

氮肥种类和用量对黄河三角洲玉米产量及氮肥利用率的影响

苗琪¹, 于宝超², 孙福来³, 张济世¹, 薛艳芳⁴, 崔振岭^{1*}

(1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2 淮安市淮安区农业农村局, 江苏淮安 223200;
3 滨州市种子管理站, 山东滨州 256600; 4 山东省农业科学院玉米研究所, 山东济南 250100)

摘要:【目的】为解决黄河三角洲地区玉米氮肥合理施用问题, 在该地区田间条件下应用根层氮素实时监控技术, 结合施用不同种类氮肥, 研究不同施氮量及氮肥种类对玉米产量及氮素利用效率的影响, 为区域玉米生产氮素管理提供理论依据和技术支撑。【方法】于 2017—2018 年在山东省黄河三角洲农业高新技术产业示范区开展为期 2 年的田间试验, 以郑单 958 为供试品种, 设计双因素试验, 主处理为 5 个施氮水平, 分别为不施氮 (CK)、基于根层氮素实时监控技术的优化施氮 (Opt)、优化下调施氮 70% (Opt70%)、优化上调施氮 30% (Opt130%)、农民传统施氮 (FNP); 副处理为 3 个氮肥种类, 分别为硫酸铵 (AS)、硝酸铵钙 (CAN) 和尿素 (UREA)。于玉米六叶期 (V6) 和吐丝期 (VT) 分别采集 0—60 和 0—90 cm 土壤样品, 测定土壤硝态氮和无机氮含量。于收获期测定玉米产量、生物量、玉米植株和籽粒氮含量, 计算吸氮量及氮素利用效率。【结果】相比 FNP 处理, 2017 和 2018 年应用根层氮素实时监控技术的优化施氮处理分别降低氮肥用量 41% 和 63%, 而两处理间产量无显著差异。Opt 处理的生物量、籽粒氮含量、秸秆氮含量及吸氮量与 Opt130% 以及 FNP 处理无显著差异, 氮肥利用率显著高于 FNP, 两年氮收获指数分别提高 7 和 6 个百分点, 氮肥偏生产力分别提高 71% 和 190%, 氮肥回收利用率分别提高 32 和 34 个百分点。优化施氮水平下, 2017 年施用尿素和硝酸铵钙的玉米产量较施用硫酸铵提高 15% 和 8%。Opt 处理收获期土壤无机氮含量较 FNP 在两年分别降低 29% 和 39%。【结论】在黄河三角洲地区, 应用根层氮素实时监控技术能够在大幅度减少氮肥施用量的同时, 不明显降低籽粒产量, 进而提高氮肥利用率。在等氮量条件下, 硝酸铵钙和尿素在节肥增产方面的效果优于硫酸铵。

关键词: 玉米; 氮肥种类; 优化施氮; 氮肥利用率; 黄河三角洲

Effects of nitrogen fertilizer type and rate on maize yield and nitrogen use efficiency in the Yellow River delta

MIAO Qi¹, YU Bao-chao², SUN Fu-lai³, ZHANG Ji-shi¹, XUE Yan-fang⁴, CUI Zhen-ling^{1*}

(1 College of Resource and Environment Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2 Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Huaian Area, Huaian, Jiangsu 223200, China; 3 Seed Management Station of Binzhou City, Binzhou, Shandong 256600, China; 4 Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: 【Objectives】 In order to solve the problem of rational application of nitrogen (N) fertilizer in maize in the Yellow River Delta, we used the root layer real-time regulation technology of N and different fertilizer types to reveal the response of maize yield, N absorption and utilization efficiency and inorganic nitrogen content in surface soil under the field conditions. We also further discussed the effects of different N rates and N fertilizer types on maize yield and N efficiency in order to provide theoretical basis and technical support for the nitrogen management of regional maize production. 【Methods】 Two-year field experiment was carried out in the agricultural high-tech industry demonstration park in the Yellow River Delta of Shandong Province in 2017 and 2018. ‘Zhengdan 958’ was used as the test maize cultivar. We designed a two-factor experiment, the main factor treatment consisted of five N application levels as follows: no N application (CK), optimal N application (Opt),

收稿日期: 2019-06-27 接受日期: 2019-12-03

基金项目: 山东省重点科技创新项目 (2017CXGX0311); 山东省与以色列国际合作科技合作项目 (2015SDY0105); 国家重点研发计划 (2018YFD0200603); 山东省重点研发计划 (2017CXGC0304)。

联系方式: 苗琪 Email: 18255025980@163.com; * 通信作者 崔振岭 E-mail: cuizl@cau.edu.cn

70% of optimal N application (Opt70%), 130% of optimal N application (Opt130%), farmer traditional N application (FNP). The split plot consisted of three N fertilizer types, ammonium sulfate, calcium ammonium nitrate and urea. Soil samples were collected from 0–60 cm and 0–90 cm soil layers at the six-leaf (V6) and tasseling stage (VT) for rapid measurements of nitrate N and inorganic N contents. The yield and biomass of the maize were investigated, and N contents in maize plant and grain were measured at harvest stage, and N uptake and N use efficiency were calculated. **【 Results 】** According to the root layer real-time N regulation technology, the rates of fertilizer N were reduced by 41% and 63% in 2017 and 2018, compared with those in FNP, but the yield did not reduced significantly. There was no significant difference in biomass, grain N content, straw N content and N uptake among Opt, Opt130% and FNP. The N harvest index of Opt was increased by 7 and 6 percent points in two years, N partial productivity increased by 71% and 190%, and N utilization efficiency increased by 32 and 34 percent points, respectively compared with FNP. Compared with ammonium sulfate, the grain yield of urea and NH_4NO_3 under Opt treatment was increased by 15% and 8%, respectively in 2017. At maturity, the soil inorganic N contents in Opt treatment were decreased significantly by 29% in 2017 and 39% in 2018, compared with NFP. **【 Conclusions 】** The employment of the root layer real-time regulation technology in the Yellow River Delta could significantly reduce the N fertilizer rate without a significant effect on grain yield, thereby greatly improving the N use efficiency. Under the optimum N application rate, calcium ammonium nitrate, and urea are more efficient in grain yields than ammonia sulfate.

