

长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响

赵士诚¹, 曹彩云², 李科江², 仇少君¹, 周卫¹, 何萍^{1,3,4*}

(1 农业部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北衡水 053000; 3 中国农业科学院-国际植物营养研究所植物营养联合创新实验室, 北京 100081; 4 国际植物营养研究所北京办事处, 北京 100081)

摘要:【目的】近年, 华北小麦-玉米轮作系统秸秆全量还田已逐步普及, 但秸秆还田下土壤氮库组成的变化并不清楚。本文利用肥料定位试验, 研究了长期秸秆还田(32年)对华北潮土肥力、氮库组分和作物产量的影响。【方法】研究选用河北省衡水旱作试验站长期定位试验的不施肥(对照 CK)和等量氮、磷肥用量下的 0 kg/hm² (S0)、2250 kg/hm² (S1)、4500 kg/hm² (S2) 和 9000 kg/hm² (S3) 秸秆还田处理。于 2012 年小麦收获后采集各处理 0—20 cm 土样, 利用新鲜土样测定微生物量氮、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N; 风干土壤用常规方法测定氮磷钾全养分、有机质和 pH, 用 Bremner 法测定有机氮(酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮、氨基糖氮和酸解未知态氮), 用 Silver-Bremner 法测定固定态铵。同时结合长期试验数据, 分析长期秸秆还田下有机质和作物产量的变化。【结果】与试验开始前(1981年)相比, 长期施用化肥处理的土壤全磷和有机质显著增加, 全氮没有明显变化, 而全钾出现降低趋势(-3.2%); 秸秆用量的增加提高了全氮、全磷和有机质, 降低了 pH 值, 但对全钾没有影响。酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮和未知态氮为潮土有机氮的主要组分; 与 CK 相比, 长期施肥提高了土壤有机氮含量, 酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮和氨基糖氮均随秸秆用量的增加而增加, 而不同施肥处理对酸解未知态氮和非酸解氮没有明显影响。长期化肥施用提高了微生物量氮和晶格固定态铵, 秸秆用量的增加进一步提高了微生物量氮, 但降低了固定碳铵。施肥没有明显影响 NH₄⁺-N 含量, 但长期施用化肥提高了 NO₃⁻-N 含量, 且高量秸秆还田对 NO₃⁻-N 含量的提高具有促进作用。施肥显著提高了作物产量, 在施用化肥基础上增施秸秆进一步提高了小麦和玉米产量, 且玉米产量随秸秆用量的增加而增加, 而高量秸秆还田对小麦产量并没有显著影响。【结论】长期化肥(氮、磷肥)和秸秆结合施用提高了土壤肥力(主要为氮、磷), 增加了土壤碳固持, 但仅玉米秸秆还田导致了土壤钾消耗, 增加钾肥投入维持土壤钾平衡是必要的。长期秸秆还田对酸解氨基酸态氮的贡献高于酸解氨态氮; 高量秸秆还田提高了微生物量氮和 NO₃⁻-N 含量, 但降低了固定态铵含量。长期秸秆还田提高了作物产量, 而为保证秸秆还田后茬的作物高产, 与之配套的还田方法和田间管理是很必要的。

关键词: 秸秆还田; 土壤肥力; 氮库; 有机氮; 作物产量

中图分类号: S158; S143; S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2014)06-1441-09

Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China

ZHAO Shi-cheng¹, CAO Cai-yun², LI Ke-jiang², QIU Shao-jun¹, ZHOU Wei¹, HE Ping^{1,3,4*}

(1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China; 3 CAAS-IPNI Joint Laboratory for Plant Nutrition Innovation Research, Beijing 100081, China; 4 International Plant Nutrition Institute (IPNI) Beijing Office, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2013-12-31

接受日期: 2014-05-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(202-1); 国家自然科学基金项目(31272245); 国家重点基础研究发展计划课题(2013CB127404)资助。

作者简介: 赵士诚(1974—), 男, 河南永城人, 博士, 主要从事肥料资源高效利用研究。Tel: 010-82105029, E-mail: sczha@caas.ac.cn

