

太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究

李勇^{1,2}, 杨林章², 殷广德³

(1 河海大学环境科学与工程学院, 江苏南京 210098; 2 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008;

3 江苏省土壤肥料技术指导站, 江苏南京 210036)

摘要: 在太湖流域丹阳地区, 通过田间试验研究了旱直播稻田氮素的渗漏损失特征。结果表明, 在当地正常的水肥管理模式下, 旱直播稻田氮素的渗漏主要发生在水稻生长前期, 施入的基肥不易迅速水解, 部分仍滞留在表层土壤, 灌溉或强降水时增大了氮素渗漏流失的风险。稻田 40 cm 深度土壤硝态氮和铵态氮浓度平均值分别为 5.79 和 0.49 mg/L, 硝态氮浓度最大值出现在苗肥施入后的第 7 d, 达到 21.8 mg/L。以土壤深度 40 cm 为界面计算的氮素渗漏通量表明, 铵态氮和硝态氮在整个稻季的平均渗漏量为 N 3.8 和 28.4 kg/hm², 氮素渗漏的形式主要为硝态氮。直播水稻萌芽至幼苗期对氮素的吸收量少, 应适当减少前期基肥或苗肥的施用量, 充分利用基肥与苗肥的叠加效应, 减少前期氮素渗漏流失。

关键词: 直播稻田; 铵态氮; 硝态氮; 渗漏量; 太湖地区

中图分类号: S155.4⁺3; S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)01-0099-06

Experimental study on nitrogen leaching in a direct-seeding rice paddy of Taihu Lake Basin

LI Yong^{1,2}, YANG Lin-zhang², YIN Guang-de³

(1 College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

3 Soil Fertilization Technical Guiding Station of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: Field experiment of nitrogen leaching loss in a dry direct-seeding rice paddy was conducted in Danyang region of Taihu Lake Basin. Results show that the nitrogen leaching loss is mainly occurred during the early stage of rice growing season under local water and fertilizer management, especially for the seedling fertilization. The base fertilization has not rapidly hydrolyzed without standing water in about two weeks after rice sown, that resulted in part of the fertilizers still exists in surface soil. Even though part of the base fertilizers is transformed into nitrate-nitrogen in wet soil, the nitrate nitrogen still resides in surface soil without downward water-leaching. Both the residual base fertilizers and the added seedling fertilizers increase the chance of nitrogen leaching loss when irrigation or precipitation occurred. The mean concentrations of ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen, at 40 cm soil depth, are 5.79 and 0.49 mg/L respectively, and nitrate-nitrogen is the main part of nitrogen loss through leaching, whose maximal concentration is 21.8 mg/L on day 7 after the seedling fertilization. The mean quantities of leaching loss of ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen at soil depth of 40 cm, in the whole rice growing season, are about N 3.8 and 28.4 kg/ha respectively, which indicate that the nitrate-nitrogen accounts for a majority proportion. As a result, in direct-seeding rice paddies, the superposition effect of both base and seedling fertilizers should be paid more attention. Due to the low nitrogen-uptake of rice at its seedling stage, the prophase fertilizers may be advisably reduced to decrease the risk of nitrogen leaching.

Key words: direct-seeding rice paddy; ammonium-nitrogen; nitrate-nitrogen; leaching flux; Taihu Lake Basin

收稿日期: 2008-12-09 接受日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40601050); 江苏省“青蓝工程”项目(2006)资助。