Key words: maize; nitrogen fertilizer type; optimized nitrogen fertilization; nitrogen use efficiency; the Yellow River Delta

玉米作为我国主要的粮食作物之一，在保障我国粮食和饲料安全方面发挥了不可替代的作用^[1]。随着人口的增长和居民生活水平的提高，未来对于玉米需求量将会进一步增加。施用氮肥作为当前农作物生产中的主要管理措施，在保证获得作物高产方面发挥着重要的作用。与此同时，农田土壤氮素资源具有来源多样性、去向多向性以及环境危害性、作物产量和品质对其反应敏感等特征^[2]。当前在我国的一些地区，由于农民对高产夏玉米的氮素需求规律认识不够以及农田氮肥推荐施用技术的普及率低等原因，导致氮肥用量及施用时期不合理问题凸显，造成资源的浪费和环境的污染^[3]。

黄河三角洲地处渤海之滨的黄河入海口，是我国三大河口三角洲之一，是较有代表性的滨海盐渍土区。由于该区域紧邻黄河，淡水资源相对丰富，使其成为易利用盐渍土类型^[4]。土壤盐碱化、氮磷钾养分失衡等问题制约着该地区粮食生产能力提升^[5-6]。该地区玉米种植有产量水平不高、肥料用量大的特点，2017年玉米单产仅为 6 t/hm^2 ，夏玉米的氮肥施用量高达 $\text{N } 280 \text{ kg/hm}^2$ ^[7-8]。因此，提高区域养分利用率尤其是氮肥利用率是区域玉米绿色种植的重要任务。

目前，针对土壤氮素的时空变异大和作物氮素吸收与根层土壤氮素供应难以同步的现状，从根层土壤养分调控的思路出发，根据高产作物氮素吸收

特征，实现来自土壤、环境和肥料的根层土壤氮素供应与作物氮素需求的同步，国内农田养分管理专家建立了以根层养分调控为核心的根层氮素实时监控技术，进行农田氮肥优化管理，力求实现玉米氮肥需求和根层氮素供应在时间上同步，数量上一致，空间上耦合^[9-10]。多年的田间试验结果表明，运用根层氮素实时监控技术能够在不减少作物产量的前提下显著降低氮肥用量，减少氮素向环境迁移^[9,11]。该项技术在地处华北平原腹地的山东、河南等地的148个玉米田间试验上其效果也得到了验证，与农民传统施氮相比可以减少氮肥用量40%~60%，提高作物产量4%~5%，减少氮素损失 $65 \sim 116 \text{ kg/hm}^2$ ^[9]。

植物生长发育所能吸收的氮素形态主要为硝态氮和铵态氮。对于作物来说，获取氮素最主要的方式是通过根系吸收硝态氮和铵态氮后同化为氨基酸满足作物生长发育需求。不同作物对铵态氮和硝态氮的喜好不同，有研究表明 NO_3^- 可以通过促进玉米侧根生长和叶片光合强度及蒸腾速率来增加生物量^[12]，也有研究表明， NH_4^+ 比 NO_3^- 更能促进玉米根系生长，相对有更高的生物量^[13]，还有学者认为作物在铵硝混合条件下比在单一氮营养条件下有更高的氮素吸收、干物质积累和经济产量，即铵硝混合可能更利于植物的生长^[14]。在温室盆栽条件下的研究表明，施用尿素比单施 NH_4^+ 和 NO_3^- 处理玉米苗期生物量增

加 10%^[15]。但受土壤类型、栽培条件、水分管理等因素影响, 施用不同形态氮肥对作物生长发育、产量和氮肥效应的影响的结果并不一致。黄河三角洲地区地理位置与土壤类型特殊, 针对该地区施用不同形态氮肥对玉米产量及氮效率的影响研究十分有意义。

因此, 本研究对基于土壤硝态氮测试的根层氮素实时监控技术在黄河三角洲地区适宜性进行验证, 同时通过改变氮肥种类进一步提高氮肥利用率。通过田间试验, 分析不同氮肥种类与施氮水平下玉米的产量、吸氮量、氮肥利用率、土壤无机氮等指标, 探讨适宜黄河三角洲区域玉米的氮素管理策略, 为该区域玉米生产氮素管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于 2017 和 2018 年在山东省黄河三角洲农业高新技术产业示范区科研试验基地 (118.65°E, 37.32°N) 进行。试验起始于 2016 年夏玉米, 设置 5 个施氮水平, 于当年冬小麦开始裂区试验。该试验为冬小麦/夏玉米一年两熟轮作体系, 供试玉米品种为郑单 958, 播种密度为 75000 株/hm², 行距为 60 cm, 玉米季为全生育期雨养无灌溉。2017 年夏玉米于 6 月 12 日播种, 10 月 3 日收获测产, 全生育期 113 天; 2018 年夏玉米于 6 月 13 日播种, 10 月 4 日收获测产, 全生育期 113 天。供试土壤为滨海轻度盐化草甸土, 供试土壤 0—30 cm 土层的基本理化性质如下: pH 为 7.71、有机碳 12.1 g/kg、全氮 1.72 g/kg、无机氮 18.3 mg/kg、速效磷 7.88 mg/kg、速效钾 395 mg/kg、电导率为 544 μS/cm。2017 和 2018 年玉米生育期日均气温和降水量见图 1, 两年玉米生育期总降水量分别为 286 和 746 mm。

