

木质素对尿素在土壤中的转化及生物利用的影响

张 杰¹, 汪 洪¹, 刘继培¹, 刘 佳¹, 刘荣乐²

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部作物营养与施肥重点开放实验室,北京 100081; 2.中国农业科学院研究生院,北京 100081)

摘 要:采用田间试验方法,研究了木质素施入土壤后对尿素转化及冬小麦生物量、氮素营养的影响。结果表明,木质素能调控无机态氮释放,表现出在冬小麦返青期施用木质素的土壤无机态氮含量较低而拔节期较高的趋势。施用木质素后土壤无机态氮的动态变化情况,有利于促进冬小麦的氮素吸收,促进植株对氮素的吸收利用。木质素提高了冬小麦生物量最大积累速率,其中铵法木质素提高了 29%,碱法木质素提高了 13%。铵法木质素、碱法木质素处理与化肥相比,氮肥农学利用率、氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮素吸收强度都有所提高,且铵法木质素比碱法木质素效果明显。

关键词:木质素;土壤氮;氮素营养;冬小麦

中图分类号:X793 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2147-06

The Effects of Application of Lignin on Transformation of Urea in Soil and Biological Utilization

ZHANG Jie¹, WANG Hong¹, LIU Ji-pei¹, LIU Jia¹, LIU Rong-le²

(1.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Beijing 100081, China; 2.The Graduate School Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: A field trial was carried out to determine the effects of amendments two kinds of lignin, one was from ammonium sulfide pulping process and the other was from Kraft pulping process, on urea transformation and nitrogen availability in soil. Results showed that lignin could regulate nitrogen release. Compared with no-lignin application treatment, lignin application could decrease the content of inorganic nitrogen in the soil during the regreening stage of winter wheat but increase the content of inorganic nitrogen in the soil during jointing stage. The changes of soil inorganic nitrogen content after lignin application could benefit the nitrogen uptake and improve the soil nitrogen supplying for winter wheat during the rapid growing stages. Application of ammonium lignin and alkali lignin increased the maximum accumulation rate of biomass by 29%,19% respectively. Lignin application could promote N uptake of plant and increase N agronomic efficiency, apparent N recovery efficiency and partial factor productivity of N fertilizer. The effect of ammonium lignin on urea transformation and nitrogen availability was more obvious than alkali lignin.

Keywords: lignin; soil nitrogen; nitrogen nutrition; winter wheat

目前我国肥料以速效肥为主,氮肥利用率仅为 30%~40%,有 60%~70%被土壤固定及经氨挥发和淋溶损失掉,不仅造成了大量营养元素的浪费,而且引发了环境污染等一系列问题^[1]。随着农业形态的改变,农民堆肥、圈肥施用量的减少,致使农田瘠薄,因而对有机肥料的需求量大大增加。木质素作为一种有机化

合物,其农用及在农业肥料改良方面的作用越来越受到广泛的关注^[2]。

制浆造纸工业产生的木质素,主要存在于制浆废液中。国外以木材为造纸原料,造纸废液进行碱回收,还可将木质素燃烧转变成热能,所以造纸废液不会对环境造成污染。我国以麦草、稻草为主,草类制浆产生的废液具有有机物浓度大、难降解物比例高、硅含量高特点,很难进行碱回收^[3],这些制浆造纸废液难于处理,如不经处理直接排放则会造成严重环境污染。制浆造纸废液主要有有机成分是木质素。木质素的结构复杂,目前,对木质素结构还尚未完全弄清,经过光谱

收稿日期:2010-04-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)课题(2008AA06Z307)

作者简介:张 杰(1983—),女,山东济南人,在读硕士研究生,主要从事土壤肥力管理研究。E-mail:mn_zhangjie@sina.com

通讯作者:刘荣乐 E-mail:rl Liu@caas.net.cn

法、生物合成、模型物法等多种方法研究发现,木质素是由苯基丙烷结构单元构成的具有三维空间结构的天然高分子化合物^[4]。在土壤中,木质素在土壤微生物作用下经历腐殖化过程,其分解产物及形成的腐殖质对土壤理化性状产生影响。经过制浆工艺过程,废液中木质素的大分子链已经不同程度降解,结构单元上有较多的酚羟基、磺酸基、羧基和羰基,经过氧化处理还形成了醌类结构^[5]。造纸制浆过程产生的木质素的特性与纤维原料、制浆方法、工艺条件以及木质素的分离提取方式有密切关系^[6]。

