

有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布

李树山^{1,2,3}, 杨俊诚^{1,2,3*}, 姜慧敏^{1,2,3}, 张建峰^{1,2,3}, 李玲玲^{1,2,3}, 张水勤^{1,2,3}, 潘攀^{1,2,3}, 郭俊梅^{1,2,3}, 刘恋^{1,2,3}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 3. 中国农业科学院土壤质量重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 利用 ^{15}N 分别标记有机肥和化肥, 通过小麦盆栽试验, 研究了外源氮素在典型潮土中向土壤有机氮和无机氮(铵态氮、硝态氮)各形态的转化与分配。结果表明: (1) 土壤全氮受有机肥影响显著。有机肥处理土壤全氮显著提高 24.8% ($P < 0.05$), 其中铵态氮和硝态氮分别增加了 59.0% 和 120 倍; 有机无机肥配施处理土壤全氮提高 13.7%, 其中硝态氮增加了 84.5 倍, 均达到显著水平 ($P < 0.05$); 化肥处理对土壤全氮包括土壤硝态氮和铵态氮含量有一定提高, 但差异性检验不显著。 (2) 外源氮对土壤有机氮影响明显。与对照相比, 不同施氮处理均提高了土壤各形态有机氮的含量, 有机肥处理土壤酸解性有机氮和酸解性铵态氮显著增加 ($P < 0.05$), 分别提高了 25.3% 和 39.3%; 不同施氮处理各形态有机氮占全氮的比例变化较小, 处于动态平衡中。 (3) 来自不同肥料的外源氮对土壤有机氮含量变化的贡献不同。外源化肥氮直接影响土壤酸解性铵态氮和非酸解性有机氮含量的变化, 残留化肥氮分别占这两种形态有机氮含量的 7.8% 和 5.2%; 外源有机氮对土壤非酸解性有机氮和酸解未知氮含量的变化起主导作用, 残留有机肥氮分别占这两种形态有机氮含量的 5.0% 和 4.5%; 有机无机肥料配施情况下, 在土壤酸解未知氮含量的变化中有有机肥氮起主要作用, 残留有机肥氮占酸解未知氮含量的 18.0%。 (4) 土壤铵态氮和硝态氮的变化均主要由外源氮转化而来。在化肥处理中分别有 27% 的土壤铵态氮和硝态氮来自外源化肥氮的转化, 有机肥处理中分别有 8% 的土壤铵态氮和硝态氮来自外源有机肥氮的转化, 有机无机肥配施处理中分别有 5% 的土壤铵态氮和硝态氮来自外源有机氮的转化。 (5) 有机无机肥配施可提高土壤有机氮素的残留并促进其向土壤酸解性铵态氮和酸解未知氮、铵态氮和硝态氮等有效形态转化, 从而提高有机肥的有效性, 减少环境风险, 表明有机无机肥配施是土壤培肥的有效途径。

关键词: ^{15}N ; 潮土; 有机氮; 无机氮; 氮残留形态

中图分类号: S143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)06-1185-09 doi:10.11654/jaes.2013.06.015

Effects of Organic and Inorganic Fertilizer on Nitrogen Pool and Distribution of Residual N Fractions in Fluvo-aquic Soil Under the Winter Wheat System

LI Shu-shan^{1,2,3}, YANG Jun-cheng^{1,2,3*}, JIANG Hui-min^{1,2,3}, ZHANG Jian-feng^{1,2,3}, LI Ling-ling^{1,2,3}, ZHANG Shui-qin^{1,2,3}, PAN Pan^{1,2,3}, GUO Jun-mei^{1,2,3}, LIU Lian^{1,2,3}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 2. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Soil Quality, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Using ^{15}N labeled organic manure and urea, a pot experiment was conducted to investigate the effect of organic and inorganic fertilizer on nitrogen (N) pool and distribution of residual N fractions in fluvo-aquic soil under the winter wheat system. The results shown: (1) The effect of organic fertilizer on soil total N was significantly ($P < 0.05$); Soil total N increased by 24.8%, ammonium N and nitrate N of which increased by 59.0% and 120 times respectively in OM^{*} treatment (application of ^{15}N labeled pig manure totally); soil total N increased by 13.7%, nitrate N of which increased by 84.5 times in OM^{*}+CF treatment (application of ^{15}N -labeled pig manure with common urea);

收稿日期: 2012-12-11

基金项目: 国家重点基础研究计划“973”课题(2013CB127406); 农业部公益性行业科研专项(201103007)

作者简介: 李树山(1987—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤培肥。E-mail: lsswfj@163.com

* 通信作者: 杨俊诚 E-mail: yangjich@263.net

the effect on the content of soil total N, nitrate N and ammonium N was not significantly performed in CF^{*} treatment (application of ¹⁵N labeled urea only). (2) Compared to the non-fertilizer (CK) treatment, the application of N fertilizer increased the contents of different fractions of organic N in soil, especially the contents of hydrolysable organic N and hydrolysable ammonium N in OM^{*} treatment were significantly increased by 25.3% and 39.3%, respectively ($P < 0.05$), the proportion of organic forms accounted for total N was in dynamic balance. (3) The contribution of exogenous nitrogen to the nitrogen contents in different fractions varied with fertilizer forms. The content of hydrolysable ammonium N and non hydrolysable N was significantly influenced by the application of the chemical fertilizer respectively, and the content of non-hydrolysable N and hydrolysable unidentified N by the application of the organic fertilizer significantly, and the content of hydrolysable unidentified N by the application of the organic fertilizer significantly. (4) As the transformation of exogenous inorganic nitrogen, 27% of soil ammonium N and nitrate N respectively, derived from the application of chemical fertilizer in CF^{*} treatment, and as that of exogenous organic nitrogen, 8% and 5% from the application of organic fertilizer in OM^{*} and OM^{*}+CF treatment respectively. (5) Ammonium N and nitrate N, hydrolysable ammonium N and hydrolysable unidentified N were available N; the present results indicated that the chemical fertilizer combined with organic fertilizer is a practical approach for promoting the transformation and distribution of organic fertilizer to available N, increasing the availability of organic fertilizer, reducing environmental risk and maintaining the sustainability of soil.