试验为两因素裂区设计, 主处理为 5 个施氮水平, 分别为不施氮肥处理 CK; 基于根层氮素实时监控技术的优化施氮处理 (Opt)^[16]; 优化施氮量下调 30% (Opt70%); 优化施氮上调 30% (Opt130%); 农民传统施氮处理 (FNP)。FPN 氮肥用量基于对山东东营地区农户调研情况, 玉米季总计施用氮肥 280 kg/hm², 其中 180 kg/hm² 在播种期基施, 100 kg/hm² 在玉米六叶期追施。冬小麦季施氮水平设置同夏玉米季, 优化施氮量确定方法详见文献[17], 农民传统施氮处理 (基于对山东东营地区农户调研情况, 小麦季总计施用氮肥 300 kg/hm², 其中 200 kg/hm² 在播种期基施, 100 kg/hm² 在小麦拔节期追施)。副处理为 3 个氮肥种类, 分别为硫酸铵 (含氮 21.2%, AS), 硝酸铵钙 (含氮量 15.5%, CAN) 和尿素 (含氮 46.0%, UREA)。每个处理 4 次重复, 完全随机区组排列。主处理小区面积为 210 m² (长 15 m × 宽 14 m), 副处理裂区面积为 70 m² (宽 5 m × 长 14 m)。两年玉米季氮肥用量及施用时期见表 1。氮肥在播种前基施, 拔节期和吐丝期开沟深施。参考区域养分施用推荐标准^[18], 每季玉米播种前, P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm² 和 ZnSO₄·7H₂O 30 kg/hm² 全部作基肥, 撒施旋耕入土 (0—20 cm)。每季小麦播种前, P₂O₅ 90 kg/hm² 和 K₂O 60 kg/hm² 全部作基肥, 翻耕 (0—30 cm) 后撒施旋耕入土 (0—20 cm)。磷肥为过磷酸钙, 钾肥为硫酸钾。生育期内无严重病虫害和杂草发生。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 0—30 cm 土壤样品采集与理化性状测定 试验区随机采集 5 点土样, 均匀混合, 分成 3 份, 挑拣出未腐烂分解的根系、秸秆等, 放在阴凉处自然风干。过 2 mm 筛, 水土比 2.5 : 1 浸提 pH 计测定 pH; 水土比 5 : 1 浸提电导率仪测定电导率; 0.5 mol/L

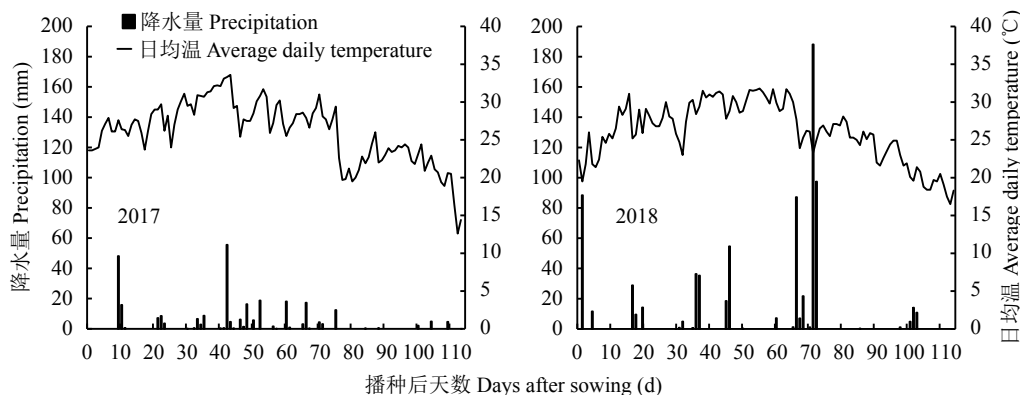


图 1 2017 和 2018 年玉米生育期降水量与日均温

Fig. 1 Precipitation and average daily temperature during the growth periods of maize in 2017 and 2018

表 1 2017 和 2018 年不同主处理施氮量 (N kg/hm²)
Table 1 N fertilization rates of different main treatments in 2017 and 2018

处理 Treatment	2017			2018		
	播种前 Before sowing	六叶期 V6 stage	吐丝期 VT stage	播种前 Before sowing	六叶期 V6 stage	吐丝期 VT stage
CK	0	0	0	0	0	0
Opt70%	32	42	42	32	21	21
Opt	45	60	60	45	30	30
Opt130%	59	78	78	59	39	39
FNP	180	100	0	180	100	0

NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定有效磷含量；1.0 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定有效钾含量。过 0.25 mm 筛，碳氮元素分析仪测定有机碳和全氮含量。

1.2.2 土壤硝酸盐速测样品的采集与分析 施肥前每个优化试验小区随机取 3 钻土样均匀混合。不同时期土壤采集深度不同，如玉米播种前采集 0—30 cm，六叶期采集 0—60 cm，抽雄吐丝期采集 0—90 cm，每 30 cm 为一层。鲜土混匀后密封于自封袋中，迅速带回实验室进行分析。样品分为两部分，一部分按照新鲜土样与去离子水 1:1 进行浸提，振荡 0.5 h 过滤后，用反射仪测定土壤溶液硝酸盐含量。另取 25 g 左右鲜土于 105℃ 烘 24 h 左右至恒重，测定土壤含水量。