本文通过田间试验研究不同制浆工艺方法获得的两种木质素对土壤无机态氮、冬小麦生物量积累、氮素吸收的影响,以期对造纸废液资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试木质素取自山东某造纸厂,鉴于制浆方法中脱木质素的工艺不同,采用了由两种工艺方法获得的木质素进行试验。铵法木质素(A)通过对亚硫酸铵法麦草制浆黑液蒸发、浓缩获得;碱法木质素(J)通过对传统碱法麦草制浆黑液蒸发、浓缩获得。供试木质素基本理化性质见表 1。

供试土壤基本理化性质为:有机质 1.18%, pH8.04,全氮 1.14 g·kg⁻¹,全磷 9.97 g·kg⁻¹,全钾 20.05 g·kg⁻¹,水解氮 74.40 mg·kg⁻¹,有效磷 21.63 mg·kg⁻¹,速效钾 416.13 mg·kg⁻¹。

1.2 方法

1.2.1 试验方法

田间试验于山东聊城高唐县冬小麦-夏玉米试验地进行,小区为随机分布,面积为 30 m²(5 m×6 m)。

试验设 4 个处理,分别为(1)CK,(2)单施化肥(N),(3)铵法木质素与化肥配施(A+N),(4)碱法木质素与化肥配施(J+N),3 次重复。每个处理的磷、钾肥施用量均为 P₂O₅135 kg·hm⁻²、K₂O90 kg·hm⁻²,除 CK 外氮肥施用量均为 N225 kg·hm⁻²,A+N、J+N 处理木质

素施用量为 3 000 kg·hm⁻²。氮肥 1/2 基施,1/2 拔节期追施,磷、钾肥和木质素全部基施。氮肥为尿素,磷肥为一铵,钾肥为氯化钾。于 2007 年 10 月 30 日播种,作物为冬小麦(聊麦-18),分别在返青期(3 月 28 日)、拔节期(4 月 28 日)、灌浆期(5 月 27 日)、成熟期(6 月 10 日)取样,土壤样品分风干样和新鲜样分别保存,植株 105 ℃杀青 30 min,75 ℃烘干后磨碎过 0.25 mm 保存。室内分析于农业部作物营养与施肥重点开放实验室进行。

1.2.2 分析方法

土壤铵态氮、硝态氮经 KCl 浸提(称取 10.00 g 新鲜土样于三角瓶中,加入 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提剂 50 mL,振荡 30 min 后过滤),铵态氮用靛酚蓝比色法测定,硝态氮用紫外分光光度计法测定。

植株全氮经 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,用半自动定氮仪测定^[7]。

1.2.3 数据分析

试验数据采用 SPSS16.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 木质素对土壤无机态氮的影响

土壤无机态氮包括铵态氮、硝态氮和亚硝态氮,因亚硝化作用和硝化作用是两个相互伴随发生的过程,通常亚硝态氮含量很低,故试验中将其略去,将土壤铵态氮含量与硝态氮含量之和看作土壤无机态氮含量。

图 1 反映的是木质素对土壤无机态氮的影响。总的来看,各处理土壤无机态氮含量均呈返青期较高,拔节期降低,灌浆期达到最低,成熟期有所回升的趋势,这与伊崇仁和胡田田的研究结果一致^[8-9]。由于冬小麦越冬期生长缓慢,吸氮能力很弱,返青期土壤无机态氮含量较高,返青后至拔节期随着气温的升高,冬小麦开始快速生长,对氮素营养的需求增多,植株吸氮能力增强,造成土壤无机态氮含量降低;灌浆期到成熟期冬小麦养分积累基本完成,对氮素营养需求减少,但土壤中的矿化作用继续进行,有机态氮转化

表 1 木质素理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of lignin

木质素 lignin	有机质 OM/%	全氮 Tot.N/%	有效磷 Avail.P/%	速效钾 Avail.K/%	腐植酸 Humic acid/%	pH
A(铵法木质素 ammonium lignin)	58.8	3.03	0.20	5.83	35.3	6.02
J(碱法木质素 alkali lignin)	41.9	0.72	0.20	2.53	33.9	9.46

注:表中有效磷、速效钾均为氧化态。

Note: Available P and K were oxidation state.