作者简介: 李勇(1974—), 男, 江西萍乡人, 副教授, 主要从事水和土壤中溶质运移研究。E-mail: liyonghh@163.com

直播水稻由于具有省工节时、高效稳产、节水抗灾等优点,目前被许多国家推广采用^[1-4]。随着城市化进程的加快和农村劳动力的减少,我国太湖流域江苏、浙江、上海等地区越来越多地开始推广旱直播水作水稻种植方式^[5]。与传统移栽水稻相比,直播水稻无育秧期和落黄、返青期,无移栽过程,整个生长过程都在同一田块进行。因而,在水肥管理上直播稻田与移栽稻田有所不同。旱直播水作水稻兼有旱地和水田的特征,为防止种子腐烂,在播种后15 d左右田间无积水,期间降水将被直接排出,待出苗5~10 cm左右再进行灌溉。直播稻在肥料运筹上,需适当控制总氮量,幼苗期的生长需肥量较少,更注重中期对氮素养分的吸收^[6]。张奇春等^[7]在浙江省金华市对直播早稻优化氮肥施用的田间试验,认为传统的施肥技术,特别是氮肥施用技术,不适用于直播水稻;直播水稻在生育前期吸入体内的N素主要用于营养生长,对中后期生殖生长的贡献有限,中期施用氮肥不可忽视。倪竹如等^[8]应用¹⁵N示踪技术研究了不同氮肥施用技术对直播水稻氮素吸收及其产量形成的影响,结果表明在氮肥用量相同的情况下,在施基肥的基础上,追施苗肥、蘖肥和穗肥的施用技术能促进直播稻均衡生长。Schnier等^[9]和Biloni等^[10]研究了尿素不同施用方法对传统稻田和直播稻田中氮素循环的影响,发现灌溉施肥方案

的不同造成了直播稻田和传统稻田的氮素渗漏损失规律存在较大差异。纵观国内外已发表文献,主要集中在直播稻田氮肥施用技术的优化方面,对其氮素流失研究不多,而专门针对旱直播稻田氮素渗漏特征研究更少。

随着我国太湖地区经济的迅速发展,农业劳动力逐渐缺乏,直播水稻越来越成为替代传统移栽水稻的有效种植方式。然而,旱直播水稻与传统移栽水稻在灌溉和施肥制度上的差异,导致了田间氮素等养分的迁移转化特征不同。为有效控制农业氮素污染对浅层地下水的影响,加强对直播稻田氮素渗漏流失特征的研究,以太湖流域丹阳地区旱直播水稻代表性的灌溉施肥模式为基础,开展了对氮素的渗漏流失特征和通量的田间试验。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验小区位于江苏省南部地区太湖流域丹阳市运河镇,地处长江三角洲腹地,水稻是该地区的主要粮食作物。当地属于北亚热带南部季风气候,温、光、水协调,四季分明,年平均气温15.4℃、日照时间2057.2 h、无霜期238 d、降水量1072.8 mm。田间土壤主要为粉砂土,具体理化性质见表1。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the field experimental soil

深度 Depth (cm)	粒径分布 Distribution of soil particle (%)			容重 Bulk density (g/cm ³)	总氮 Total N (%)	有机质 Organic matter (%)	pH (H ₂ O)
	砂粒 Sand (>0.05 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.05 mm)	粘粒 Clay (<0.002 mm)				
0—20	7.01	73.70	19.29	1.42	0.15	0.52	6.65
20—40	0.02	81.01	18.97	1.56	0.06	0.54	6.85
40—60	18.53	72.83	8.64	1.51	0.03	0.37	6.85
60—80	14.44	81.64	3.91	1.42	0.03	0.35	6.80
80—100	14.25	81.59	4.16	1.43	0.02	0.33	6.80

丹阳地区大多为稻-麦轮作,每年6月上、中旬直播种植水稻,11月初收割,随后种植冬小麦。本试验田面积为30 m×15 m,平分为3个10 m×15 m田块作为重复。田埂筑高压实,尽量减少水肥的侧渗、串流。水稻在6月8日播种,11月1日收割,历时147 d。播种时田间表层土壤含水量在0.4 cm³/cm³左右,稻种和基肥均匀撒入田面,和剩余麦茬一起由机械翻耕时埋入土壤,翻耕深度为5 cm左右。

灌溉水引自附近河道,由电力灌溉。整个稻季的灌溉水量为470 mm,降水量为543.2 mm。施肥方案按照当地习惯设计,基肥施复合肥(氮、磷、钾含量各为15%),追肥施尿素(含氮为46%)。基肥、苗肥、蘖肥、穗肥分别在6月8日、6月28日、7月18日和8月20日施入,折合施氮量分别为:N 60、60、50、和50 kg/hm²。其中苗肥、蘖肥和穗肥由人工播撒,施肥时田间保持一定的水层。