1.2.3 土壤无机氮含量测定样品采集与分析 在玉米播种前、六叶期 (V6)、吐丝期 (VT) 和成熟期 (R6) 采集 0—90 cm 土层土样，每 30 cm 为一层。将新鲜土壤样品通过 0.5 cm 网筛，称取 12.0 g 过筛后的土壤，加入 100 mL 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液，以 180 r/min 振荡 60 min，过滤，浸提液用连续流动分析仪测定土壤无机氮浓度，并根据各土层土壤容重换算为土壤无机氮含量。

1.2.4 植株样品的采集 在 V6、VT 和 R6 (分为籽粒和秸秆两部分) 进行地上部样品采集，每个小区取两行连续 4 株玉米，在 105℃ 杀青 30 min，70℃ 烘至恒重，记录干物重，粉样，采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮，凯氏定氮法测定样品氮含量。

1.2.5 测产 各小区随机选取 4 行 2 m 进行测产。收获测产区内所有穗，称取鲜重，挑取 6 个代表性穗作为测产小样，称其鲜重并进行考种。将 6 穗小样脱粒烘干，换算出相应的籽粒含水量及出籽率等，最终折算成含水率为 15.5% 的产量。

1.3 数据处理与分析

吸氮量 (N uptake, kg/hm²) = 氮素含量 × 干物质重

氮收获指数 (HI_N, %) = 成熟期籽粒吸氮量/成熟期地上部吸氮量 × 100%

氮肥偏生产力 (PFP_N, kg/kg) = 籽粒产量/施氮量
氮肥回收利用率 (RE_N, %) = (成熟期施氮处理地上部吸氮量 - 成熟期不施氮处理地上部吸氮量) / 施氮量 × 100%

各土层无机氮积累量 (N_{min}, N kg/hm²) = 土层厚度 × 土壤容重 × (土壤硝态氮含量 + 土壤铵态氮含量)

上述公式所有数据基于样品干重计算。试验数据用 Microsoft Excel 2017 进行处理，SAS 8.0 统计软件进行单因素及双因素方差分析法分析 (1% 和 5% 水平的 LSD 检验法)，Excel 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥种类与用量对玉米产量的影响

两年的试验结果 (图 2) 均表明，当供氮量从 0 增加到 Opt 时，玉米产量显著增加，但供氮量进一步从 Opt 增加到 FNP 时，玉米产量无显著差异。不同供氮处理下，优化施氮处理在 2017 年平均产量为 10.3 t/hm²，较对照和 Opt70% 处理平均增产 53% 和 12%；在 2018 年平均产量为 7.1 t/hm²，较对照和优化下调施氮处理平均增产 60% 和 17%。

同一施氮量下，与施用硫酸铵处理相比，施用硝酸铵钙和尿素均可提高籽粒产量，并在 2017 年达到显著水平，例如优化处理条件下，尿素和硝酸铵钙处理较硫酸铵分别增产 15% 和 8%。但在 2018 年籽粒产量在各氮肥种类间无显著差异。

2.2 不同氮肥种类与用量对玉米收获期生物量、氮含量和吸氮量的影响

两年的试验结果 (表 2) 表明，氮肥种类与用量显著影响玉米收获期生物量，生物量未受到两者交互作用的显著影响。2017 与 2018 年优化施氮处理下的平均生物量分别为 17.7 和 13.0 t/hm²，均显著高于

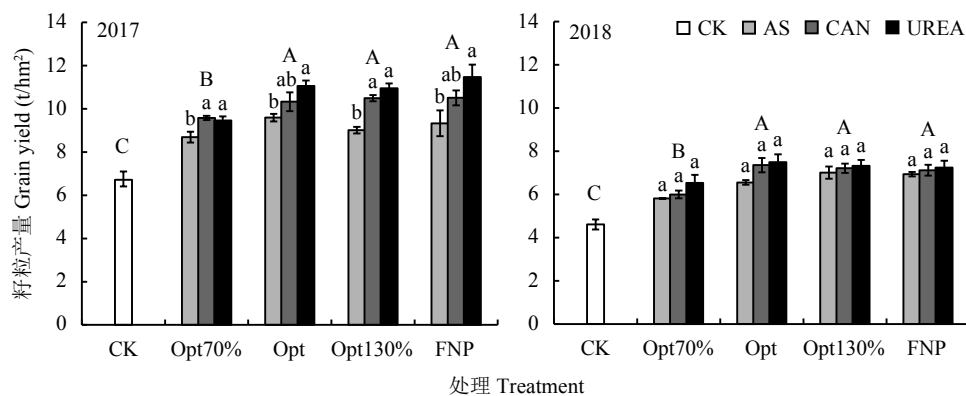


图 2 不同施氮处理玉米产量

Fig. 2 Maize grain yield of different N treatments

[注 (Note): 柱上不同大写字母代表同一年份不同施氮量间差异达 5% 显著水平; 不同小写字母代表同一年份同一施氮量不同氮肥种类间差异达 5% 显著水平 Different capital letters above the bars represent the significant level of 5% difference between different nitrogen application amounts in the same year; different lowercase letters represent the significant level of 5% difference among different nitrogen fertilizer types in the same year and the same amount of nitrogen application.]