成无机态氮,这可能是导致成熟期土壤无机态氮含量比灌浆期升高的原因。

各处理间没有显著差异,但表现出一定的规律性。返青期单施化肥处理土壤无机态氮含量较高,为 $127.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,木质素处理较低,为 $117.15 \sim 118.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。拔节期各处理土壤无机态氮含量均有所下降,单施化肥处理下降幅度最大,为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而木质素处理下降幅度较小,为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。灌浆期各处理土壤无机态氮含量基本一致,为 $33.92 \sim 35.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。灌浆期至成熟期各处理土壤无机态氮含量均有升高,但木质素处理高于单施化肥处理。

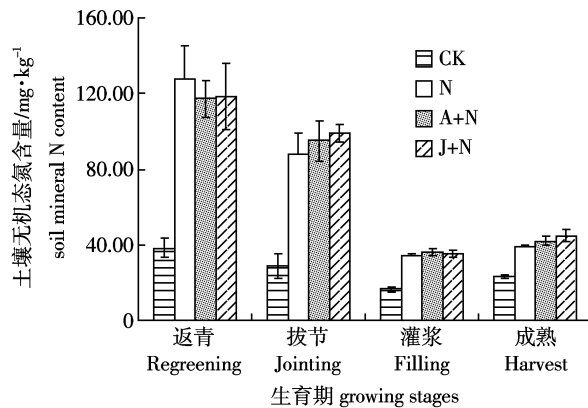


图 1 木质素对土壤无机态氮的影响

Figure 1 The effects of lignin on soil mineral N

2.2 木质素对植株生物量的影响

随着冬小麦生长发育的进行,其生物量在整个生育期都呈增加趋势。返青期外界温度依然较低,冬小麦生物量缓慢增加,拔节期后随着温度的升高冬小麦生长加快,其生物量也迅速增加,到成熟期达到最大,但是不同处理之间其生物量差异较大(表 2)。整个冬小麦生育期内不同处理生物量大小顺序为铵法木质素处理>碱法木质素处理>单施化肥处理>CK。返青期 CK 生物量最低,施肥处理之间生物量没有显著差异。到成熟期与单施化肥处理相比,铵法木质素处理冬小麦生物量比化肥处理提高了 17%,且差异显著,碱法木质素有增加冬小麦生物量的趋势,但未达到差异显著水平。

2.3 生物量积累回归分析

植物的源是指能进行光合作用或能合成有机物质,为其他器官提供营养的部位(如成熟的绿色叶片);库则是指消耗和储存光合产物和有机物的部位(如根、茎、种子或果实)^[10]。源库状况最直接的反映莫

表 2 木质素对植株生物量的影响($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 The effects of lignin on the biomass of plant ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	返青 Regreening	拔节 Jointing	灌浆 Filling	成熟 Harvest
CK	432±13b	3 513±224a	7 005±290b	7 629 ±412c
N	568±79a	4 042±129a	9 567±922a	11 298 ±566b
A+N	550±33a	4 303±1024a	11 414±1 767a	13 220 ±119a
J+N	526±64ab	4 308±308a	10 339±471a	11 827 ±325b

注:纵向不同字母表示 $P < 5\%$ 水平,下同。

Note: Different letters mean significant at 5% level, the same as below.