1.2 样品采集和分析方法

试验前在每个试验田块设置 1 个渗漏水收集装置,收集装置由一个 20 cm × 30 cm 的矩形盘平放于土壤表层以下 40 cm 处,用 PVC 管接出收集于采样瓶中,田面有水时每 2~5 d 采样 1 次,其他时间 5~15 d 采样 1 次,记录收集水量并做水质分析。每个田块分别在 20、40、60、80、100 cm 5 个不同深度埋设陶土头管采集渗漏水。施肥后第 1、3、5、7 d 连续取样 4 次,之后 7~10 d 取样 1 次。采集的水样经酸化并低温保存,供分析用。水样中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法分析。

土壤中 40 cm 深度水分的下渗速率由收集的渗漏水体积除以相应的时间天数和矩形盘面积获得。氮素的下渗速率则为渗漏水中氮素的物质质量除以相应的收集天数,并转换为单位面积后求得。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面氮素浓度分布

肥料施入田间后迅速发生水解反应,部分氮素通过氨挥发进入大气。随后铵态氮经硝化作用转化为亚硝态氮和硝态氮,进入表层土壤。图 1 看出,各种深度氮素浓度的变化与施肥规律一致。水稻播种后至幼苗期(约 2 周),尽管基肥施入量较大,但由于田面无积水,下渗量少^[11]。苗肥施入后在水流作用下氮素随之运移,20 cm 处硝态氮浓度急剧上升,不同深度土壤中硝态氮的浓度均有较大幅度增加。尽管有研究显示水稻幼苗期对氮素的吸收偏重于硝态氮形式^[12-13],但总体吸收量较小。在 20、40、60、80 和 100 cm 处硝态氮最大浓度值分别达到了 36.9(施肥后第 3 d)、21.8(第 7 d)、19.4(第 9 d)、14.9(第 9 d)和 16.5 mg/L(第 9 d)。60 cm 以下土壤层中硝态氮在同一天达到最大值,可能与土壤剖面的渗透系数分布有关。当土壤水分和氮素通过犁底层后,下渗速率增大^[11],这在室内土柱试验中也得到了验证。但在整个稻季,铵态氮的浓度变化却较小,大量的铵态氮并未随着渗漏水往下运移,而是被土壤吸附和作物根系吸收利用,或经氨挥发和硝化作用生成硝态氮^[14-16]。

蘖肥和穗肥与苗肥的施入量和施入方法基本相同,但其后出现的硝态氮的浓度明显降低,至 10 mg/L 以下。主要是播种时施入的基肥由于田面维持无水 2 周左右,期间复合肥并未完全水解,或者部分水解的铵态氮生成了硝态氮;表层土壤氧化性较

好,反硝化作用较弱,在无水运移情况下硝态氮在土壤表层易产生累积,部分残余基肥与刚施入的苗肥形成了叠加效应。殷晓燕等^[6]研究表明,直播水稻生育前期土壤表层氮大量累积,在灌水和降雨的影响下,向下层的迁移增加。说明早直播稻田基肥施入后水稻幼苗期如遇较大暴雨易引起氮素的径流和渗漏损失。随着水稻生长,需氮量逐渐增加,大量的铵态氮和硝态氮被水稻根系吸收,减少了相应的渗漏损失。

施肥后田面水中铵态氮浓度较高,而硝态氮浓度较低,在所监测分析范围内铵态氮和硝态氮平均浓度分别约为 7.89 和 1.50 mg/L。土壤中硝态氮的平均浓度从 20 cm 深度的 8.41 mg/L 下降到了 40 cm 深度的 5.79 mg/L,60 cm 的 5.87 mg/L,80 cm 的 4.64 mg/L 和 100 cm 的 4.51 mg/L。水稻根系对氮素的吸收主要发生在 0—20 cm 土层,直播水稻则可能更浅^[7];同时,淹水条件下反硝化作用增强^[11, 17]。大量的铵态氮在田间水和 0—20 cm 土层中被挥发、作物吸收或转化成硝态氮^[17-18]。反硝化作用则主要发生在 0—40 cm 深度土壤层中,40 cm 以下土壤中的反硝化作用越来越弱^[17, 19]。试验土壤剖面在 40 cm 深度附近存在的大量铁锰氧化物,在一定程度上促进了硝化—反硝化过程^[20]。