曹彩云与第一作者同等贡献。* 通信作者 Tel: 010-82105638, E-mail: phe@caas.ac.cn

Abstract: [Objectives] Recently, both wheat and maize straws return is widespread in a winter wheat (*Triticum aestivum* L.) – summer maize (*Zea mays* L.) rotation system in North China, but the changes of soil N pool fractions under the straw return are not clear. We studied effects of straw return on soil fertility, N pool fractions and crop yields by a long-term fertilizer experiment. **[Methods]** We chose a no-fertilizer control (CK) and maize straw return at rates of 0 kg/ha (S0), 2250 kg/ha (S1), 4500 kg/ha (S2) and 9000 kg/ha (S3) combined with nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizers from the long-term fertilizer experiment in Hengshui Dryland Farming Experimental Station, Hebei province. Soil samples (0–20 cm) were collected in each plot after wheat harvest in 2012. We determined soil microbial biomass N, NH_4^+ -N and NO_3^- -N with fresh soil samples. With air-dried soil samples, we determined soil total N, total P, total potassium (K), organic matter, and pH using conventional methods, and analyzed soil organic N (hydrolysable amino acid N, amino sugar N, ammonia N and hydrolysable unknown N) and fixed ammonium using the methods of Bremner and Silver-Bremner, respectively. Additionally, the changes of soil organic matter and crop yields were analyzed using the data of the long-term experiment. **[Results]** Compared with the initial nutrient contents (1981), long-term application of chemical fertilizers increases soil total P and organic matter, does not influence soil total N, and decreases soil total K (–3.2%). The increase in straw rates enhances soil total N, total P and organic matter, but decreases soil pH, and does not influence soil total K. The hydrolysable amino acid N, hydrolysable ammonia N and hydrolysable unknown N are mainly fractions of organic N in fluvo-aquic soil. Compared with CK, soil organic N is increased under the long-term fertilization, and the hydrolysable amino acid N, ammonia N and amino sugar N are all increased with the increase of straw rates, while the hydrolysable unknown N and non-hydrolysable N are not changed under different fertilization treatments. The long-term application of chemical fertilizers enhances soil microbial biomass N and fixed ammonium. The increase in straw rates further increases the microbial biomass N, but decreases the fixed ammonium. The fertilization treatments do not affect soil NH_4^+ -N, but the application of chemical fertilizers increases soil NO_3^- -N, and higher rate of straw inputs further increases soil NO_3^- -N. The fertilization increases crop yields, and straw return on the basis of chemical fertilizers further increases crop yields. The maize yields are increased with the increase of straw rates; however, the increase in straw rates does not affect wheat yields. **[Conclusions]** The long-term combined application of chemical fertilizers (N and P) and straw enhances soil fertility (mainly N and P) and quality, and increases soil C sequestration, but only maize straw return leads to serious depletion of soil K, and the increase of K fertilizer inputs is necessary to sustain soil K balance. The effect of the long-term straw return on hydrolysable amino acid N is greater than that on ammonia N, and the higher rates of straw return increase soil microbial biomass N and NO_3^- -N, but decreases fixed ammonium. The long-term straw return enhances crop yields, however, scientific straw return and field management practices are necessary to ensure high crop yields under straw return.

Key words: straw return; soil fertility; N pool; organic N; crop yield

高土壤肥力是作物高产的保证。氮是作物生长必需的矿质营养元素,由于氮肥在土壤中易发生形态转化而损失,氮肥管理一直是农田养分管理研究的重点^[1-3]。土壤氮包括有机态氮和无机态氮,有机态氮主要指存在于未分解或半分解动植物残体和有机质中的氮,是土壤氮素的主要存在形态和主体^[4]。Bremner^[5]用酸解法将土壤有机氮分为酸解氨基酸态氮、酸解氨基糖态氮、酸解氨态氮和酸解未知态氮等形态。大部分有机态氮不能被作物直接吸收,但它们是土壤矿化氮的主要来源^[6],植物吸

收的氮主要来自酸解氨基酸态氮和酸解氨态氮^[7]。土壤微生物是土壤有机氮矿化的动力,同时微生物量氮是高活性有机氮,其矿化速率高于其他有机氮源^[8]。土壤无机氮包括速效氮和矿物固定态氮,水溶性铵、交换性铵和硝态氮是能被作物直接吸收利用的速效氮,而矿物晶格固定态铵则很难被植物直接利用。因此,土壤氮库的形态组成直接影响着土壤氮的保存和供应能力。

化肥氮对当季作物的生长起重要作用,但其当季损失率较高,对土壤培肥贡献不大^[3],且高量化

肥氮可导致土壤 NO_3^- -N 大量积累,增加环境污染风险^[1]。有机肥是土壤有机氮的重要来源,其当季有效性低,但对土壤肥力提升和质量改良起重要作用^[9]。化肥结合有机肥施用既可通过土壤微生物调节矿质氮的固持转化,又可增加有机氮比例以提高土壤肥力^[6,10]。肥料管理措施还影响土壤有机氮组成,如张旭东等^[11]指出施用猪粪能明显增加土壤酸解氨基酸态氮,而肖伟伟等^[12]发现长期施用有机肥(主要为小麦秸秆)和有机无机肥结合均可提高潮土有机氮及其组分(酸解氨基酸态氮和酸解氨基态氮)含量,但他们对氮库其他形态氮的变化并未研究。作物秸秆是重要的有机肥资源之一,我国 2008 年农田产生秸秆总量达 8.1×10^8 吨,这些秸秆能提供氮 7.5×10^6 吨、 P_2O_5 2.3×10^6 吨和 K_2O 1.2×10^7 吨^[13]。随着秸秆还田机械的广泛应用和人们生活水平的提高,我国农田秸秆还田的比例越来越高。以前的研究已明确,秸秆还田可提高土壤肥力^[14-15],但对秸秆还田下土壤氮库组成的变化并不清楚。秸秆在田间的分解及其养分转化较慢,秸秆还田对土壤肥力和作物产量的影响短期内很难表现出来^[16-17],而长期定位试验能较好地反映施肥管理对土壤肥力、养分转化和作物产量的影响^[18-19]。本研究利用肥料定位试验研究长期秸秆还田对土壤肥力、氮库组分和作物产量的影响,以期科学的田间秸秆管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