Keywords: ¹⁵N; fluvo-aquic soil; organic nitrogen; inorganic nitrogen; residual N fractions

在所有必需营养元素中,氮是限制植物生长和形成产量的首要因素^[1]。植物累积的氮素有 50% 来自土壤,在某些条件下甚至达到 70% 以上,而肥料氮(有机肥料、无机化肥)是土壤氮素的主要来源^[2]。不合理的施肥不但培肥土壤效率低下,还会造成环境污染等问题,例如畜禽粪便作为重要的有机肥料^[3],本身就造成面源污染,过量施用会造成地下水污染^[4]。为此,寻找合理施肥方式对提高有机肥资源利用,减少环境污染就显得十分重要。有机氮作为土壤氮素主要形态,占到全氮的 90% 左右^[5-7],是土壤氮库的绝对主体。土壤有机态氮,特别是易矿化有机氮组分含量决定着土壤的供氮能力,但有机氮在土壤中的过度积累也可能带来环境污染等负面效应^[8]。因此,土壤有机氮在维持土壤氮素肥力及生态环境等方面具有重要的意义^[9]。自从 Bremner 提出酸解的方法将有机氮分为氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解铵态氮、酸解未知氮及非酸解性有机氮后^[10],极大地促进了对土壤有机氮组分的研究^[11-14]。土壤有机氮的化学形态及其存在状况是影响土壤氮素有效性的重要因子^[15],其受施肥等的影响较大,但大多数研究集中于长期定位施肥等对各形态有机氮含量及其组成的影响^[16-19],不能够明确指出施入土壤的肥料氮素对各个形态有机氮的贡献量以及残留在土壤中的肥料氮素主要以何种形态存在。外源氮施入土壤后与原有的土壤氮库发生着复杂的生物化学过

程,要想区分来源于外源氮的土壤有机态氮和无机态氮,常规的研究方法难以实现,而采用 ¹⁵N 示踪技术成为解决这一技术瓶颈的首选。为此,本文以华北地区典型潮土为研究对象,利用 ¹⁵N 同位素示踪技术,研究外源有机、无机氮肥进入土壤后氮素的形态转化,以期探索外源氮在土壤中的氮素形态有效转化过程,为土壤优化施肥、减少环境风险提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

试验土壤采自河北辛集马庄农场(东经 115.22°, 北纬 37.47°)。该地海拔 20 m,属北温带季风半湿润气候,年降水量 500~600 mm,主要分布在 6—9 月,年平均气温 12.6 °C。土壤属于砂质潮土,实验布置前供试土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 供试标记肥料

1.2.1 标记有机肥

标记有机肥为猪粪,制作分为三个阶段^[20]:第一阶段 2 d,只饲喂少量的淀粉、食盐和糖,以排除胃中的氮素,降低猪体内的氮素对标记饲料氮的稀释作用;第二阶段 10 d,每日饲喂添加标记螺旋藻的饲料 2 次,每次添加 1 g,螺旋藻与饲料配比为 1:400(螺旋藻全氮含量 6%,丰度 98.2%,蛋白质含量 55%~80%,由上海化工研究院提供);第三阶段 2 d,饲喂普通饲料

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the experimental soil

有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	C/N	碱解氮 Available N/mg·kg ⁻¹	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	有效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	pH
13.2	1.2	8.5	92.0	0.9	22.1	7.9

和少量的淀粉、食盐和糖,分别收集第二、三阶段的粪尿,加入草炭和有机物料腐熟剂,含水量控制在60%左右,发酵15 d以上。制作完成的标记有机肥风干样含氮量2.16%,¹⁵N丰度为0.572%,含P₂O₅ 2.73%,含K₂O 2.11%。

1.2.2 标记化肥

标记化肥为尿素[CO(¹⁵NH₂)₂],全氮含量46%,¹⁵N丰度为10.30%,由上海化工研究院提供。

1.3 试验设计

试验设4个处理,每个处理3次重复。4个处理分别为CK(不施氮肥)、CF*(只施标记化肥)、OM*(只施标记有机肥)和OM*+CF(标记有机肥配施普通化肥,化肥氮:有机肥氮=7:3)。以辛集马庄农场小麦大田施氮量为300 kg·hm⁻²,施P₂O₅ 135 kg·hm⁻²,施K₂O 90 kg·hm⁻²为依据,盆栽试验施肥量见表2。磷钾肥各处理均等量施入,磷肥为普通过磷酸钙(P₂O₅含量16%);钾肥为硫酸钾(K₂O含量50%)。肥料于播种前在盆中与土壤充分混匀。每盆装风干土7 kg,全部过2 mm筛。小麦于2011年11月27日播种,3叶期定苗,每盆定10株,充分春化,为维持各生育期对水分的需求与土壤墒情,采用称重法定量灌水,并保证灌水时间的一致,2012年5月28日收获并采集土壤样品。

表2 不同处理施肥量

Table 2 Amounts of fertilizers applied in different treatments

处理 Treatments	化肥氮 Chemical fertilizer N/ g·pot ⁻¹	有机肥氮 Organic manure N/ g·pot ⁻¹	P ₂ O ₅ / g·pot ⁻¹	K ₂ O/ g·pot ⁻¹
CK	0	0	1.53	0.54
CF*	1.50	0	1.53	0.54
OM*	0	1.50	1.53	0.54
OM*+CF	1.05	0.45	1.53	0.54

注:CF*为¹⁵N标记尿素;OM*为¹⁵N标记有机肥。下同。

Note: CF*: ¹⁵N-labeled urea; OM*: ¹⁵N-labeled pig manure. The same symbol is used for other tables.