过于生物量积累动态。对冬小麦从返青期到成熟期这一阶段的生物量积累进行回归分析,用 Logistic 方程 $y = k / (1 + ae^{-bx})$ 加以描述(式中 y 为生物积累量, x 为返青后生长时间, a 、 b 、 k 为待定参数,均通过 SPSS 统计软件拟合求得)。获得的经验方程经 F 检验,均达到显著水平,对 Logistic 方程求时间导数,可以得到生物量增长速率方程:

$$dy/dx = d(ae^{-bx}) = ae^{-bx}(-b/x)' = ae^{-bx} \cdot b/t^2 = 1/x^2 abe^{-bx}$$

将不同时间生物量及所确定的 a 、 b 参数的相应值代入上述速率方程,可求出不同时间生物量积累速率;以生物量积累速率为纵坐标,以时间为横坐标,可以得到冬小麦植株生物量积累速率曲线。通过图 2 可以看出,各处理冬小麦返青后生物量积累速率均呈“S”型曲线,表现为“慢-快-慢”的规律。即返青期生物量积累较慢,随着冬小麦的生长发育,其生物量积累速率也随之增加,当积累速率达到最大后又呈下降趋势,到成熟期,生物量积累速率比较趋近于横轴,表明冬小麦生物量积累能力已经很弱。

对生物量增长速率方程求导得生物量最大积累速率出现时间 $x_{\max} = -\ln(ab)$,代入生物量增长速率方

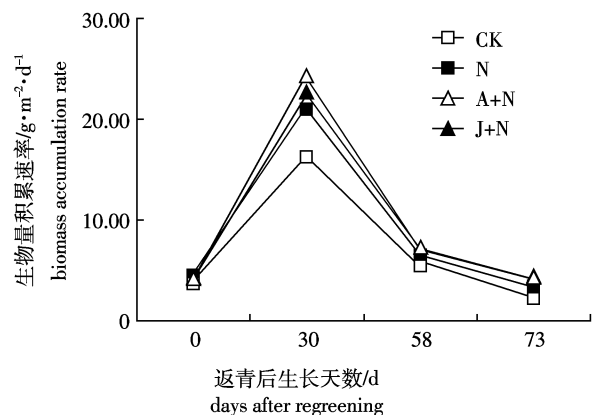


图 2 木质素对植株生物量积累速率的影响

Figure 2 The effects of lignin on biomass accumulation rate of plant

程可得生物量最大积累速率 $y_{\max}=k \cdot b/4$ 。由表 3 可以看出, b 对 y 影响十分有限, k 可以引起 y 的明显差异, 反映了木质素化肥配施处理引起的植株生物量的变化。CK 生物量最大积累速率最低, 为 $16.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 铵法木质素处理、碱法木质素处理生物量最大积累速率较高, 与单施化肥处理相比分别提高了 29%、13%。CK 生物量最大积累速率出现时间最早, 在返青后第 32.6 d, 化肥处理为 40.5 d, 铵法木质素处理、碱法木质素处理生物量最大积累速率出现时间比单施化肥处理分别提早 0.1、2.2 d。

2.4 木质素对植株含氮量的影响

由表 4 可知, 在冬小麦整个生育期进程中, 植株含氮量呈逐渐降低的趋势, 这主要是因为作物养分百分含量取决于养分吸收速率和生物量积累速率。一般来说, 冬小麦生长过程中, 由于生物量积累速度大于氮素吸收速度, 植株氮含量呈下降趋势。返青期植株含氮量最高, 之后迅速下降, 灌浆期下降较缓。整个生育期 CK 植株含氮量总体上最低, 其他处理均未达到差异显著水平, 说明木质素施用不影响冬小麦植株对氮素的吸收。

2.5 木质素对植株吸氮量的影响

冬小麦吸氮量是植株生物量与含氮量的综合反映。由图 3 可以看出, 返青期植株吸氮量最低; 拔节期到灌浆期随着冬小麦的快速生长, 植株吸氮量迅速提高; 灌浆期后冬小麦的生长中心发生转移, 氮素主要以体内转移的方式供给穗部生长, 植株吸氮能力逐渐

减弱; 成熟期与灌浆期持平或略有下降。不同处理间返青期植株吸氮量差异不显著, 拔节期 CK 植株吸氮量显著低于其他处理, 施肥处理大小顺序为铵法木质素处理>碱法木质素处理>单施化肥处理, 但没有显著差异, 随着生育期的进行这一趋势越加明显。到成熟期铵法木质素处理、碱法木质素处理植株吸氮量比单施化肥处理分别提高 25%、8%。