肥料长期定位试验位于河北省农林科学院旱作农业研究所衡水试验站($37^\circ 53' \text{N}$, $115^\circ 42' \text{E}$),试验建于 1981 年,为冬小麦-夏玉米轮作体系。本地区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.4°C ,年平均降水量约 550 mm,且 70%~80% 的降雨集中在玉米季。供试土壤为壤质底粘潮土,试验开始前耕层土壤(0—20 cm)的基本理化性质为 pH 8.7、有机质 11.5 g/kg、全氮 0.83 g/kg、全磷 1.03 g/kg、全钾 20.31 g/kg、碱解氮 51.3 mg/kg、速效磷 12.3 mg/kg、速效钾 109.8 mg/kg。

试验以化肥用量为主处理,秸秆用量为副处理,共设 16 个处理,小区面积 67 m^2 ,3 次重复,随机区组排列。本研究采用其中的不施肥对照(CK)和氮、磷肥用量为 $\text{N } 360 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 P_2O_5 $240 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的不同秸秆用量处理,分别为不施秸秆(S0)、低量秸秆 $2250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (S1)、中量秸秆 4500

kg/hm^2 (S2)和高量秸秆 $9000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (S3)。小麦和玉米季的氮肥(尿素)用量均为 $\text{N } 180 \text{ kg}/\text{hm}^2$,小麦季氮肥基肥和拔节期追肥比例为 1:1,基肥为撒施后翻耕(1981~2002 年,20~25 cm 深)或旋耕(2002 年以后,10~15 cm 深),追肥为撒施后浇水,灌水量为 60 mm;玉米季氮肥分苗期和大喇叭口期 1:2 施用,均为撒施后浇水,灌水量同小麦季。所有磷肥(过磷酸钙)在小麦播前一次基施,不施钾肥。玉米收获后的秸秆按照试验设计用量粉碎(2004 年前用铡刀切成寸段,2004 后用秸秆还田机粉碎至 3~6 cm 片段)后随肥料混入耕层土壤,小麦收获后秸秆全部移出小区。玉米秸秆养分含量分别为 N 0.42%~0.78%、P 0.35%~0.47%、K 1.7%~2.5%、C 40.0%~44.6%。1981 至 2004 年为每 6 年一个试验周期,前三年按试验方案施肥和秸秆还田,后三年不施肥料和秸秆观察后效,2004 年后每年均按试验设计施用肥料和玉米秸秆。

小麦播种量 $180 \sim 225 \text{ kg}/\text{hm}^2$,玉米种植密度为 $60000 \sim 65000 \text{ plant}/\text{hm}^2$ 。作物采用当地高产品种,其他管理参照高产田管理措施。

1.2 样品采集与分析

在每年的作物成熟期,各小区一半单收计产。2013 年小麦收获后,在 CK、S0、S1、S2 和 S3 处理小区采集 6 个 0—20 cm 土样组成一个混合土壤,一部分新鲜土样用于土壤微生物量氮测定,其余土样风干过筛后用于土壤养分和氮库组分分析。

土壤总氮采用高锰酸钾-铁粉还原凯氏法消煮—自动定氮仪测定;总磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;全钾采用 NaOH 熔融—原子吸收测定;有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤 pH 值用 pH 计测定,水土比 2.5:1^[20]。

土壤有机氮组分分析参照 Bremner^[5]的方法。酸解液制备:称取约含 10 mg 氮的土样(过 0.147 mm 筛)放入水解瓶,加 2 滴正辛醇和 20 mL 6 mol/L HCl 混匀后在电热板上 $120 \pm 3^\circ \text{C}$ 水解 12 h。水解结束后过滤,滤液用 1 mol/L NaOH 调至 pH 值 6.5 ± 0.1 后定容至 100 mL。同时做空白试验。酸解总氮测定,酸解液 5 mL 加 0.5 g 混合催化剂和 2 mL 浓硫酸消煮后用定氮仪测定;酸解氨基态氮测定,酸解液 10 mL 加入 2.5 mL 3.5% MgO 后用定氮仪测定;酸解氨基态氮和氨基糖氮测定,酸解液 10 mL 加入磷酸-硼砂缓冲液(pH 11.2)10 mL 后用定氮仪测定,所得结果减去酸解氨基态氮即为氨基糖态氮;酸解氨基酸态氮测定,酸解液 10 mL 加 2 mL 0.5 mol/L

NaOH 在 100℃ 水浴下浓缩至 2~3 mL, 冷却后加入 1 g 柠檬酸和 0.2 g 水合茚三酮, 100℃ 水浴 10 min 后定容至 50 mL, 吸取该溶液 10 mL 加入 20 mL 硼酸-硼砂缓冲溶液和 2 mL 5 mol/L NaOH 蒸馏测定; 酸解未知态氮, 酸解总氮减去酸解氨态氮、氨基糖氮和氨基酸氮 3 种形态的氮量; 非酸水解氮为土壤全氮与酸解总氮量的差值。