表3 不同施肥处理的土壤全氮及其各形态有机氮含量

Table 3 Soil total N and organic N forms under different fertilization treatments

处理 Treatments	全氮 Total N/ mg·kg ⁻¹	酸解有机氮 Hydrolysable organic N/ mg·kg ⁻¹	氨基酸态氮 Amino acid N/ mg·kg ⁻¹	酸解铵态氮 Ammonium N/ mg·kg ⁻¹	氨基糖态氮 Amino sugar N/ mg·kg ⁻¹	酸解未知氮 Hydrolysable unidentified N/ mg·kg ⁻¹	非酸解有机氮 Non hydrolysable N/ mg·kg ⁻¹
CK	1189c	801.1b	379.9a	219.8b	57.3a	144.2a	388.2a
CF*	1223c	849.0b	385.6a	249.5ab	68.0a	145.9a	373.6a
OM*	1484a	1003.8a	441.9a	306.1a	66.7a	189.1a	480.2a
OM*+CF	1352b	925.9ab	391.0a	287.0ab	58.7a	189.1a	426.1a

注:数值后不同字母表示差异达5%显著水平。下同。

Note: Values followed by different letters mean significant at 5% level. The same symbol is used for other tables.

1.4 测定方法

土壤有机氮各形态采用Bremner法提取,铵态氮、硝态氮采用MgO、定氮合金法提取,提取出的各形态氮素加入2滴1 mol·L⁻¹硫酸浓缩,然后在中国农业科学院农产品加工研究所采用MAT-251型质谱仪测定¹⁵N丰度。有机质采用重铬酸钾-硫酸法,全氮采用半微量凯氏定氮法,碱解氮采用扩散法,速效磷采用碳酸氢钠钼蓝法,pH采用电位法^[21]。

1.5 数据处理与分析

计算方法:%Ndff(土壤各形态氮)=(土壤各形态氮的¹⁵N原子百分超/标记肥料的¹⁵N原子百分超)×100;土壤各形态氮来自¹⁵N标记肥料含量=土壤各形态氮×土壤各形态氮%Ndff。

用Excel 2007程序进行数据的相关计算,用SPSS 19.0软件进行相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 外源氮对土壤有机氮和无机氮组分的影响

施肥等措施能够影响土壤全氮、有机氮和无机氮水平。当季施入土壤外源氮20%~60%^[22-23]残留于土壤中,从而改变土壤氮素含量。一般情况下,外源氮的投入均会不同程度增加土壤全氮含量,研究结果(表3)表明,与CK处理相比,CF*处理土壤全氮量提高了2.9%,差异不显著;OM*处理和OM*+CF处理全氮量分别提高了24.8%和13.7%,差异达到显著水平(P<0.05)。

2.1.1 外源氮对土壤有机氮组分的影响

土壤有机氮分为酸解性有机氮和非酸解性有机氮。研究结果(表3)表明,不同施肥处理土壤酸解性有机氮含量范围为801.1~1 003.8 mg·kg⁻¹,平均为895.0 mg·kg⁻¹。CK处理酸解有机氮的含量最低(801.1 mg·kg⁻¹),其次是CF*处理(849.0 mg·kg⁻¹),OM*+CF处理居中(925.9 mg·kg⁻¹),OM*处理最高

(1 003.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。含有有机肥的两个处理较其他处理差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 分别增加15.6%和25.3%。非酸解性有机氮含量范围为 373.6~480.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 417.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与 CK 处理相比较, CF^{*} 处理非酸解性有机氮含量降低了 14.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, OM^{*} 处理和 OM^{*}+CF 处理分别增加了 92.0、37.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加幅度为 23.7%和 9.8%, 但差异不显著。

从试验结果(图 1)可以看出, 酸解性有机氮占土壤全氮的 67.4%~69.4%, 平均为 68.2%, 说明其是土壤氮素的主体。CF^{*}、OM^{*}、OM^{*}+CF 处理均提高了这一比例, 提高幅度分别为 3.1%、0.4%和 1.7%。CF^{*} 处理酸解性有机氮占全氮的比例最大, 随着有机肥施用比例的增加, 酸解性有机氮的相对含量的增加幅度呈降低趋势。非酸解性有机氮占土壤全氮的 30.6%~32.6%, 平均为 31.8%, CF^{*}、OM^{*}、OM^{*}+CF 处理中非酸解性有机氮的比例分别降低了 6.4%、0.9%、3.4%, 说明肥料的投入增加了有机氮的有效组分, 提高了有机氮的有效性。所有处理酸解性有机氮和非酸解性有机氮占土壤全氮的比例变化不大。

