植物营养与肥料学报 2013,19(2):462-470
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi:10.11674/zwyf.2013.0224

洱海北部地区水稻氮肥投入阈值研究

施泽升[1],续勇波[2*],雷宝坤[3],刘宏斌[4]
(1 云南农业大学资源与环境学院,云南昆明 650201;2 云南农业大学烟草学院,云南昆明 650201;
3 云南省农业科学院农业环境资源研究所,云南昆明 650205;4 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要:为了研究洱海北部地区水稻合理的氮肥投入阈值。本试验通过连续两年的大田定点监测和室内分析,研究了不同施氮处理条件下对水稻产量、水稻氮肥利用率、田面水可溶性总氮(DTN)、土壤氮素表观盈余率(SNASR)等的影响。结果表明,施氮量对水稻产量的影响呈二次曲线关系,施氮能显著提高水稻产量,但当施氮量达到304.34 kg/hm^{2}后,水稻有减产风险;增施氮肥能显著提高水稻地上部分器官对氮素的吸收,但收获指数逐渐减少;在施入氮肥后的9 d内,施氮量与田面水DTN浓度相关系数在0.609**以上;当施肥量在228.26~304.34 kg/hm^{2}时,水稻产量范围在9969~10212 kg/hm^2,SNASR在50.05%~79.65%之间,田面水DTN在施肥后9 d内的平均含量为78.40 mg/L~108.58 mg/L。因此,在当前生产条件下,水稻推荐施氮量为228.26~304.34 kg/hm^2,能保证水稻稳定高产,且环境可承受。

关键词:施氮量;产量;氮素吸收量;氮阈值;可溶性总氮;土壤氮素表观盈余率
中图分类号:S511.062 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2013)02-0462-09

Threshold of nitrogen application in paddy soils in the northern area of Erhai Lake

SHI Ze-sheng[1], XU Yong-bo[2*], LEI Bao-kun[3], LIU Hong-bin[4]
(*1 College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Environmental Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4 Institute of Agricultural Resources and Regionalization, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The research aims at the threshold of nitrogen application amount in paddy soils. A field experiment was conducted to explore the effects of different N-fertilizer applications on the yield and N use efficiency of rice, dissolved total nitrogen (DTN) in soil surface water, soil nitrogen apparent surplus rate (SNASR) of soil in northern area of Erhai Lake from 2011 to 2012. The results show that there is a quadratic relationship between the nitrogen rate and the yield. The effect of nitrogen application on the increase of the yield is significant. However, when the nitrogen application rate is higher than 304.34 kg/ha, the rice yield is decreased. The nitrogen absorption in the shoots is significantly improved with the increase of nitrogen rates, while the nitrogen harvest index (NHI) is decreased. The coefficients of correlation between the nitrogen application rates and the values of DTN concentrations in the surface water during 9 days after the N application are more than 0.609**. When the nitrogen application rates in paddy soil are from 228.26 to 304.34 kg/ha, the yields are from 9969 to 10212 kg/ha, SNASR is from 50.05% to 79.65%, and the mean values of DTN concentrations in the surface water during 9 days after N application is from 78.40 mg/L to 108.58 mg/L. The recommended nitrogen application

收稿日期:2012-09-10 **接受日期**:2012-12-31
基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201003014-6);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812000051);国家自然科学基金(31101605, 31260503);云南省自然科学基金(2010ZC083)资助。
作者简介:施泽升(1986—),男,云南临沧人,硕士研究生,主要从事养分资源利用与环境研究。E-mail:shizesh@126.com
* 通信作者:E-mail:xuyongboxx@163.com

rates for rice is from 228.26 to 304.34 kg/ha to ensure the high yield, and the environment could be acceptable to a certain degree under present production conditions.