矿物固定态铵测定参照 Silver-Bremner^[21] 的方法: 称取 1.0 g 土样(过 0.147 mm 筛)放入离心管, 加 20 mL KOBr 混匀后静置过夜, 第二天 1200 r/min 离心 10 min 后弃上清液, 加入 15 mL 0.5 mol/L KCl 后 160 r/min 振荡 20 min, 然后 1200 r/min 离心 10 min 后弃上清液, 此操作重复 4 次; 第 4 次弃上清液加入 20 mL 5 mol/L HF-HCl, 200 r/min 振荡 24 h 后蒸馏测定。

土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 测定: 12.0 g 新鲜土样用 100 mL 0.01 mol/L CaCl_2 溶液浸提, 用流动注射分析仪测定, 同时测定土样含水量。

土壤微生物量氮用氯仿熏蒸法测定^[22]: 将氯

仿熏蒸 24 h 的土壤样品用 0.5 mol/L K_2SO_4 提取(水土比 4:1), 同时做不熏蒸对照, 浸提液过滤后用 TOC 仪测定有机氮, 土壤微生物量氮含量以熏蒸和未熏蒸土壤的有机氮之差除以 k_{EN} (0.54) 得到。

1.3 数据处理

试验数据的统计分析采用 SPSS 13.0 软件, 处理间多重比较采用 LSD 法, 图表用 Excel 2007 软件制作。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤全氮、全磷、全钾、pH 和有机质的影响

表 1 表明, 与试验前相比, CK 处理的全氮和全磷显著降低, pH 值有所升高; 而 S0 维持了相似的全氮和 pH, 显著提高了全磷。相对于 S0, S1 处理的全氮、全磷和 pH 均没有显著变化, 而 S2 和 S3 的全氮和全磷均显著增加, pH 显著降低。与试验前相比, 所有处理的全钾没有显著差异, 但施肥处理的全钾呈现降低趋势(降低 2.9%~3.4%)。

表 1 不同处理的土壤全氮、全磷、全钾和 pH

Table 1 Soil total N, P and K and pH in different treatments

处理 Treatment	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	pH
供试前土壤 The initial soil	0.83	1.03	20.31	8.70
CK	0.68 d	0.80 d	20.33 a	8.79 a
S0	0.81 c	1.14 c	19.67 a	8.69 b
S1	0.83 c	1.17 c	19.59 a	8.62 b
S2	0.90 b	1.26 b	19.73 a	8.53 c
S3	0.95 a	1.31 a	19.61 a	8.41 d

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same line are significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

CK 处理的有机质在 32 年试验中没有显著变化(图 1)。从 1981 至 2004 年的每一个试验周期(6 年), 前三年施肥和秸秆还田期间, 各施肥处理的有机质均呈增加趋势, 后三年不施肥阶段有机质均又显著降低。从 2004 至 2010 年, 各处理的有机质呈逐步增加趋势。在试验过程中各处理有机质含量基本为 $\text{CK} < \text{S0} < \text{S1} < \text{S2} < \text{S3}$ 。

2.2 秸秆还田对土壤有机氮组分的影响

由表 2 可知, 各处理酸解总氮占土壤全氮的 76.5%~80.6%, 是华北潮土氮的主体。与 CK 处理相比, 施肥可增加酸解总氮, 且增加秸秆还田量可

显著增加其含量。酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮和酸解未知态氮分别占土壤全氮的 18.0%~29.2%、28.3%~30.4% 和 20.2%~28.3%, 是有机氮的主要组分。施肥(化肥和秸秆)可提高三者的含量, 且酸解氨基酸氮和酸解氨态氮均随秸秆用量的增加显著增加, 以 S3 处理为最高, 而不同秸秆用量对非酸解氮没有影响。化肥单施对酸解氨基糖氮没有明显影响, 而增施秸秆可显著提高其含量, 其中 S3 处理的氨基糖氮为 S0 处理的 4.3 倍, 但各处理氨基糖氮的含量较低, 仅占全氮的 0.9%~2.8%。

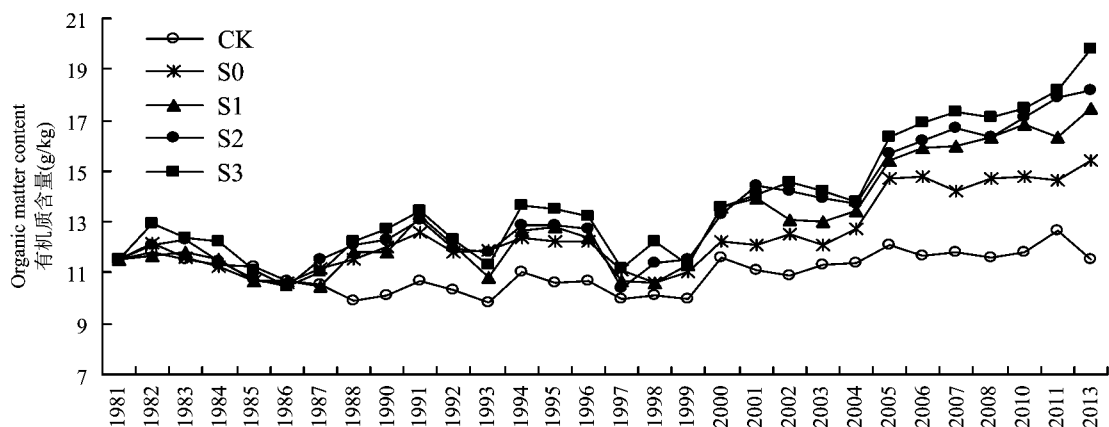


图1 不同处理土壤有机质变化(1981~2013年)

Fig.1 Change of soil organic matter in different treatments in 1981 – 2013

[注(Note): 1989、2009 和 2012 年土样丢失 Soil samples in the years of 1989, 2009 and 2012 were lost.]