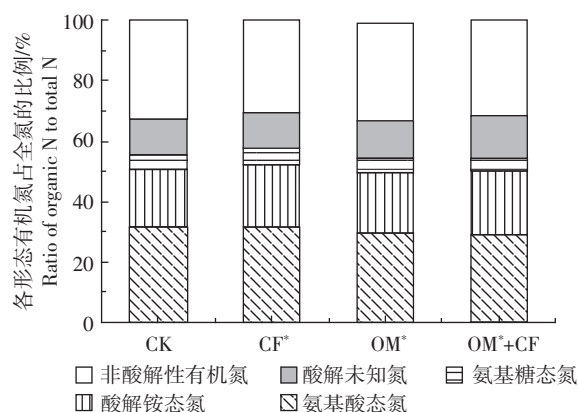


图 1 施肥对土壤有机氮组成的影响

Figure 1 Effects of fertilization on compositions of organic N in the soil

酸解性有机氮包括氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解铵态氮和酸解未知态氮。CF^{*}、OM^{*}+CF 处理和 OM^{*} 处理氨基酸态氮较对照处理 CK 分别增加了 5.7、11.1、62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加幅度分别为 1.5%、2.9%和 16.3%, OM^{*} 处理的增量最大, 但差异尚未达到显著。CF^{*}、OM^{*}+CF、OM^{*} 3 个处理的酸解性铵态氮较 CK 处理分别增加了 29.7、67.2、86.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增加幅度分别为 13.5%、30.6%和 39.3%, 均达到了显著水平 ($P < 0.05$)。氨基糖态氮含量显著低于其他有机氮组分, 不同处理由高到低依次为 CF^{*}>OM^{*}>OM^{*}+CF>CK, 各处

理之间的差异也没有达到显著。CF^{*} 处理与 CK 处理酸解未知氮含量差异很小, 只提高了 1.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提高幅度为 1.2%, OM^{*} 处理和 OM^{*}+CF 处理中酸解未知氮测得值相同, 说明两者对酸解未知氮含量的影响相似, 各处理之间差异没有达到显著性(表 3)。

不同组分占全氮的比例由高到低依次为(图 1): 非酸解性有机氮(30.6%~32.6%)>氨基酸态氮(28.9%~31.9%)>酸解性铵态氮(18.5%~21.2%)>酸解未知氮(12.0%~14.0%)>氨基糖态氮(4.3%~5.6%)。可见, 氨基酸态氮和酸解性铵态氮是酸解性有机氮的主体。不同处理氨基酸态氮占全氮的比例由高到低依次为 CK>CF^{*}>OM^{*}>OM^{*}+CF, 酸解性铵态氮占全氮的比例由高到低依次为 OM^{*}+CF>CF^{*}>OM^{*}>CK。施肥使氨基酸态氮的相对含量降低了 1.3%~9.5%, 酸解性铵态氮的相对含量提高了 10.4%~14.9%, 氨基糖态氮和酸解未知氮相对含量变化的规律性不明显。所有处理各形态酸解性有机氮占土壤全氮比例的变化也不大。

2.1.2 外源氮对土壤无机氮组分的影响

土壤的无机态氮一般指铵态氮、硝态氮。土壤内各形态氮一般都要矿化为无机氮后才能被植物吸收利用, 其含量受各种条件影响变化会比较大。从结果可知(表 4), 不同氮肥处理铵态氮的含量范围为 4.5~8.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 5.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。OM^{*} 处理较 CK 处理、CF^{*} 处理和 OM^{*}+CF 处理均有显著提高($P < 0.05$), 其中较 CK 处理提高了 3.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提高幅度为 59.0%。不同氮肥处理硝态氮的含量范围为 1.3~159.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 83.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可见土壤中无机氮主要以硝态氮形态存在。相比 CK 处理, CF^{*} 处理的硝态氮增加幅度最小, 差异未达到显著性, 含有机肥投入的 OM^{*} 处理和 OM^{*}+CF 处理土壤硝态氮的含量分别显著提高了 158.0、111.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$), 提高幅度分别为 120 倍和 84.5 倍, 随着有机肥投入比例的增大而增加。

2.2 残留肥料氮在土壤中的形态分布

肥料氮施入土壤后主要去向为作物吸收、土壤残留和以不同形式损失。残留氮有利于土壤氮素总量的保持和提高, CF^{*} 处理化肥残留率为 51.7%, OM^{*} 处理有机肥残留率为 52.2%, OM^{*}+CF 处理有机肥的残留率达 61.0%, 有机无机肥料配施中有机肥氮的残留率较单施有机肥提高了 16.9%。同时, 土壤氮的存在形态与氮素的有效性密切相关, 所以了解肥料残留氮分别转化进入土壤的各形态有机和无机氮库的规律, 对于指导如何提高肥料氮利用率具有重要意义。