2.2 氮素渗漏损失通量分析

水稻根系深度主要集中在表层土壤内,40 cm 以下土壤中氮素基本不能被作物吸收利用。本试验稻田中氮素的渗漏损失通量以水稻根系深度范围 40 cm 为界面进行计算。如图 2 所示,水稻田在干湿交替过程中水分的下渗速率发生较大的波动。田间从干到湿的过程引起较大的水分下渗,特别是烤田期后首次灌溉,平均下渗速率达到 9 mm/d 以上;田间持续积水时平均渗漏速率约为 6.4 mm/d。这与在太湖地区稻田的其他研究成果(0~10 mm/d)是基本一致的^[15]。

从图 2 和图 3 可以看出,铵态氮和硝态氮在 40 cm 处下渗速率与施肥和降水及灌溉密切相关。铵态氮渗漏主要发生在施肥后数天内,下渗量较小。硝态氮的渗漏主要发生在苗肥施入后,最大渗漏速率达到 153 mg/(m²·d)。随着水稻生长需氮量的增加,蘖肥和穗肥施入后氮素在根区附近的渗漏流失量急剧减少,最大渗漏速率约为 61 mg/(m²·d)。由图 3 对时间进行积分求和可得,整个稻季铵态氮和硝态氮在 40 cm 深度土壤渗漏损失量为 N 32.2 kg/hm²,其中铵态氮和硝态氮分别约为 N 3.8 和 28.4