表 2 不同处理土壤有机氮各组分含量及其占全氮的百分比

Table 2 Contents of soil organic N fractions and their percentages to total N in different treatments

处理 Treatment	酸解氨基酸氮 AAN	酸解氨基糖氮 ASN	酸解氨态氮 AN	酸解未知氮 HUN	酸解总氮 TAHN	非酸解氮 NHN
有机氮各组分含量 Contents of soil organic N fractions(mg/kg)						
CK	121.8 e	6.4 c	205.5 c	191.0 a	524.7 d	151.0 b
S0	185.4 d	6.1 c	229.9 b	195.2 a	616.6 c	188.9 a
S1	204.8 c	9.8 b	239.4 b	194.9 a	645.5 c	188.2 a
S2	247.2 b	9.5 b	264.5 a	180.8 a	702.0 b	194.2 a
S3	277.2 a	26.4 a	267.2 a	197.1 a	764.9 a	184.3 a
占全氮的百分比 Percentage to total N (%)						
CK	18.0 c	0.9 b	30.4 a	28.3 a	77.7 a	22.3 a
S0	23.0 b	0.7 b	28.5 a	24.2 b	76.5 a	23.5 a
S1	24.6 b	1.2 b	28.7 a	23.4 b	77.4 a	22.6 a
S2	27.6 a	1.1 b	29.5 a	20.2 c	78.3 a	21.7 a
S3	29.2 a	2.8 a	28.3 a	20.9 c	80.6 a	19.4 a

注(Note): AAN—Amino acid N; ASN—Amino sugar N; AN—Ammonia N; HUN—Hydrolysable unknown N; TAHN—Total acid hydrolysable N; NHN— Non-hydrolysable N. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

2.3 秸秆还田对土壤微生物量氮、晶格固定态铵、交换性铵态氮和硝态氮的影响

表3 显示长期施肥增加了土壤微生物量氮,且其随秸秆用量的增加显著增加,微生物量氮占全氮的比例也表现出相似变化,其占土壤总氮的3.6%~5.9%。与CK相比,长期施用化肥增加了土壤晶格固定态铵,化肥施用基础上秸秆还田处理(S1和

S2)对固定态铵没有影响,而与S0处理相比,S3处理显著降低了固定态铵(10.7%)。各处理固定态铵占全氮的16.2%~22.8%,且以CK处理的比例最高,S2和S3处理显著降低。不同施肥处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量没有影响,但氮肥施用显著提高了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,且S3较S0进一步显著提高了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

表 3 不同处理土壤微生物氮、固定态铵、交换性铵态氮和硝态氮含量及其占全氮的比例

Table 3 Contents of soil microbial biomass N, fixed ammonium, NH_4^+ -N, and NO_3^- -N and their percentages to total N in different treatments

处理 Treatment	微生物量氮 MBN		固定态铵 Fixed NH_4^+ -N		铵态氮 NH_4^+ -N		硝态氮 NO_3^- -N	
	含量 Content (mg/kg)	百分比 Percentage (%)	含量 Content (mg/kg)	百分比 Percentage (%)	含量 Content (mg/kg)	百分比 Percentage (%)	含量 Content (mg/kg)	百分比 Percentage (%)
CK	24.6 e	3.6 c	154.2 b	22.8 a	6.0 a	0.89 a	5.6 c	0.8 b
S0	29.5 d	3.7 c	171.6 a	21.3 a	5.9 a	0.73 b	11.0 b	1.4 a
S1	40.2 c	4.8 b	173.1 a	20.8 a	6.1 a	0.74 b	10.8 b	1.3 a
S2	48.2 b	5.4 ab	165.4 ab	18.4 b	6.0 a	0.67 b	11.3 b	1.3 a
S3	55.6 a	5.9 a	153.3 b	16.2 c	5.5 a	0.56 c	14.4 a	1.5 a

注 (Note): MBN—Microbial biomass N. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

2.4 秸秆还田对作物产量的影响

对比各处理 2011 ~ 2013 年的平均作物产量,与 CK 相比,施肥显著提高了小麦和玉米的产量(表 4)。在施用化肥基础上增施秸秆提高了小麦产量,但不同秸秆用量间无显著差异,且秸秆用量由 4500 增加到 9000 kg/hm^2 时,小麦产量呈现降低趋势。而施肥处理的玉米产量随秸秆用量的增加而增加,以 S3 处理最高。

表 4 不同处理 2011 ~ 2013 年小麦和玉米平均产量(kg/hm^2)

Table 4 Average yields of wheat and maize under different treatments in 2011 – 2013

处理 Treatment	小麦 Wheat	玉米 Maize
CK	1424 c	3399 d
S0	5685 b	8663 c
S1	6154 a	8918 bc
S2	6254 a	9042 b
S3	6157 a	9598 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column are significantly different among the treatments ($P < 0.05$).