2.2.1 残留肥料氮在土壤有机态氮的分布

土壤中各形态有机氮来自肥料氮的比例见表 5。 CF^* 处理土壤有 $36.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的酸解性有机氮来自于化肥氮,占酸解性有机氮含量的 4.3%,有 $16.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的非酸解性有机氮来自于化肥氮,占非酸解性有机氮含量的 5.2%; CF^* 处理土壤各形态酸解性有机氮中来自化肥氮的比例由高到低依次是酸解性铵态氮>氨基酸态氮>酸解未知氮>氨基糖态氮,来自于化肥氮的分别有 7.8%、3.2%、2.2%和 1.5%。 OM^* 处理土壤有 $32.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的酸解性有机氮来自于有机肥氮,占酸解性有机氮含量的 3.2%,有 $19.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的非酸解性有机氮来自于有机肥氮,占非酸解性有机氮含量的 5.0%; OM^* 处理各形态酸解性有机氮中有机肥氮素所占比例由高到低依次为酸解未知氮>酸解铵态氮>氨基酸态氮>氨基糖态氮,来自于有机肥氮的分别有 4.5%、3.4%、3.0%和 0.2%。 OM^*+CF 处理土壤有 $49.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的酸解性有机氮来自于有机肥氮,占酸解性有机氮含量的 5.3%,有 $6.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的非酸解性有机氮来自于有机肥氮,占非酸解性有机氮含量的 3.8%; OM^*+CF 处理各形态酸解性有机氮中有机肥氮素所占的比例由高到低依次为酸解未知氮>酸解铵态氮>氨基糖态氮>氨基酸态氮,来自于有机肥氮的分别有 18.0%、4.4%、1.5%和 0.5%。 OM^*+CF 处理有机肥氮投入只占 OM^* 处理投入量的 30%,但残留在酸解性有机氮、酸解性铵态氮和酸解未知氮中的有机肥氮却远高于 OM^* 处理的 30%,这说明有机无机配施大大提

高了有机肥氮在酸解性有机氮中的残留。

2.2.2 残留肥料氮在土壤无机态氮的分布

土壤中铵态氮和硝态氮来自肥料氮的比例见表 4。 CF^* 处理土壤分别有 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铵态氮和 $17.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硝态氮来自于化肥氮,占各自含量的 26.4%和 27.4%; OM^* 处理土壤分别有 $0.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铵态氮和 $12.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硝态氮来自于有机肥氮,占各自含量的 8.1%和 7.8%; OM^*+CF 处理土壤分别有 $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铵态氮和 $4.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的硝态氮来自于有机肥氮,均高于 OM^* 处理的 30%,占各自含量的 5.8%和 4.4%。可见,铵态氮和硝态氮残留肥料氮的量及其比例均遵循 $CF^*>OM^*>OM^*+CF$ 的顺序,无机氮中来自肥料氮的比例分别为 27%、8%和 5%。

2.3 残留肥料氮对土壤氮各组分的贡献

仅由外源氮素在土壤各形态氮库内的分布并不能明确不同种类肥料氮对各形态氮的贡献,还需对结果进一步的分析。表 6 列出的肥料残留氮各组分 dff 值与残留总氮 dff 值的比值,这个比值表示肥料残留氮和土壤氮在各个组分的分配比率大小。当该值等于 1 时,说明分配与该组分的肥料残留氮与土壤氮成比例;该值大于 1,说明肥料残留氮高于土壤氮,或者说肥料残留氮对该组分的氮素贡献较大;该值小于 1 则相反,表示肥料残留氮对该组分的氮素贡献较小^[24]。

由结果(表 6)可知, CF^* 处理有机氮组分中酸解性铵态氮和非酸解性氮 dff 与总氮 dff 的比值都大于 1,分别为 1.72 和 1.14,说明化肥残留氮分配于这两

表 4 不同施肥处理无机氮组分的含量及其残留标记肥料氮的形态
Table 4 Contents of inorganic N and the forms of residual N fractions in different treatments

处理 Treatments	NH_4-N			NO_3-N		
	含量 Content/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NH_4-N dff		含量 Content/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NO_3-N dff	
		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%
CK	5.3b			1.3c		
CF^*	4.5b	1.2	26.4	62.1bc	17.0	27.4
OM^*	8.5a	0.7	8.1	159.2a	12.4	7.8
OM^*+CF	5.4b	0.3	5.8	112.8ab	4.9	4.4

表 5 残留标记肥料氮的形态
Table 5 The forms of residual labeled fertilizer nitrogen

处理 Treatments	酸解有机氮 dff		氨基酸态氮 dff		酸解铵态氮 dff		Hydroly- sable ammonium-N dff		氨基糖态氮 dff		酸解未知氮 dff		Hydroly- sable unidentified-N dff		非酸解有机氮 dff		Non hydrolysable-N dff	
	Hydrolysable organic-N dff		Amino acid-N dff		sable ammonium-N dff		Amino sugar-N dff		sable unidentified-N dff		Hydroly- sable unidentified-N dff		Non hydrolysable-N dff		Non hydrolysable-N dff		Non hydrolysable-N dff	
	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	%
CF^*	36.1	4.3	12.4	3.2	19.4	7.8	1.1	1.5	3.2	2.2	16.9	5.2						
OM^*	32.0	3.2	13.1	3.0	10.2	3.4	0.1	0.2	8.5	4.5	19.1	5.0						
OM^*+CF	49.2	5.3	1.9	0.5	12.5	4.4	0.9	1.5	34.0	18.0	6.5	3.8						

表 6 不同氮组分的 dff 比值
Table 6 Specific dff value of different N components

处理 Treatments	B/A	C/A	D/A	E/A	F/A	G/A	H/A	I/A
CF*	0.94	0.71	1.72	0.34	0.48	1.14	5.82	6.05
OM*	0.85	0.79	0.89	0.06	1.20	1.32	2.14	2.07
OM*+CF	1.10	0.10	0.90	0.31	3.72	0.78	1.20	0.90

注:A 全氮,B 酸解性有机氮,C 氨基酸态氮,D 酸解性铵态氮,E 氨基糖态氮,F 酸解未知氮,G 非酸解性氮,H 铵态氮,I 硝态氮。

Note:A total N;B hydrolysable organic N;C amino acid N;D hydrolysable ammonium N;E amino sugar N;F hydrolysable unidentified N;G non hydrolysable N;H ammonium N;I nitrate N.