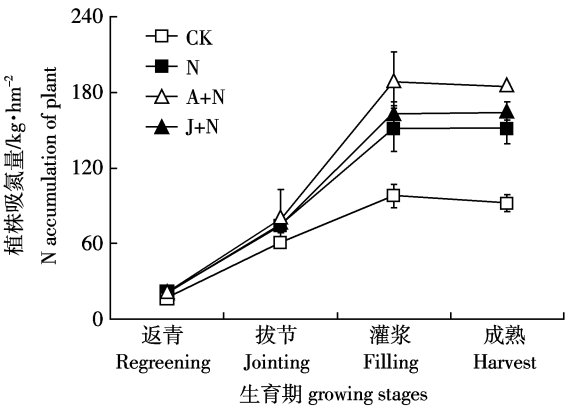


图 3 木质素对植株吸氮量的影响

Figure 3 The effects of lignin on N accumulation of plant

2.6 木质素对冬小麦氮肥利用率的影响

产量与氮肥利用率之间呈显著或极显著正相关^[1]。氮肥农学利用率是表征施肥对产量增加效果的指标, 氮肥表观利用率能反映肥料施用量是否合理。由表 5 可知, 铵法木质素处理氮肥农学利用率、氮肥表观利用率、氮肥偏生产力比单施化肥处理分别提高了 4.20

表 3 植株生物量积累的 Logistic 方程回归分析

Table 3 The Logistic equation analysis for biomass accumulation of plant

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	最大积累速率 HAR/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	最大积累速率出现的天数 The day of HAR/d
CK	$y=785/(1+15.924 \cdot 6e^{-0.085x})$	0.997	16.68	32.6
N	$y=1 \ 238/(1+17.746e^{-0.071x})$	0.998	21.97	40.5
A+N	$y=1 \ 419/(1+25.342e^{-0.080x})$	0.998	28.38	40.4
J+N	$y=1 \ 258/(1+20.625e^{-0.079x})$	0.998	24.85	38.3

注: HAR 表示最大累积速率。
Note: HAR means the highest accumulation rate.

表 4 木质素对植株含氮量的影响(%)

Table 4 The effects of lignin on N content of plant(%)

处理 Treatment	返青 Regreening	拔节 Jointing	灌浆 Filling	成熟 Harvest	
				秸秆 Straw	籽粒 Grain
CK	3.63±0.20a	1.70±0.08a	1.39±0.08b	0.53±0.04b	1.91±0.06b
N	3.90±0.34a	1.83±0.16a	1.58±0.04a	0.69±0.09a	1.99±0.05ab
A+N	3.98±0.30a	1.88±0.23a	1.67±0.15a	0.73±0.06a	2.10±0.09a
J+N	3.99±0.22a	1.80±0.07a	1.58±0.07a	0.71±0.03a	2.11±0.12a

kg grain·kg⁻¹、15.73 个百分点和 4.19 kg grain·kg⁻¹,碱法木质素处理分别提高了 0.94 kg grain·kg⁻¹、6.40 个百分点和 0.94 kg grain·kg⁻¹。氮素吸收强度表示在整个生育期内植株吸收氮素的能力。铵法木质素处理氮素吸收强度比单施化肥处理提高了 23%,碱法木质素处理提高了 9%。氮素收获指数指籽粒吸氮量占植株吸氮量的比例,其大小反映了冬小麦生长后期氮素由营养器官向籽粒转移的强度。各处理氮素收获指数没有明显差异,说明木质素处理营养体氮素也可以及时向籽粒转移,没有造成冬小麦贪青晚熟。