3 讨论与结论

与试验开始前相比,长期的作物养分消耗导致不施肥处理的土壤全氮和全磷显著降低。单施化肥和化肥结合低量秸秆处理的氮投入量与作物收获的氮移走量基本平衡^[23],土壤全氮没有显著变化。氮

肥结合高量秸秆还田的氮投入高于作物收获后氮移走量,秸秆还田同时可通过微生物氮固持降低氮肥田间损失^[24-25],土壤氮素显著积累,这与长期化肥秸秆结合施用提高土壤肥力的研究结果是一致的^[14-15]。所有施肥处理的磷肥用量远超过作物收获磷移走量,秸秆还田又返回部分磷,导致土壤磷素积累而增加。不同施肥处理的总钾较供试前降低了 2.9%~3.4%,处理间统计上差异并不显著,可能是因为华北潮土主要由富钾矿物云母等组成,土壤全钾含量较高^[26];然而,缺乏钾肥投入可致土壤钾随作物的消耗而逐步降低,成为作物高产的限制因子。玉米秸秆还田归还了部分钾,而秸秆还田提高作物产量的同时也增加了作物钾的移出,结果也说明,仅单季秸秆还田不能满足作物钾消耗,增加钾肥投入来维持土壤钾素平衡是必要的。与 CK 处理相比,长期施用氮肥降低了土壤 pH 值,这与已有的关于长期施用氮肥导致土壤酸化的报道一致^[27-28]。在氮肥基础上增施秸秆,土壤 pH 值进一步降低,说明有机养分的长期大量投入也可引起土壤酸化。

土壤有机质是维持土壤肥力和质量的重要因子,其变化主要依赖于碳的输入和输出^[29]。氮肥可刺激土壤异养微生物生长,加速土壤有机碳分解,而作物生育期 28%~59% 的光合产物进入土壤,进行着有机碳更新^[30]。不施肥处理的有机质没有显著降低,可能由于其有机质分解较少,每年作物根茬残留和根系分泌物的有机碳投入基本维持了有机质平衡。在 2004 年前的每一个施肥阶段和 2004 年后的持续施肥期,与不施肥处理相比,氮肥和氮肥配合秸

秆施用均可提高有机质含量,且2004年后有机质持续增加。Powelson等^[31]用RothC模型在粘质土壤上模拟也发现,秸秆还田后的几年内有机质积累显著增加。这些结果均说明,氮肥单施和氮肥秸秆结合施用均可提高有机质含量。王文静等^[32]对大量长期定位试验结果分析发现,氮肥用量低于353 kg/(hm²·a)时,作物通过根茬残留和根系分泌物投入的碳高于土壤有机碳损失,致使有机质积累;而施氮量高于353 kg/(hm²·a)时,有机碳的损失显著高于作物碳投入而导致有机质降低。本研究中氮肥用量为360 kg/(hm²·a),与353 kg/(hm²·a)相似,粘质土壤又有利于有机质积累^[33],因此不施肥维持了有机质含量,单施氮肥增加了土壤有机质,氮肥结合秸秆还田由于增加了秸秆碳投入,有机质含量进一步增加。结果也说明,长期秸秆还田在提高土壤肥力(主要为氮和磷)的同时还提高了土壤质量,增加了土壤碳固持。

与不施肥处理相比,单施氮肥增加了土壤有机氮,在氮肥基础上增施秸秆进一步提高了有机氮。由于有机氮与有机质呈显著正相关^[34],这也证明了施肥增加土壤有机质的观点。肖伟伟等^[12]发现,长期施用化肥和秸秆均能提高土壤有机氮;Malhi等^[35]指出秸秆还田在常规和保护性耕作下均可提高有机氮。本研究中,酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮和未知态氮是有机氮的主体。与单施化肥相比,秸秆用量的增加提高了酸解氨基酸态氮、酸解氨态氮含量以及酸解氨基酸态氮占总氮的比例,而对酸解氨态氮占总氮的比例并没有影响,说明秸秆还田对酸解氨基酸态氮的贡献高于酸解氨态氮。秸秆施用也提高了氨基糖氮,但其总含量较低,对土壤培肥的意义不大。肖伟伟等^[12]也发现,施用小麦秸秆尤其利于酸解氨基酸态氮和非酸解有机氮的形成。土壤可矿化和植物吸收的氮主要来自酸解氨基酸态氮,其次为酸解氨态氮,再次为酸解未知态氮和非水解氮,氨基糖氮的贡献最低^[7,36]。因此,秸秆还田对提高土壤氮的矿化和潜在供应能力具有重要意义。酸解未知态氮占土壤总氮的20.2%~28.3%,但它的组分目前还不清楚,对作物的贡献也较低^[7]。本研究发现,秸秆用量对其也没有显著影响;而巨晓棠等^[37]认为,有机肥化肥配施主要提高了酸解未知态氮含量,这可能与不同的土壤质地和有机肥料有关。