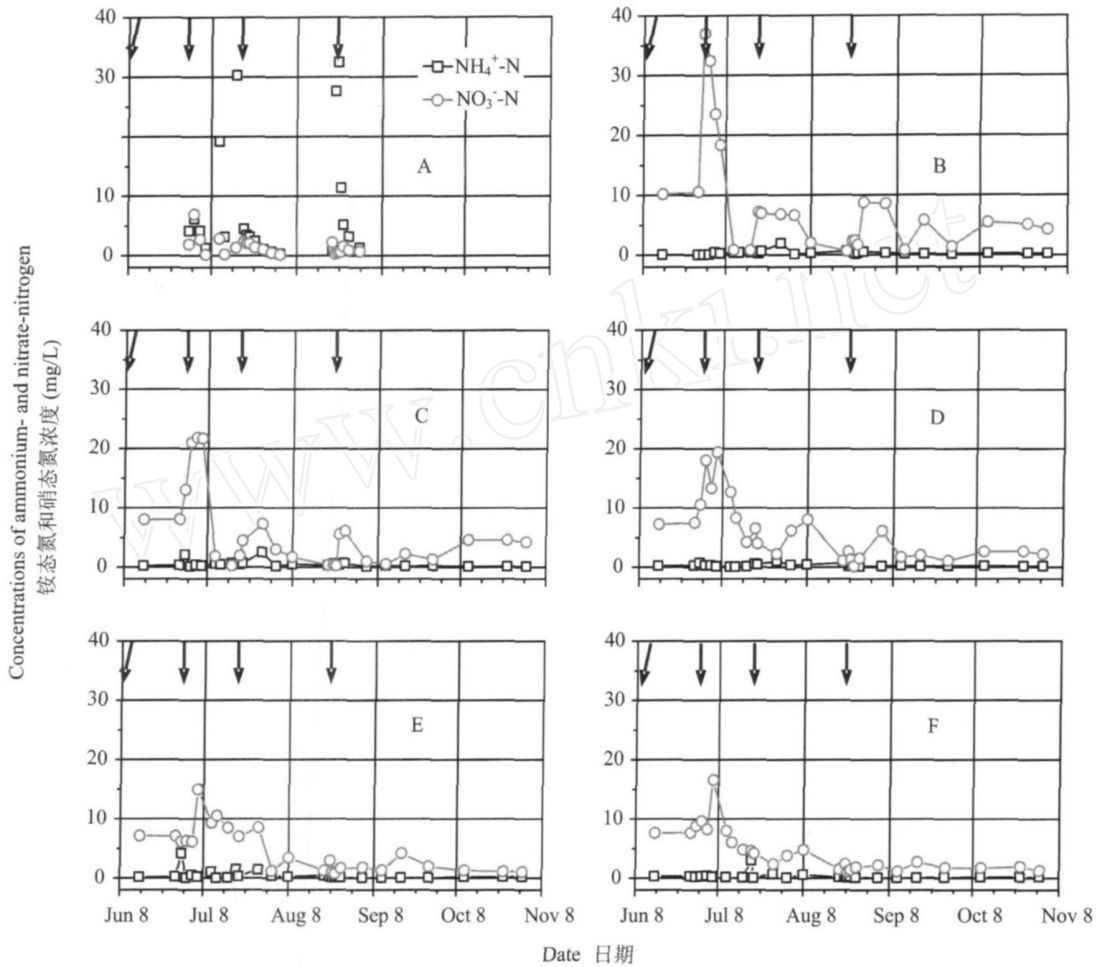


图1 直播稻田田面水和不同深度土壤溶液中铵态氮和硝态氮浓度历时分布

Fig.1 Concentration change of ammonium N and nitrate N in standing water and soil solutions at different depths in the direct-seeding rice field

[注(Note) : A—田面水 Standing water; B—20 cm; C—40 cm; D—60 cm; E—80 cm; F—100 cm. 箭头所指为施肥时间 The arrow point symbols are the dates for the fertilization]

kg/hm²。在太湖地区,传统移栽水稻的田间试验研究发现,氮素渗漏量(-80 cm)为N 4.6~28.0 kg/hm²,田间渗漏液(-80 cm)中硝态氮和铵态氮的浓度均较低^[14-15, 21-22]。这方面差异可能与水稻种植方式、土壤渗漏特性和灌溉施肥方案等密切相关;同时淹水条件下40~80 cm土层的反硝化作用使部分硝态氮以气态形式流失也是其中重要的原因之一。

3 结论

1) 直播稻田氮素渗漏主要发生在幼苗期,期间水稻对氮素的吸收利用少,并且施入的基肥不容易迅速水解,大部分仍然滞留在表层土壤,增大了首次灌溉或降水时氮素渗漏流失的风险。直播稻田应以水稻生长需氮量为基础,适当减少前期施肥量,充分

利用基肥与苗肥的叠加效应,增加粪肥和穗肥的比重,减小氮素渗漏流失。

2) 稻田土壤中干湿交替的环境促进了氮素的硝化—反硝化过程,特别是0~40 cm土壤层中,大部分已经转化成硝态氮。土壤深度40 cm处硝态氮和铵态氮浓度平均值分别为5.79和0.49 mg/L,硝态氮浓度最大值出现在苗肥施入后的第7 d,达到21.8 mg/L。而在80 cm深度硝态氮和铵态氮的平均浓度分别约为N 4.64和0.49 mg/L,硝态氮的浓度最大值出现在施肥后第9 d,为14.9 mg/L。

3) 以土壤深度40 cm为界面计算的氮素损失通量表明,整个稻季铵态氮和硝态氮渗漏损失量为N 32.2 kg/hm²,其中铵态氮和硝态氮分别约为N 3.8和28.4 kg/hm²,硝态氮是氮素渗漏流失的主要形式。