3 讨论

在北方干旱半干旱碱性土壤中,土壤铵态氮、硝态氮是重要的无机态氮存在形式,且在表土中含量最高^[12],土壤对无机态氮吸附与解吸的能力与植物吸收利用氮素密切相关^[13]。土壤无机态氮是土壤有效氮的重要来源,是评价土壤供氮水平的良好指标,但也是较易损失的氮素形式。施用木质素后土壤无机态氮含量在冬小麦生育前期较高,这可能是因为一方面木质素结构中含有醌基,能起到脲酶抑制剂的作用,在一定程度上抑制尿素的水解,减缓无机态氮的释放,而且木质素具有硝化抑制剂的作用,使土壤中氮素较长时间以铵态氮的形式保存,而土壤对氮素的固定作用主要是针对铵态氮进行的,所以木质素处理土壤中的氮素更多地被粘土和生物固定起来;另一方面木质素大分子结构中還含有一定量的酚羟基和羧基等具有吸附作用的官能团,可以吸附土壤中的无机态氮^[14]。综合上述原因土壤无机态氮含量低于单施化肥处理。

冬小麦生育中后期,添加木质素土壤无机态氮含量较高,这可能是因为气温的升高,土壤微生物活跃,冬小麦生育前期木质素处理土壤中被固定的较多的氮素经矿化作用释放出来,补充了土壤无机态氮的含量。

土壤有机态氮矿化成无机态氮和无机态氮固定成有机态氮的过程是土壤氮素内循环的核心。施肥后土壤能供给作物的氮素主要包括:一是肥料提供的无机态氮,二是土壤中存在的无机态氮,三是土壤有机态氮在作物生长期间的矿化。¹⁵N 试验表明,作物吸氮量中来自于土壤矿化的比例一般占 50%~80%^[15]。可见木质素化肥配施处理土壤在冬小麦生长初期固定了更多的氮,在返青后逐渐释放出来,在一定程度上满足冬小麦拔节、灌浆对氮素的大量需求,促进其生长,这有助于调控冬小麦整个生育期内的氮素供应。

不同处理冬小麦返青后生物量瞬时积累速率不同,但均呈“S”型曲线,所以施用木质素并没有改变冬小麦生物量累积规律,只协调作物的生长发育。施用木质素对冬小麦生物量有增加的趋势,而且铵法木质素较碱法木质素效果明显,这可能是供试物料及供试土壤酸碱性引起的。铵法木质素为酸性,碱法木质素为碱性,而本试验选用的供试土壤为北方的潮土,其 pH 为 8.04,这就给铵法木质素效果的表现提供了有利条件。

4 结论

(1)木质素能够调控尿素施入土壤后无机态氮的释放速度,降低冬小麦生育前期土壤无机态氮含量,降低挥发和淋溶污染环境的风险,在冬小麦生育中后

表 5 木质素对植株氮肥利用率的影响

Table 5 The effects of lignin on nitrogen fertilizer use efficiency of plant

处理 Treatment	氮肥农学利用率/kg grain·kg ⁻¹ Nitrogen fertilizer agronomic efficiency	氮肥表观利用率/% Nitrogen fertilizer apparent efficiency	氮肥偏生产力/kg grain·kg ⁻¹ Nitrogen partial factor productivity	氮素吸收强度/kg·hm ⁻² ·d ⁻¹ Nitrogen absorption intensity	氮素收获指数/% Nitrogen harvest index
N	8.21	26.16	24.81	0.69	73.65
A+N	12.41	41.89	29.00	0.85	73.60
J+N	9.15	32.56	25.75	0.75	73.94

注:氮肥农学利用率(kg·kg⁻¹)=(施氮区域产量-不施氮区域产量)/区域施氮量;氮肥表观利用率(%)=(施氮区域地上部吸氮量-不施氮区域地上部吸氮量)/区域施氮量×100;氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹)=施氮区域产量/区域施氮量;氮素吸收强度(kg·hm⁻²·d⁻¹)=区域地上部吸氮量/生长天数;氮素收获指数(%)=籽粒吸氮量/植株吸氮量×100

Nitrogen fertilizer agronomic efficiency (kg·kg⁻¹)=(Grain yield in the plot received N fertilizer-grain yield in the zero-N control)/the amount of fertilizer N applied; Nitrogen fertilizer apparent efficiency (%)=(Total N accumulation above ground plant in the plot received N fertilizer-total N accumulation above ground plant in the zero-N control)/the amount of fertilizer N applied×100; Nitrogen partial factor productivity(kg·kg⁻¹)=Grain yield in the plot received N fertilizer/ the amount of fertilizer N applied; Nitrogen absorption intensity(kg·hm⁻²·d⁻¹)=Total N accumulation above ground plant in the plot/growth days; Nitrogen harvest index(%)=N in grain/total N accumulation in plant ×100