土壤微生物量氮随秸秆用量的增加而增加,因为氮肥结合秸秆还田为微生物提供了充足的氮和碳源,促进了微生物的生长。土壤微生物是土壤有机、

无机氮循环转化的动力,微生物量的增加即可固持更多的无机态氮为有机氮,也可提高有机氮的矿化及其有效性,这对降低矿质氮损失和有机氮活化均有重要意义。影响土壤NH₄⁺矿物晶格固定与释放的主要因素有土壤理化性质、水分含量和氮肥施用等^[38-39]。与不施肥处理相比,氮肥施用增加了土壤固定态铵,因为氮肥贡献的NH₄⁺-N促使土壤中NH₄⁺固定-释放向着固定方向移动^[40]。高量秸秆还田降低了土壤固定态铵,可能由于以下原因:1)秸秆还田提高了有机质含量,有机质分子能阻止NH₄⁺进入矿物晶层以形成“新的”NH₄⁺晶格固定^[41-42];2)秸秆碳投入下增加的土壤微生物和有机质提高了对NH₄⁺的固持和吸附,对粘土矿物的铵固定形成有力的竞争,并促进固定态铵的释放^[39,43-44];3)秸秆钾素的投入导致K⁺竞争了NH₄⁺固定位点,从而降低NH₄⁺晶格固定^[39,45]。此外,高量秸秆还田下低的pH值可能也降低了NH₄⁺的晶格固定^[40]。因此,秸秆还田可有效阻止NH₄⁺的矿物晶格固定,提高土壤氮有效性及供氮能力。秸秆还田可降低土壤容重、提高土壤通透性^[9],有助于氮的硝化,施入的氮肥很快氧化成NO₃⁻-N,很少以NH₄⁺-N存在^[46]。因此秸秆用量的增加对土壤NH₄⁺-N含量没有影响,却显著增加了NO₃⁻-N含量。结果表明,长期秸秆还田同样可以提高土壤速效氮含量。

在化肥基础上增施秸秆提高了作物产量,这与上述长期秸秆还田提高了土壤肥力是一致的。张静等^[47]和Malhi等^[18]也证实,长期秸秆还田提高了土壤生产能力。玉米产量随秸秆用量的增加而增加,然而增加的秸秆用量并没有持续增加小麦产量,这可能是因为近几年小麦播种前的耕作为旋耕,耕层较浅,高量秸秆翻入土壤混合后,耕层土壤秸秆间隙度较大导致土壤失墒严重,水分不足和秸秆阻碍均影响了小麦出苗率和苗期的生长质量^[48-49]。因此,为保证秸秆还田后的小麦高产,配套的田间秸秆管理和耕作措施,如增加土壤翻耕深度、提高秸秆粉碎和均匀分布程度、播后镇压保墒等措施,都是十分必要的。

参考文献:

- [1] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 3041-3046.

- [2] Mulvaney R L, Khan S A, Ellsworth T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38 (6): 2295-2314.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259-273.
- [4] 文启孝. 土壤氮素形态和含量[A]. 朱兆良, 文启孝. 中国土壤中的氮[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 3-26.
Wen Q X. Content and forms of soil nitrogen [A]. Zhu Z L, Wen Q X. *Nitrogen in Soils of China*[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 3-26.
- [5] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[A]. Black C A. *Methods of soil analysis* [M]. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 1238-1255.
- [6] 郝晓晖, 胡荣桂, 吴金水, 等. 长期施肥对稻田土壤有机氮、微生物量及功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1477-1484.
Hao X H, Hu G R, Wu J S *et al.* Effects of long-term fertilization on paddy soils organic nitrogen, microbial biomass, and microbial functional diversity[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1477-1484.
- [7] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 荣向农. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 3-10.
Liang G Q, Lin B, Lin J X, Rong X N. Effects of long-term fertilization on nitrogen fractions in calcareous cambisols[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 3-10.
- [8] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44: 93-101.
- [9] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1504-1510.
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, Liu P. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China [J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1504-1510.
- [10] Gentile R, Vanlauwe B, Chivenge P, Six J. Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338: 159-169.
- [11] 张旭东, 须湘成, 陈恩凤. 施用猪粪培肥土壤后土壤氨基酸含量的变化[J]. *土壤通报*, 1989, 20(6): 248-260.
Zhang X D, Xu X C, Chen E F. Changes of amino acid content in soils as affected by application of pig manure[J]. *Chinese Journal Soil Sciences*, 1989, 20(6): 248-260.
- [12] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 孙波. 长期定位施肥对潮土有机氮组分和有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 274-281.
Xiao W W, Fan X H, Yang L Z, Sun B. Effects of long-term fertilization on organic nitrogen fractions and organic carbon in fluv-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 274-281.
- [13] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [14] Malhi S S, Nyborg M, Solberg E D *et al.* Improving crop yield and N uptake with long-term straw retention in two contrasting soil types[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 378-391.
- [15] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 307-314.
Zhang Y L, Lu J L, Jin J Y *et al.* Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 307-314.
- [16] Brunetto G, Ventura M, Scandellari F *et al.* Nutrient release during the decomposition of mowed perennial ryegrass and white clover and its contribution to nitrogen nutrition of grapevine[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90: 299-308.
- [17] Partey S T, Quashie-Sam S J, Thevathasan N V, Gordon A M. Decomposition and nutrient release patterns of the leaf biomass of the wild sunflower (*Tithonia diversifolia*): a comparative study with four leguminous agroforestry species [J]. *Agroforestry Systems*, 2011, 81: 123-134.
- [18] Malhi S S, Nyborg M, Goddard T, Puurveen D. Long-term tillage, straw and N rate effects on quantity and quality of organic C and N in a Gray Luvisol soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90: 1-20.
- [19] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S *et al.* Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92: 21-33.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. *Methods of agricultural chemical analysis* [M]. Beijing: China agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] Silva J A, Brenner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms nitrogen and ammonium in soil. 5. Fixed ammonium[J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, 30: 587-594.
- [22] Wu J S, Joergensen R G, Pommerening B *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1167-1169.
- [23] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 450-458.
- [24] Akkal-Corfini N, Morvan T, Menasseri-Aubry S *et al.* Nitrogen mineralization, plant uptake and nitrate leaching following the incorporation of (¹⁵N)-labeled cauliflower crop residues (*Brassica oleracea*) into the soil: a 3-year lysimeter study[J]. *Plant and Soil*, 2010, 328: 17-26.
- [25] Shan J, Yan X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71: 170-175.