表 2 不同施氮处理玉米生物量及籽粒、秸秆氮含量和地上部吸氮量

Table 2 Maize biomass, and grain and straw N content and shoot N uptake at harvest under different N treatments

处理 Treatment	生物量 Biomass (t/hm ²)			籽粒氮含量 Grain N content (%)			秸秆氮含量 Straw N content (%)			吸氮量 N uptake (kg/hm ²)		
	AS	CAN	UREA	AS	CAN	UREA	AS	CAN	UREA	AS	CAN	UREA
2017												
CK	10.4 b	10.4 c	10.4 c	1.03 c	1.03 c	1.03 c	0.48 d	0.48 d	0.48 d	79 c	79 d	79 c
Opt70%	15.1 a	16.2 b	16.9 b	1.26 b	1.38 b	1.38 b	0.86 c	0.87 c	1.00 a	160 b	182 c	193 b
Opt	16.1 a	17.6 ab	19.5 a	1.42 a	1.47 ab	1.49 a	0.98 a	0.97 bc	0.90 bc	194 a	203 b	230 a
Opt130%	15.1 a	17.8 a	19.1 a	1.49 a	1.58 a	1.51 a	0.86 c	1.15 a	0.98 ab	178 ab	226 a	237 a
FNP	16.2 a	17.9 a	20.2 a	1.46 a	1.49 ab	1.48 a	1.09 a	1.06 ab	0.86 c	195 a	207 b	224 a
变异来源 Source of variation												
施氮量 N rate (N)	**			**			**			**		
氮肥种类 N type (T)	**			*			*			**		
N × T	ns			ns			**			ns		
2018												
CK	6.9 d	6.9 c	6.9 c	1.07 d	1.07 c	1.07 c	0.43 c	0.43 c	0.43 c	52 d	52 d	52 d
Opt70%	10.5 c	10.9 b	11.8 b	1.28 c	1.17 b	1.21 b	0.50 c	0.54 b	0.47 c	91 c	91 b	97 c
Opt	11.8 b	13.5 a	13.7 a	1.36 b	1.33 a	1.32 a	0.64 b	0.60 b	0.55 b	115 b	127 a	124 b
Opt130%	12.3 ab	13.2 a	13.4 ab	1.33 bc	1.41 a	1.36 a	0.63 b	0.72 a	0.57 b	120 b	137 a	126 b
FNP	12.6 a	13.0 a	13.4 ab	1.47 a	1.39 a	1.39 a	0.84 b	0.77 a	0.90 a	143 a	138 a	149 a
变异来源 Source of variation												
施氮量 N rate (N)	**			**			**			**		
氮肥种类 N type (T)	*			ns			*			ns		
N × T	ns			ns			**			ns		

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments in the same year at the 5% level; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

对照和优化下调施氮处理，分别提高 70% 和 10% (2017 年)、88% 和 17% (2018 年)。而优化施氮与优化施氮以上氮肥用量处理生物量间没有显著差异。

不同种类氮肥施用结果表明，优化及以上施氮量，尿素与硝酸铵钙处理生物量显著高于硫酸铵处理，2017 年优化施氮量下生物量分别较硫酸铵处理增加 21% 和 9%，2018 年分别增加 16% 和 14%。施氮量显著影响了籽粒氮含量，2017 与 2018 年分别在优化上调和农民传统施氮量下籽粒氮含量达到最大值，分别为 1.53% 和 1.42%。而优化施氮与优化以上施氮量间籽粒氮含量无显著性差异。氮肥种类与用量显著影响了玉米秸秆氮含量，两者交互作用显著影响秸秆氮含量。2017 与 2018 年均是在农民传统施氮量下秸秆氮含量达到最大值，分别为 1.03% 和 0.84%。施氮量显著影响地上部吸氮量，2017 与

2018 年优化施氮量处理下地上部吸氮量分别为 209 和 122 kg/hm²，分别显著高于 CK 165% 和 135%。优化施氮处理较农户传统施氮处理地上部吸氮量在 2017 年相当，2018 年降低 15%。

2.3 不同氮肥种类与用量对玉米氮肥利用率的影响

由表 3 可知，2017 和 2018 年优化施氮处理比农民传统施氮处理分别减氮 41% 和 63%。施氮量显著影响氮收获指数，随着施氮量的增加，2017 年氮收获指数从 74% 降到 53%，2018 年氮收获指数从 72% 降到 59%。优化施氮处理的氮收获指数显著高于农民传统施氮处理，2017 和 2018 年分别提高 7 和 6 个百分点。在 2017 年施氮量与氮肥种类交互作用显著影响氮收获指数。施氮量显著影响氮肥偏生产力，随着施氮量的增加氮肥偏生产力降低，

表 3 不同施氮处理的施氮量及氮肥利用率

Table 3 Nitrogen fertilizer rates and utilization efficiency of maize under different N treatments

年份 Year	处理 Treatment	施氮量 N rate	氮收获指数 HI _N (%)			氮肥偏生产力 PFP _N (kg/kg)			氮肥回收利用率 RE _N (%)		
			AS	CAN	UREA	AS	CAN	UREA	AS	CAN	UREA
	CK	0	74 a	74 a	74 a						
	Opt70%	116	58 cd	61 b	57 bc	63 a	70 a	69 a	70 a	86 a	95 a
2017	Opt	165	60 c	58 c	60 b	49 b	53 b	57 b	69 a	73 b	89 a
	Opt130%	215	64 b	54 d	59 b	35 c	41 c	43 c	46 b	67 b	72 b
	FNP	280	55 d	50 e	55 c	28 d	32 d	34 d	42 b	44 c	50 c
变异来源 Source of variation											
	施氮量 (N) N rate			**			**			**	
	氮肥种类 (T) N type			*			**			**	
	N × T			**			ns			ns	
	CK	0	72 a	72 a	72 a		—			—	
	Opt70%	74	69 ab	66 b	69 ab	66 a	69 a	74 a	53 ab	52 b	61 a
2018	Opt	105	65 b	65 b	67 b	53 b	69 a	60 b	61 a	72 a	69 a
	Opt130%	137	66 b	63 bc	67 b	43 c	44 c	45 c	49 b	63 ab	54 a
	FNP	280	60 c	61 c	57 c	21 d	21 d	22 d	33 c	31 c	35 b
变异来源 Source of variation											
	施氮量 (N) N rate			**			**			**	
	氮肥种类 (T) N type			ns			ns			ns	
	N × T			ns			ns			ns	