期提高土壤无机态氮含量。

(2)施用木质素不改变冬小麦生物量累积规律,只协调作物的生长发育。木质素对冬小麦生物量有增加的趋势,而且铵法木质素较碱法木质素效果明显,并且生物量最大积累速率出现时间也略早于不施木质素处理。

(3)木质素能提高冬小麦植株含氮量、吸氮量,从而使使得氮肥农学利用率、氮肥表观利用率、氮肥偏生产力都得到相应的提高,铵法木质素效果较碱法木质素明显。

参考文献:

- [1] 陈同斌,陈世庆,徐鸿涛,等. 中国农用化肥氮磷钾需求比例的研究[J]. 地理学报, 1998, 53(1):32-41.
CHEN T B, CHEN S Q, XU H T, et al. Simulation study on ratios of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers required in the crop production in China[J]. *Geography Science*, 1998, 53(1):32-41.
- [2] 梁国治,李广学,孙文娟. 木质素在农业中的研究进展[J]. 应用化工, 2006, 1(1):1-4.
LIANG G Z, LI G X, SUN W J. Progress of lignin in agriculture[J]. *Applied Chemical Industry*, 2006, 1(1):1-4.
- [3] 曾育才,张学先,刘小玲. 造纸黑液木质素及其综合利用[J]. 广东化工, 2005(10):11-15.
Zeng Y C, Zhang X X, Liu X L. Lignin and its comprehensive utilization[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2005(10):11-15.
- [4] 张健中,罗勤慧. 木质素酶及其化学模拟的研究进展[J]. 化学通报, 2001(8):470-477.
ZHANG J Z, LUO Q H. The review of ligninase and its chemical model[J]. *Chemistry Science*, 2001(8):470-477.
- [5] 刘学苏,李广学. 木质素的应用进展[J]. 广州化工, 2005, 33(4):9-11.
LIU X S, LI G X. Development of the application of lignin[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2005, 33(4):9-11.
- [6] 谭 东. 木质素的提取及应用[J]. 广西化工, 1994, 23(4):6-13.
TAN D. Extraction and application of lignin[J]. *Guangxi Chemical Industry*, 1994, 23(4):6-13.
- [7] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业科学出版社, 2000.
Lu R K. Analytical methods of soils and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000.
- [8] 伊崇仁. 作物营养化学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 1993.
YIN C R. Chemistry of crop nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1993.
- [9] 胡田田,李 岗,韩思明,等. 冬小麦氮磷营养特征及其与土壤养分动态变化的关系[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(4):47-50.
HU T T, LI G, HAN S M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus absorption by winter wheat and its relation with dynamic change of soil nutrition[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(4):47-50.
- [10] 陆景陵. 植物营养学(上)[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2004.
LU J L. Plant nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2004.
- [11] Montemurro F, Maiorana M, Ferri D, et al. Nitrogen indicators, uptake and utilization efficiency in a maize and barley rotation cropped at different levels and sources of N fertilization[J]. *Field Crop Research*, 2006, 99(2-3):114-124.
- [12] 杨小红,董云社,齐玉春,等. 内蒙古羊草草原土壤净氮矿化研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2):27-30.
YANG X H, DONG Y S, QI Y C, et al. Soil net nitrogen mineralization in an *aneulolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia[J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(2):27-30.
- [13] Wang F L, Alva A K. Ammonium adsorption and desorption in sandy soils[J]. *Soil Science Society*, 2000, 64(5):1669-1674.
- [14] 王海洋,陈克利. 木质素的综合利用概况与分析[J]. 化工时刊, 2004, 18(4):8-10.
WANG H Y, CHEN K L. The development of the comprehensive utilization of lignin[J]. *Chemical Industry Time*, 2004, 18(4):8-10.
- [15] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤氮素矿化及预测[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2):2241-2245.
JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Soil nitrogen mineralization and its prediction in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2):2241-2245.