种组分的比率大于土壤氮,即残留化肥氮素对土壤酸解性铵态氮和非酸解性有机氮的贡献较大,其中对酸解性铵态氮贡献最大,其他形态氮素的组分的比值都小于 1。OM* 处理中,非酸解性有机氮贡献最大(1.32),其次是酸解未知氮(1.20),其他形态氮素的组分的比值都小于 1。OM*+CF 处理中有机肥氮对酸解未知氮的贡献最大,其他形态氮素组分的比值都小于 1。无论何种施肥处理,土壤氮素对氨基酸态氮的贡献都要大于残留肥料氮素。对于无机氮形态,除 OM*+CF 处理中有机肥氮对硝态氮的 dff 比值小于 1,其他所有的处理铵态氮和硝态氮的 dff 比值均大于 1,其中 CF* 处理无机氮两比值最大。化肥氮素对硝态氮贡献要大于对铵态氮的贡献(6.05>5.82),而包含有机肥投入的两个处理中有机肥氮素均对铵态氮的贡献较大。

3 讨论

在等氮量施入的情况下,土壤氮库受不同类型外源氮素的影响不同。有机氮是土壤氮库的主体,酸解性有机氮和非酸解性有机氮变化规律与肖伟伟^[25]、高晓宁^[26]等的研究结果一致,受有机肥影响显著,遵循 OM*>OM*+CF>CF* 的顺序。酸解性有机氮内各形态含量高低顺序为氨基酸态氮>酸解性铵态氮>酸解未知氮>氨基糖态氮,与张俊清等^[27]研究结果类似。氨基酸态氮、酸解性铵态氮和酸解未知氮的变化遵循 OM*>OM*+CF>CF* 的顺序。氨基酸态氮的增加,一方面是由于有机肥施入会带入一部分氨基酸物质,另一方面可能要归功于有机质的加入为微生物旺盛的代谢活动提供了丰富的物质基础^[28],因为土壤中的氨基酸来自于微生物细胞壁或结构蛋白^[29]。酸解性铵态氮同样受有机肥影响显著,有研究表明^[30],土壤酸解性铵态氮中有 1/4~1/3 来自于固定态铵,增加了土壤中交换性铵和固定态铵含量,有机肥的施入使土壤新生成的土壤有机质增多,在腐殖化的过程中会释放一部分

NH₄⁺或土壤腐殖质对 NH₄⁺的固持增加,进而增加土壤酸解性铵态氮的含量。酸解未知氮受有机肥改变量最大,由于其主要为非 α-氨基酸氮、N-苯氧基氨基酸态氮和嘧啶、嘌呤等杂环氮,还包括部分酸解时不能释放的固定态铵^[31],形态比较稳定,有机肥的加入可能会直接增加酸解未知氮的含量。氨基糖态氮含量变化 OM*>OM*+CF,因为其主要来自于土壤微生物的生物合成,受制于微生物量^[28],所以含量可能受有机肥施用量的影响。不同施肥处理各形态有机氮占全氮的比例差别很小,处于动态平衡中,基本上遵循非酸解性有机氮>氨基酸态氮>酸解性铵态氮>酸解未知氮>氨基糖态氮的顺序。这与姬景红等^[32]的研究结果稍有差异,可能与土壤类型、质地、施肥用量和生态系统中水热条件等因素有关。无机氮含量受有机肥影响较大,因为有机肥是缓效肥料,经过一个小麦生长季作用依然显著。总之,有机肥培肥土壤作用明显。

王岩等^[24]研究认为土壤中残留的化肥氮主要转化为氨基酸态氮和酸解未知氮,有机肥料中的残留氮主要转化为酸解性铵态氮和氨基糖态氮,而黄东迈等^[29]研究认为无论在土壤中施入何种肥料氮,大部分首先转化为氨基酸态氮和酸解未知氮。本研究通过同位素示踪技术,将各形态氮素中来自肥料的部分进行了量化。研究表明,无论何种肥料氮在各形态有机氮中所占比例几乎都在 5%左右,可见土壤氮是各形态有机氮的主体。化肥残留氮在酸解性铵态氮、非酸解性有机氮和氨基酸态氮中所占比例较大,分别为 7.8%、5.2%和 3.2%,有机肥残留氮在酸解未知氮、非酸解性有机氮和酸解性铵态氮中所占比例较大,分别为 4.5%~18.0%、3.8%~5.0%和 3.4%~4.4%。土壤无机氮含量本身较低,肥料残留量随之较低,但就肥料氮占无机氮比例来说较高,其中 CF* 处理无机氮有 27%来自于化肥氮素,OM* 处理无机氮有 8%来自于外源有机肥氮素,OM*+CF 处理无机氮有 5%来自于外源有机肥氮素。

