕军), Xia G-L (夏光利), *et al.* Study of characteristic of nutrient releasing of maize straw with two tillage methods. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2014, **30**(9): 133–136 (in Chinese)
- [33] Wu G-L (吴国梁), Cui X-Z (崔秀珍). Study on nutrient mechanism of NPK fertilizer and its absorbed law of winter wheat with high yield. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2000, **16**(2): 8–11 (in Chinese)
- [34] Villegas-Pangga G, Blair G, Lefroy R. Measurement of decomposition and associated nutrient release from straw of different rice varieties using a perfusion system. *Plant and Soil*, 2000, **223**: 1–11
- [35] Xiao M, Dong S, Li Z, *et al.* Effects of water management practices on residue decomposition and degradation of Cry1Ac protein from crop-wild *Bt* rice hybrids and parental lines during winter fallow season. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 275–289
- [36] Wu J (武际), Guo X-S (郭熙盛), Lu J-W (鲁剑巍), *et al.* Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(2): 565–575 (in Chinese)
- [37] Ding T-T (丁婷婷). The Decomposition Process of Crop Straw and Its Effects on Soil Organic Carbon and Nutrient. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2015 (in Chinese)
- [38] Yang Z-M (杨振明), Zhou W-Z (周文佐), Bao S-D (鲍士旦), *et al.* Comprehensive evaluation on potassium supplying potential of main soils in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1999, **36**(3): 377–385 (in Chinese)
- [39] Tan D-S (谭德水), Jin J-Y (金继运), Huang S-W (黄绍文). Effects of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(5): 886–893 (in Chinese)
- [40] Wang H-T (王宏庭), Jin J-Y (金继运), Wang B (王斌), *et al.* Effects of long-term potassium application and wheat straw return to Cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(4): 801–808 (in Chinese)

作者简介 黄婷苗,女,1990年生,博士研究生.主要从事小麦营养与调控研究. E-mail: 18710723665@163.com

责任编辑 张凤丽