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年份不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments in the same year at the 5% level; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

2017 和 2018 年优化施氮处理较农民传统施氮处理氮肥偏生产力分别增加了 71% 和 190%。氮肥回收利用率与氮肥偏生产力表现出一致的变化趋势, 随着施氮量的增加, 2017 和 2018 年优化施氮处理较农民传统施氮处理的氮肥回收利用率分别提高了 32 和 34 个百分点。在 2017 年氮收获指数、氮肥偏生产力及氮肥回收利用率受氮肥种类显著影响, 2018 年三者均未受到氮肥种类的显著影响。

2.4 不同氮肥种类与用量对土壤无机氮含量的影响

图 3 表明, 玉米关键生育期内, 各施氮处理 0—30 cm 土层无机氮含量呈现先升高后下降的趋势, 在六叶期达到最大值, 随后逐渐下降。不同施氮量处理间, 不同年份同一时期, CK、优化施氮与农民传统施氮处理间土壤无机氮含量均有显著差异, 表层土壤无机氮含量随着施氮量增加而显著提升。2018 年六叶期和吐丝期优化施氮处理表层土壤无机氮含量高于 2017 年。2017 和 2018 年收获期, 优化施氮处理较农民传统施氮处理表层土壤无机氮含量分别低了 29% 和 39%。六叶期和吐丝期同一施氮量条件下, 施用尿素处理土壤无机氮含量显著高于施用硫酸铵处理。

3 讨论

玉米产量的提升依赖于高的干物质积累量和氮素吸收量^[9], 六叶期以后, 玉米的干物质积累和氮素吸收量呈快速增长的趋势, 六叶期至吐丝期是氮素

吸收最快的阶段^[20], 因此对于这两个关键时期 (V6、VT) 的氮素管理显得尤为重要。基于此生长特性, 颜鹏等^[16]根据夏玉米的氮素需求规律, 对于目标产量为 10 t/hm² 的夏玉米而言, 每生产 100 kg 籽粒氮素需求量按 2.25 kg 计算, 则地上部氮素吸收总量为 225 kg/hm², 根据各阶段高产玉米的氮素需求规律和根层土壤缓冲值, 确定播前 0—30 cm 根层土壤的氮素供应目标值为 60 kg/hm², 六叶期到抽雄吐丝期 0—60 cm 根层土壤的氮素供应目标值为 185 kg/hm², 抽雄吐丝期到收获期 0—90 cm 耕层土壤的氮素供应目标值为 165 kg/hm²。依据此目标值, 本研究 2017 年的优化施氮量为 165 kg/hm², 2018 年的优化施氮量为 105 kg/hm², 较农民传统施氮分别节约氮肥 41% 和 63%, 但同时这一施肥量也低于华北地区玉米适宜氮肥用量^[3], 分析可能的原因: 一是、由于试验田土壤无机氮背景值较高, 在各时期只需施用少许氮肥便能满足玉米生长氮素需求; 二是、2018 年受暴雨影响 (单日最大降雨量达 180 mm), 玉米开花期生长受到胁迫, 吸氮能力下降; 三是、有研究表明, 在华北平原每年大气干湿沉降的氮素为 89 kg/hm², 0—90 cm 土壤的氮素累积可达 190 kg/hm², 玉米生长季的氮素矿化量为 109 kg/hm²^[3, 21]。虽然本研究优化施氮处理氮肥用量不高, 但较农户传统施氮处理并未显著影响产量。这主要归因于研究区域农民施肥习惯偏重于基肥, 而华北地区的雨水多集中在玉米生育后期, 强降雨导致大量根层土

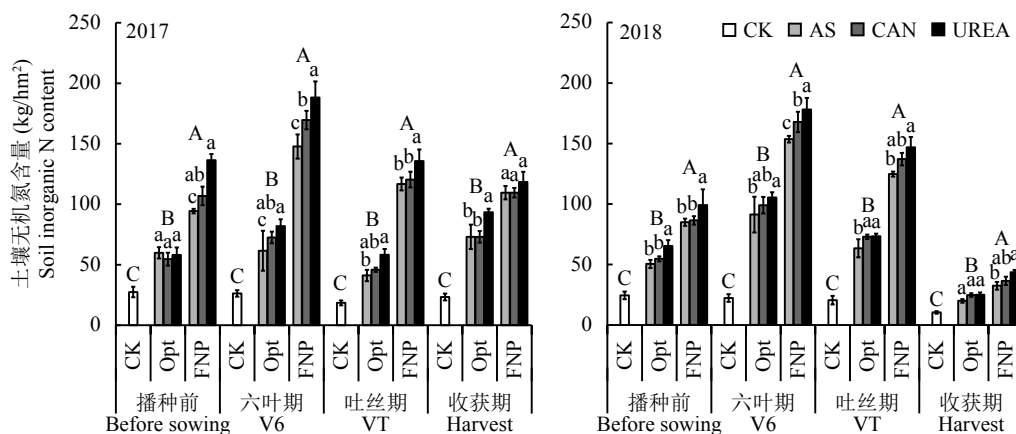


图 3 不同施氮处理玉米生长季 0—30 cm 土壤无机氮含量动态变化

Fig. 3 The dynamic changes of soil inorganic N contents in 0—30 cm under different N treatments during the growth period of maize

[注 (Note): 柱上不同大写字母代表同一时期不同施氮量间差异达 5% 显著水平; 不同小写字母代表同一时期同一施氮量不同氮肥种类间差异达 5% 显著水平。Different capital letters represent the significant level of 5% difference among different nitrogen application rates in the same stage; different lowercase letters represent the significant level of 5% difference among different nitrogen fertilizer types in the same stage and the same amount of nitrogen application.]