- [26] Tan D S, Jin J Y, Jiang L H *et al.* Potassium assessment of grain producing soils in North China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2012, 148: 65–71.
- [27] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonio-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10: 1601–1611.
- [28] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [29] Lou Y L, Xu M G, Wang W *et al.* Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil Tillage Research*, 2011, 113: 70–73.
- [30] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 1990, 129: 1–10.
- [31] Powlson D S, Riche A B, Coleman K *et al.* Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives[J]. *Waste Management*, 2008, 28: 741–746.
- [32] 王文静, 魏静, 马文奇, 等. 氮肥用量和秸秆根茬碳投入对黄淮海平原典型农田土壤有机质积累的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3591–3598.
- Wang W J, Wei J, Ma W Q *et al.* Effect of nitrogen amendment and straw-stubble input on accumulation of soil organic matter in typical farm lands of Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3591–3598.
- [33] Gentile R, Vanlauwe B, Kavoo A *et al.* Residue quality and N fertilizer do not influence aggregate stabilization of C and N in two tropical soils with contrasting texture[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88: 221–231.
- [34] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5021–5030.
- Dang A Y, Wang G D, Li S Q. The changing characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen component of the typical soil types on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5021–5030.
- [35] Malhi S S, Nyborg M, Solberg E D *et al.* Improving crop yield and N uptake with long-term straw retention in two contrasting soil types[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 378–391.
- [36] 李菊梅, 李生秀. 可矿化氮与各有机氮组分的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 158–164.
- Li J M, Li S X. Relation of mineralizable N to organic N components[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 158–164.
- [37] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 87–91.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Effect s of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 87–91.
- [38] 张杨珠, 黄顺红, 王大娟, 等. 湖南主要耕地土壤的固定态铵含量与最大固铵容量[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(9): 1836–1845.
- Zhang Y Z, Huang S H, Wan D J *et al.* Fixed ammonium content and maximum capacity of fixing ammonium in major types of tillage soils in hunan province, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1836–1845.
- [39] Nieder R, Benbi D K, Scherer H W. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47: 1–14.
- [40] 李成芳, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 稻鸭共作生态系统稻田土壤固定态铵含量及有效性[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2729–2737.
- Li C F, Cao Z G, Pan S G *et al.* The dynamics and availability of soil fixed ammonium in rice-duck complex ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2729–2737.
- [41] Porter L K, Stewart B A. Organic interferences in the fixation of ammonium by soils and clay minerals[J]. *Soil Science*, 1970, 109: 229–233.
- [42] Liang B, Yang X Y, He X H *et al.* Long-term combined application of manure and NPK fertilizers influenced nitrogen retention and stabilization of organic C in Loess soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353: 249–260.
- [43] 彭钦佩, 仇少君, 侯洪波, 等. ¹⁵N 交叉标记有机和无机氮的转化与残留[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 858–865.
- Peng P Q, Qiu S J, Hou H B *et al.* Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic N cross labeled fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 858–865.
- [44] Tang Y, Wang X Z, Zhao H T *et al.* Effect of potassium and C/N ratios on conversion of NH₄⁺ in soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18: 539–544.
- [45] Liu Y J, Laird D A, Barak P. Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 310–314.
- [46] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 92–94.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of different soil nitrogen pools after applying different types of nitrogen fertilizers[J]. *Chinese Journal of Eco-Agricultural*, 2004, 12(1): 92–94.
- [47] 张静, 温晓霞, 廖允成, 刘阳. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 612–619.
- Zhang J, Wen X X, Liao Y C, Liu Y. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 612–619.
- [48] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式是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 seedling emergence in winter wheat under diferent tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463–465.
- [49] 李波, 魏亚凤, 季桦, 等. 水稻秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 34(2): 60–64.
- Li B, Wei Y F, Ji H *et al.* Factors affecting seedling emergence in winter wheat under different tillage patterns with rice straw mulching[J]. *Journal of Yangzhou University (Agriculture and Life Science)*, 2013, 34(2): 60–64.