某种形态氮素含量的变化主要是由外源氮素还是由土壤氮素引起,通过不同肥料氮和土壤氮在各个组分的分配比率大小可知。在河北典型潮土小麦生长季内,单施化肥处理土壤酸解性铵态氮和非酸解性有机氮的变化主要由投入的化肥氮引起,单施有机肥处理土壤非酸解性有机氮和酸解未知氮的变化主要由投入的有机肥氮引起,有机无机配施处理土壤酸解未知氮的变化主要由投入的有机肥氮引起。氨基酸态氮一直被认为受施肥影响较大^[15,27,33],在本研究看来是施肥促进了土壤氮素向氨基酸态氮的转化,并非主要来自肥料氮素,这也证明了氨基酸态氮的增加并不是施入有机物中的氨基酸的简单迭加。土壤无机氮中肥料氮和土壤氮的分配比率均大于1,说明在收获阶段肥料氮较土壤氮对无机氮贡献大。OM^{*}+CF处理中有机肥氮的投入只占OM^{*}处理的30%,但向氨基酸态氮、酸解性铵态氮、酸解未知氮和无机氮的转化量却高于OM^{*}处理的30%,相较而言提高了25%。有研究表明^[34-35],土壤可矿化氮主要来自氨基酸态氮、酸解性铵态氮和酸解性未知氮,这些形态氮和无机氮都属于有效态氮。联系本研究结果说明,有机肥培肥土壤效果明显,有机无机配施可促进有机肥氮素向有效态氮转化,从而提高有机肥的有效性。所以,有机无机肥配施是土壤培肥的有效途径,可提高有机肥资源利用,降低环境污染风险。

4 结论

通过外源氮素在典型潮土中向土壤有机氮和无机氮(铵态氮和硝态氮)各形态的转化与分配的研究,结果表明:

(1)施肥能提高土壤全氮及其中无机氮(铵态氮和硝态氮)的含量,其中有机肥作用明显。

(2)外源氮均提高了土壤各形态有机氮的含量,尤其有机肥能显著增加土壤酸解性有机氮和酸解性铵态氮;各形态有机氮占全氮的比例变化较小,处于动态平衡。

(3)外源化肥氮直接影响土壤酸解性铵态氮和非酸解性有机氮含量的变化;外源有机氮对土壤非酸解性有机氮和酸解未知氮含量的变化起主导作用;当有机无机肥料配施情况下,在土壤酸解未知氮含量的变化中有机肥氮起主要作用。

(4)土壤铵态氮和硝态氮的变化均主要由外源氮转化而来。单施化肥情况下分别有27%的土壤铵态氮和硝态氮来自外源化肥氮的转化,单施有机肥情况

下分别有8%的土壤铵态氮和硝态氮来自外源有机肥氮的转化,有机无机肥配施处理中分别有5%的土壤铵态氮和硝态氮来自外源有机肥氮的转化。

(5)有机无机配施促进有机肥向土壤有效态氮转化,提高有机肥有效性,是土壤培肥的有效途径,可提高有机肥资源利用,减少环境风险。

参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 第二版, 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 23.
LU Jing-ling. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 23.
- [2] 朱兆良. 土壤氮素[M]//熊毅, 李庆奎编. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1988: 464-486.
ZHU Zhao-liang. Soil nitrogen [M]//XIONG Yi, LI Qing-kui edited. China Soil. Beijing: Science Press, 1988: 464-486.
- [3] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 中国土壤与肥料, 2006(1): 3-8.
HUANG Hong-xiang, LI Shu-tian, LI Xiang-lin, et al. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(1): 3-8.
- [4] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.
- [5] Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen[C]//Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils. Madison W is USA: Am Soc of Agron Inc, 1982: 67-122.
- [6] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 等. 长期施肥对黄土高原黑垆土有机氮和有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 672-675.
XIAO Wei-wei, FAN Xiao-hui, YANG Lin-zhang, et al. Response of soil organic nitrogen forms and organic carbon to long-term fertilization in dry highland of loess plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 672-675.
- [7] 张俊清, 朱平, 张夫道. 有机肥和化肥配施对黑土有机氮形态组成及分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 245-249.
ZHANG Jun-qing, ZHU Ping, ZHANG Fu-dao. Effect of organic manure and chemical fertilizer combined application on the form and distribution of organic nitrogen of black soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 245-249.
- [8] 李峰, 王凯荣. 红壤丘陵区稻田不同施肥模式对水环境影响的检测评价[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 67-71.
LI Feng, WANG Kai-rong. Assessment of risk of different fertilization models in rice field on water environment pollution in a sloped red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 67-71.
- [9] 张玉玲, 陈温福, 虞娜, 等. 长期不同土地利用方式对潮棕壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 740-747.
ZHANG Yu-ling, CHEN Wen-fu, YU Na, et al. Effect of long-term land use fractionation and profile distribution of organic nitrogen in