壤硝态氮被淋洗到玉米根系有效性以外,导致氮素利用率不高^[22]。本研究优化施氮相比农民传统施氮处理大幅降低了基施氮肥量,更加注重学界所认可的关键时期尤其是抽雄吐丝期氮肥的追施^[19-20],结合土壤硝态氮速测结果及不同时期的土壤氮素供应目标值确定各时期追肥量,从而实现了夏玉米氮肥需求和根层养分在数量、时间和空间上的匹配,使得当季施入的氮肥尽可能多的转化为粮食生产力,因而在大幅度减少氮肥施用的基础上并没有降低玉米产量。不同氮肥种类在正常年份(2017年)显著影响玉米产量及生物量,施用尿素及硝酸铵钙效果最佳,这与前人^[10,23]在盆栽及田间的研究结果表现一致。而2018年生物量一定程度上受到氮肥种类影响,但最终不同施肥种类下产量未表现出显著差异,这可能主要是由于生育关键时期受淹水胁迫导致氮素吸收转移效率降低^[24],进而弱化试验处理因素,因此需进一步进行田间验证。

巨晓棠等^[25]认为过量施用氮肥对作物增产没有任何意义。正常来讲,随着施氮量的提高,产量和吸氮量增加,氮肥回收利用率降低^[26]。本研究表明,优化施氮的各项氮肥利用率指标均显著高于农民传统施氮,虽然优化施氮下调处理的各项氮肥利用率指标均较高,但该处理下的玉米产量和吸氮量却显著低于其他施氮处理。因此,协调产量与氮肥利用率之间的矛盾,应在保证作物产量达到平台的前提下,提高氮肥效率,同时减少氮素的奢侈吸收^[27]。本研究优化施氮处理的氮肥回收利用率(RE_N)和肥料偏生产力(FPF_N)要高于我国玉米生产平均水平^[26],分析原因主要有:一是、由于黄河三角洲地区土壤质量差、综合肥力水平较低,区域产量水平不高,而该种情况下得到高的肥料利用率和农学效率相对较容易^[28];二是、由于研究区域产量水平不高,应用氮素实时监控技术较农户传统施氮大幅度降低了施肥量,进而得到高的肥料利用率和农学效率相对容易。

各种氮肥施入土壤后经过硝化或脲酶作用转化为作物可利用的无机氮(硝态氮和铵态氮),土壤无机氮含量是反映土壤供氮能力与氮肥是否合理的重要指标。相关研究表明,无机氮的残留和损失量随着施氮量的增加显著增加^[29-30],本研究的结果与之相符,优化施氮量条件下土壤无机氮随着施氮量与作物氮吸收量呈相应变化,而农民传统高量施氮,尤其是基施量较大的情况下,在六叶期表层土壤(0—30 cm)无机氮含量迅速提高,而作物在生长期前期氮素需求量很少,该时期表层土壤大量氮素的

累积造成氮素的损失增加及玉米花前养分的过量累积^[31]。在山东惠民地区小麦-玉米轮作体系中,由于过高施氮量,导致在玉米收获后0—90 cm土壤中硝态氮累积量平均为227~275 kg/hm²^[32],远远超出欧美国家要求的0—90 cm土壤中硝态氮残留小于45 kg/hm²的标准^[33]。本研究正常年份(2017年)的农户传统施氮处理0—90 cm土壤中硝态氮也达到了282 kg/hm²的较高水平,而优化施氮处理该土层氮素残留仅为101 kg/hm²,相对已显著降低收获期土壤氮素残留。相对于硫酸铵及硝酸铵钙,施用等量的尿素能够使土壤无机氮含量有更显著的提升,这可能是由于硫酸铵施入土壤后直接水解成氨,随后挥发到大气中,结果导致肥料养分大量损失^[34]。土壤无机氮含量的测定结果,进一步说明了根层氮素实时监控技术减肥的合理性,通过调控各时期土壤氮素供应达到与玉米养分需求相匹配,从而实现氮肥的高效。

综上所述,在黄河三角洲玉米上应用根层氮素实时监控技术,使得氮肥施用、土壤供给和作物需求在时间和空间上更加匹配,进而实现节肥增效的目标。本研究结果可为黄河三角洲地区小农户提供区域氮素总量控制指标,再结合合理的分期调控手段,能在很大程度上减少该区域氮素资源的不合理投入,降低并控制农田土壤氮素残留,为黄河三角洲地区夏玉米生产中氮肥利用效率偏低和农田环境污染严重等问题的解决提供技术支撑。但不同种类氮肥受该区域气候条件、土壤类型和管理措施等影响而表现不同,因此需要通过长期定位试验获取更多的参数指标,进一步探讨不同种类氮肥节肥增效的机理。

4 结论

在黄河三角洲地区应用根层氮素实时监控技术能够在不显著降低籽粒产量的同时大幅度减少氮肥施用量,进而提高了氮肥利用率。在等氮量条件下,施用硝酸铵钙以及尿素在节肥增产方面与施用硫酸铵相比有较好表现。