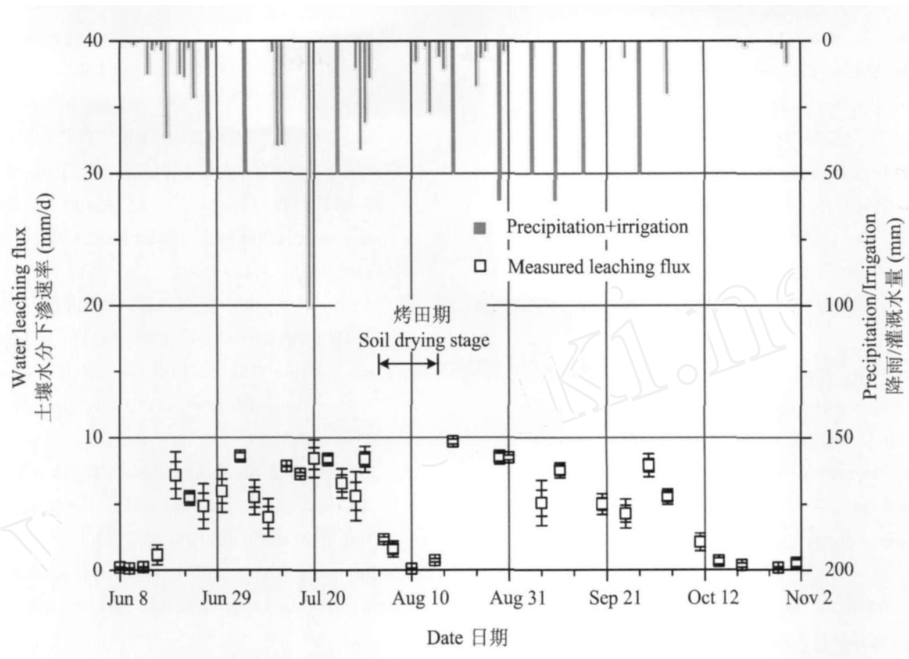


图2 稻季降水/灌溉量和田间40 cm深度土壤水分下渗速率历时变化

Fig.2 Distribution of the water leaching flux at soil depth of 40 cm and precipitation/ irrigation during rice growing season

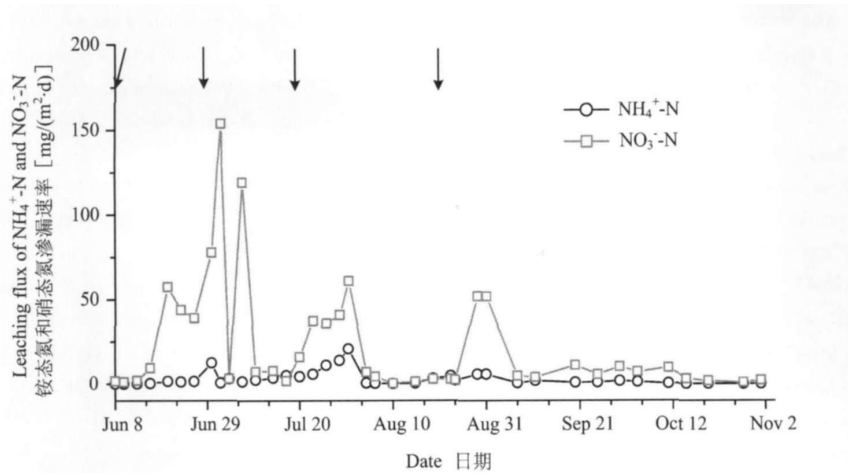


图3 稻季40 cm深度土壤铵态氮和硝态氮渗漏速率历时变化

Fig.3 Distribution of the leaching flux of ammonium-N and nitrate-N through the soil interface at depth of 40 cm during rice growing season

参考文献:

[1] Caton B P, Foin T C, Gibson K D, Hill J E. A temperature-based model of direct, water seeded rice (*Oryza sativa*) stand establishment in California [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 90: 91-102.

[2] Naklang K, Fukai S, Nathabut K. Growth of rice cultivars by direct seeding and transplanting under upland and lowland conditions [J]. *Field Crops Res.*, 1996, 48: 115-123.

[3] 徐迪新,徐翔. 中国直播稻、移栽稻的演变及播种技术的发展 [J]. *中国稻米*, 2006, (3): 6-9.

Xu D X, Xu X. Evolution of direct seeding rice and transplanting rice in China and development of sowing technologies [J]. *China Rice*, 2006, (3): 6-9.

[4] Sharma A R. Direct seeding and transplanting for rice production under flood-prone lowland conditions [J]. *Field Crops Res.*, 1995, 44: 129-137.

[5] 王洋,张祖立,张亚双,崔红光. 国内外水稻直播种植发展概况 [J]. *农机化研究*, 2007, (1): 48-50.

Wang Y, Zhang ZL, Zhang YS, Cui H G. Research and progress of rice direct sowing at home and abroad [J]. *J. Agric. Mech. Res.*, 2007, (1): 48-50.

[6] 殷晓燕,徐阳春,沈其荣,等. 直播旱作水稻的吸氮特征与土壤氮素表观盈亏 [J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1575-1581.