- aquic brown soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 740-747.
- [10] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[C]//Black C A. ed. Methods of soil analysis. Wisconsin, USA: Am Soc Agro, 1965: 1238-1254.
- [11] 张夫道. 有机和无机氮在土壤-水稻系统中平衡的研究: I. 有机氮和无机氮在土壤-水稻系统中的动态和分布[J]. 土壤肥料, 1994(4): 10-13.
- ZHANG Fu-dao. The research of organic and inorganic balance in soil-rice system: I. Trends and distribution of organic and inorganic in soil-rice system[J]. *Soils and Fertilizers*, 1994(4): 10-13.
- [12] 周瑞庆, 陈开铁, 李合松, 等. 应用 ^{15}N 示踪技术研究水稻对氮素的吸收利用[J]. 湖南农学院学报, 1991, 17(4): 665-669.
- ZHOU Rui-qing, CHEN Kai-tie, LI He-song, et al. Nitrogen absorption rate of rice plants with ^{15}N labeling[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1991, 17(4): 665-669.
- [13] 付会芳, 李生秀. 土壤氮素矿化与土壤供氮能力: IV. 土壤有机氮组分及其矿化[J]. 西北农业大学学报, 1992, 20: 63-67.
- FU Hui-fang, LI Sheng-xiu. Soil nitrogen mineralization and N-Supplying capacities: IV. The organic N components and their mineralization[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agricultural University*, 1992, 20: 63-67.
- [14] 郝晓晖, 肖宏宇, 苏以荣, 等. 长期不同施肥稻田土壤的氮素形态及矿化作用特征[J]. 浙江大学学报, 2007, 33(5): 544-550.
- HAO Xiao-hui, XIAO Hong-yu, SU Yi-rong, et al. Characteristics of nitrogen forms and mineralization in paddy soils of long-term fertilization experiment[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2007, 33(5): 544-550.
- [15] 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 Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 87-91.
- [16] 孙天聪, 李世清, 邵明安, 等. 半湿润农田生态系统长期施肥对土壤团聚体中有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2233-2238.
- SUN Tian-cong, LI Shi-qing, SHAO Ming-an, et al. Effects of long-term fertilization and distribution of organic nitrogen components in soil aggregates in sub-humid agro ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(18): 2233-2238.
- [17] 王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1173-1180.
- WANG Yuan, ZHOU Jian-bin, YANG Xue-yun. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(6): 1173-1180.
- [18] 田秀平, 薛菁芳, 韩晓日. 长期轮作和连作对白浆土中氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 185-187.
- TIAN Xiu-ping, XUE Jing-fang, HAN Xiao-ri. Effects of long-term crop rotation and continuous cropping on nitrogen in albic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 185-187.
- [19] 梁国庆, 林葆, 林雄继, 等. 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 Guo-qing, LIN Bao, LIN Ji-xiong, et al. Effect of long-term fertilization on the forms of nitrogen in calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 3-10.
- [20] 杜连凤, 张维理, 武淑霞, 等. ^{15}N 标记有机肥的制备及其质量[J]. 中国土壤与肥料, 2006(3): 64-65.
- DU Lian-feng, ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, et al. The producing process and its quality of ^{15}N labeled organic fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(3): 64-65.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 152-156.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 152-156.
- [22] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264-270.
- JU Xiao-tang, PAN Jia-rong, LIU Xue-jun, et al. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat-summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 264-270.
- [23] 岳现录. 华北平原小麦/玉米轮作中有机肥的氮素利用与去向研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- YUE Xian-lu. Study on nitrogen fate and efficiency of organic manure in wheat-maize rotation in North China plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [24] 王岩, 蔡大同, 史瑞和. 肥料残留氮的有效性及其与形态分布的关系[J]. 土壤学报, 1993, 30(1): 19-25.
- WANG Yan, CAI Da-tong, SHI Rui-he. Availability of fertilizer residual-N and its relationship with distribution of residual N fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1): 19-25.
- [25] 肖伟伟, 范晓辉, 杨林章, 等. 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): 274-280.
- XIAO Wei-wei, FAN Xiao-hui, YANG Lin-zhang, et al. Effects of long-term fertilization on organic nitrogen fractions and organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 274-280.
- [26] 高晓宁, 韩晓日, 刘宁, 等. 长期定位施肥对棕壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2820-2827.
- GAO Xiao-ning, HAN Xiao-ri, LIU Ning, et al. Effects of long-term fertilization on organic nitrogen forms and their distribution in profile of a brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2820-2827.
- [27] 张俊清. 长期施肥对我国主要土壤有机氮磷形态与分布的影响[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2003.
- ZHANG Jun-qing. Effects of long-term fertilization on the forms and distribution of organic nitrogen and phosphorus in several typical soils in China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2003.
- [28] 徐阳春, 沈其荣, 菲泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 25(4): 403-409.
- XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, MAO Ze-sheng. Contents and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 25(4): 403-409.

- [29] 黄东迈, 朱培立. 有机氮各化学组分在土壤中的转化[J]. 江苏农业学报, 1956, 2(2): 17-25.
- HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li. Transformation and distribution of organic nitrogen forms in soil[J]. *Agricultural Journal of Jiangsu*, 1956, 2(2): 17-25.
- [30] 沈其荣, 史瑞和. 不同土壤有机氮的化学组分及其有效性的研究[J]. 土壤通报, 1990, 21(2): 54-57.
- SHEN Qi-rong, SHI Rui-he. The study of chemical constituents and availability of organic nitrogen in different soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, 21(2): 54-57.
- [31] Kelley K R, Stevenson F J. Forms and nature of organic N in soil[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 42: 1-11.
- [32] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 99-104.
- JI Jing-hong, ZHANG Yu-long, HUANG Yi, et al. Effect of different irrigation methods on farms and profile distribution of soil organic nitrogen in protected field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 99-104.
- [33] 富英东, 田秀平, 薛菁芳, 等. 长期施肥与耕作对白浆土有机氮组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1127-1131.
- FU Ying-dong, TIAN Xiu-ping, XUE Jing-fang, et al. Effects of long-term culture fertilization and tillage patterns on the speciation of organic nitrogen in albic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1127-1131.
- [34] 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 Ju-mei, LI Sheng-xiu. Relation of mineralizable N to organic N components[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 158-164.
- [35] 彭令发, 郝明德, 来璐. 长期施肥对土壤有机氮影响研究: I. 氮肥及其配施下土壤有机氮组分变化[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 53-54.
- PENG Ling-fa, HAO Ming-de, LAI Lu. Studies of long-term fertilization on soil organic N components: I. The variation of soil organic N components of N fertilizer and its mixture[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 53-54.