参 考 文 献:

- [1] 戴景瑞,鄂立柱.我国玉米育种科技创新问题的几点思考[J].玉米科学,2010,18(1):1-5.
Dai J R, E L Z. Scientific and technological innovation of maize breeding in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 1-5.
- [2] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4):

- 783–795.
- [3] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, *et al.* On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test[J]. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48–55.
- [4] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. *山东农业科学*, 2015, 47(4): 125–130.
Yang Z, Wang B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(4): 125–130.
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, (5): 837–845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, (5): 837–845.
- [6] 董亮, 孙泽强, 王学君, 等. 黄河三角洲盐碱耕地中低产田概况及改良增产技术探讨[J]. *江西农业学报*, 2014, 26(2): 58–62.
Dong L, Sun Z Q, Wang X J, *et al.* General situation of saline alkali type medium low yielding farmland in Yellow River Delta and discussion on its improving and yield increasing techniques[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(2): 58–62.
- [7] 东营市统计局. 东营市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
Dongying City Bureau of Statistics. Dongying statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [8] 薄录吉, 李彦, 罗加法, 等. 施肥对黄河三角洲盐碱地作物产量及其构成因素的影响[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(5): 44–48.
Bo L J, Li Y, Luo J F, *et al.* Effects of fertilization on yield and its components of several crops in saline soil in Yellow River Delta[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(5): 44–48.
- [9] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 938–945.
- [10] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. *Ambio*, 2010, 39(5–6): 376–384.
- [11] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489.
- [12] Guo S, Zhou Y, Shen Q, *et al.* Effect of ammonium and nitrate nutrition on some physiological processes in higher plants-growth, photosynthesis, photorespiration, and water relations[J]. *Plant Biology*, 2007, 9(1): 21–29.
- [13] Ma Q, Wang X, Li H, *et al.* Comparing localized application of different N fertilizer species on maize grain yield and agronomic N-use efficiency on a calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 72–79.
- [14] 邢瑶, 马兴华. 氮素形态对植物生长影响的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(2): 109–117.
Xing Y, Ma X H. Research progress on effect of nitrogen form on plant growth[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(2): 109–117.
- [15] 高志, 徐阳春, 沈其荣, 等. 不同氮素形态配比的复混肥对玉米苗期生长及氮肥利用率的影响[J]. *华北农学报*, 2005, 20(6): 68–72.
Gao Z, Xu Y C, Shen Q R, *et al.* Compound fertilizers with different nitrogen forms on the growth and nitrogen use efficiency of maize seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(6): 68–72.
- [16] 颜鹏. 支撑夏玉米高产高效群体的根层氮素调控机制与途径[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Yan P. The mechanisms of root-zone N management regulates maize canopy development with high yield and high N use efficiency[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [17] 卢殿君. 华北平原冬小麦高产高效群体动态特征与氮营养调控[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
Lu D J. Dynamics of population trait for high yielding and high efficiency winter wheat and N nutrient regulation in the North China Plain[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.
- [18] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802–817.
Wu L Q, Wu L, Cui Z L, *et al.* Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802–817.
- [19] Yan P, Yue S C, Meng Q F, *et al.* An understanding of the accumulation of biomass and nitrogen is benefit for Chinese maize production[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(2): 895–904.
- [20] Meng Q F, Yue S C, Hou P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: a review[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(2): 137–147.
- [21] Liu X J, Duan L, Mo J, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251–2264.
- [22] 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(9): 3041–3046.
- [23] Smiciklas K D. Role of nitrogen form in determining yield of field-grown maize[J]. *Crop Science*, 1992, 32(5): 1220–1225.
- [24] 任佰朝. 淹水影响夏玉米生长发育的生理机制及其调控[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2017.
Ren B C. Physiological mechanism and regulation of summer maize growth and development affected by flooding[D]. Tai'an, Shandong: PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2017.
- [25] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1493–1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y, *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493–1499.
- [26] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [27] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 622–627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5): 622–627.
- [28] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, *et al.* Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management

- practices[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6): 1096–1103.
- [29] 淮贺举, 张海林, 蔡万涛, 等. 不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2651–2656.
- Huai H J, Zhang H L, Cai W T, *et al.* Effect of different nitrogen rates on nitrogen utilization and residual soil nitrate of spring maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2651–2656.
- [30] 石德杨, 张海艳, 董树亭. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 37–44.
- Shi D Y, Zhang H Y, Dong S T. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(1): 37–44.
- [31] 崔超, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同氮效率基因型高产春玉米花粒期干物质与氮素运移特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1337–1345.
- Cui C, Gao J L, Yu X F, *et al.* Dry matter accumulation and nitrogen migration of high-yielding spring maize for different nitrogen efficiency in the flowering and milking stages[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1337–1345.
- [32] 寇长林. 华北平原集约化农作区不同种植体系施用氮肥对环境的影响[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2004.
- Kou C L. Effect of nitrogen fertilization of different intensive cropping systems on environment in North China Plain[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2004.
- [33] Van der Ploeg R R, Ringe H, Machulla G, *et al.* Postwar nitrogen use efficiency in West German agriculture and groundwater quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1203–1212.
- [34] 李振高, 俞慎, 吴胜春, 等. 不同氮肥对水稻根圈微生物生物量及硝化-反硝化细菌的影响[J]. *土壤*, 2003, (6): 490–494.
- Li Z G, Yu S, Wu S C, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers on the microbial biomass and the population of nitrifying-denitrifying bacteria in the rice rhizosphere[J]. *Soils*, 2003, (6): 490–494.