- Yin X Y, Xu Y C, Sheng Q R *et al.* Absorption and apparent budget of nitrogen by direct-seeding rice cultivated in aerobic soil with or without mulching [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(8): 1575-1581.
- [7] 张奇春,王光火. 直播早稻优化氮肥施用研究[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(4): 346-350.
- Zhang Q C, Wang G H. Optimal nitrogen application for direct-seeding early rice [J]. *Chin. J. Rice Sci.*, 2002, 16(4): 346-350.
- [8] 倪竹如,陈俊伟,阮美颖. 氮肥不同施用技术对直播水稻氮素吸收及其产量形成的影响[J]. *核农学报*, 2003, 17(2): 123-126.
- Ni Z R, Chen J W, Ruan M Y. Effect of different modes of fertilizer N application on nitrogen absorption and yield of direct seeding rice [J]. *Acta Agric. Nucl. Sin.*, 2003, 17(2): 123-126.
- [9] Schnier H F, Dingkuhn M, De Datta S K *et al.* Nitrogen-15 balance in transplanted and direct-seeded flooded rice as affected by different methods of urea application [J]. *Biol. Fert. Soils*, 2004, 10(2): 89-96.
- [10] Biloni M, Bocchi S. Nitrogen application in dry-seeded delayed-flooded rice in Italy I. Effect on yield and crop parameters [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2003, 67: 117-128.
- [11] Nakasone H, Abbas M A, Kuroda H. Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields [J]. *Paddy Water Environ.*, 2004, 2(3): 115-124.
- [12] 柏彦超,王娟娟,倪梅娟,等. 水分及铵、硝营养对水稻幼苗氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 184-188.
- Bai Y C, Wang J J, Ni M J *et al.* Effect of water and nitrogen nutrition on nitrogen absorption of rice [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(1): 184-188.
- [13] 谈建康,张亚丽,沈其荣,等. 不同形态氮素比例对水稻苗期水分利用效率及其生物效应的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 49-52.
- Tang J K, Zhang Y L, Sheng Q R *et al.* Effects of different NH_4^+ -N/ NO_3^- -N ratios on water use efficiency and its biological characteristics of rice at early stage [J]. *J. Nanjing Agric. Univ.*, 2002, 25(3): 49-52.
- [14] 闫德智,王德建,林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 440-446.
- Yan D Z, Wang D J, Lin J H. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu Region [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2005, 42(3): 440-446.
- [15] 王德建,林静慧,夏立志. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 16-18.
- Wang D J, Lin J H, Xia L Z. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area [J]. *Chin. J. Eco-Agric.*, 2001, 9(1): 16-18.
- [16] 连纲,王德建,林静慧,阎德智. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1879-1883.
- Lian G, Wang D J, Lin J H, Yan D Z. Characteristics of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(11): 1879-1883.
- [17] Reddy K R, D'Angelo E, Lindau C, Patrick Jr W H. Urea losses in flooded soils with established oxidized and reduced soil layers [J]. *Biol. Fert. Soils*, 1990, 9: 283-287.
- [18] Reddy K R, Patrick Jr W H. Uptake of fertilizer nitrogen and soil nitrogen by rice using ^{15}N -labelled nitrogen fertilizer [J]. *Plant Soil*, 1980, 57: 375-381.
- [19] 邹国元,张福锁,李新慧. 下层土壤反硝化作用的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 379-384.
- Zou G Y, Zhang F S, Li X H. Study on the denitrification in the subsoil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2001, 7(4): 379-384.
- [20] Lindau C W, Delaune R D, Williams M L, Patrick Jr W H. Application of N-15 dilution for simultaneous estimation of nitrification and nitrate reduction in soil-water columns [J]. *Plant Soil*, 1988, 111: 151-154.
- [21] 郑圣先,刘德林,聂军,等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 137-142.
- Zheng S X, Liu D L, Nie J *et al.* Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(2): 137-142.
- [22] 单艳红,杨林章,颜廷梅,王建国. 水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 115-121.
- Shan Y H, Yang L Z, Yan T M, Wang J G. The variation of P & N contents in paddy soil water and its environmental effect [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2005, 25(1): 115-121.