Key words: nitrogen application; yield; nitrogen uptake; threshold; dissolved total nitrogen; soil nitrogen apparent surplus rate

我国从20世纪70年代初开始大量施用化肥，目前施入农田中的氮肥被作物利用的仅占20%～40%，也有研究认为在一些高产地区氮肥利用率可能会更低[1-2]，剩余的养分通过各种途径进入环境，造成环境污染，对此已有学者进行研究报道[3-4]。近年来，洱海水质日益下降，逐步由贫营养化过渡到中营养化，农田面源污染是洱海富营养化的主要影响因素[5]。司友斌等[6]认为农田氮、磷的流失是引起水体富营养化的重要原因之一。洱海北部地区因地理位置特殊，地处洱海主要汇水区，也是洱海流域主要的粮食种植区，所以农业生产活动对洱海水质的影响不容忽视。程磊磊等[7]通过调查洱海北部地区的4个重点乡镇污染来源后指出，4乡镇农田纯氮入湖量约占整个洱海流域的26%，纯磷入湖量约占整个流域的18%。洱海北部地区氮、磷肥投入量普遍较高，尤其体现在主导经济作物上，造成农田养分盈余量偏高，最终影响土壤养分残留量[8]。为了保证水稻高产及环境可承受，本研究通过连续两年的田间定点试验，以肥料效应为基础，研究了洱海北部地区的水稻种植区不同施氮量对施肥后9d内田面水可溶性总氮（DTN）、土壤氮素表观盈余率、水稻产量及氮素利用率的影响，以期确定能使水稻高产、环境可承受的氮肥施用量，使水稻高效利用氮肥，减轻农业施肥对环境造成的污染。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

试验地位于洱海北部地区，属典型的低纬高原中亚热带西南季风气候类型，具有干湿季分明、光照充足，立体气候和区域性小气候明显等特点。年平均日照2061.0～2439.4 h，日照百分率55%～57%，年平均气温为15.3 ℃，该地区雨量充沛，多年平均降水量为1048 mm，分布不均，85%～96%的降水集中在5～10月的雨季。试验在云南省大理市洱源县右所镇的稻田中进行，北纬26°01′56.7″，东经100°03′47.6″，地下水位0.65 m，海拔1934 m。试验地土壤为红壤性水稻土，土壤质地为粘土，耕层0—20 cm土壤有机质含量80.02 g/kg、全氮4.54 g/kg、全磷1.56 g/kg、全钾12.8 g/kg、速效磷50.46 mg/kg、速效钾128.65 mg/kg、铵态氮10.8 mg/kg、硝态氮50.1 mg/kg、pH 7.46。

1.2　试验设计

氮的阈值试验共设6个处理，分别为施纯氮0（N0）；135（N1，75% N优化）；180（N2，N优化）；225（N3，125% N优化）；270（N4，150% N优化）；360（N5，200% N优化）kg/hm^2。氮肥为尿素，所有处理的磷、钾用量相同，磷肥为普钙，施用量为P_2O_5 75 kg/hm^2，钾肥为硫酸钾，施用量为K_2O 90 kg/hm^2；磷、钾肥作为基肥一次性施入，氮肥分基肥（70%）、孕穗肥（30%）两次施入。小区面积6.0 m×5.0 m，每处理3次重复，随机区组排列。田间管理措施均一致。供试水稻品种为楚粳28。2011年度水稻前茬种植作物为当地早熟蚕豆品种，水稻于2011年04月10日种植，05月19日移栽，采用3本栽插，10月10日收获。2011年05月19日施基肥，追肥日期为2011年07月26日。2012年水稻前茬种植作物为小麦，水稻种植日期为2012年04月16日，05月26日移栽，采用3本栽插，10月14日收获，基肥于2012年05月26日施入，08月07日施追肥。

1.3　测定项目及方法

田面水水样在中午基肥及孕穗肥施入后第1、2、3、5、9 d的10：00～11：00采集。采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定水样的可溶性总氮（DTN）。采用凯氏定氮法测定水稻植株全氮含量。土壤有机质用重铬酸钾容量法—外加热法；土壤全氮用H_2SO_4消煮—半微量开氏法；土壤全磷用NaOH熔融—钼锑钪比色法；土壤全钾用NaOH熔融—火焰光度法测定；土壤铵态氮用氯化钾浸提（液∶土=5∶1）—靛酚蓝比色法；土壤硝态氮用氯化钾浸提（液∶土=5∶1）紫外分光光度法；土壤速效磷用$NaHCO_3$浸提—钼蓝比色法；土壤速效钾用NH_4OAc浸提—火焰光度法测定。土壤pH用电位法（液∶土=5∶1）测定。作物收获后分别采集、制备籽粒和秸秆样品；每个小区采集10穴水稻作考种，实收籽粒，秸秆风干测产作为水稻实际产量。

1.4 计算及数据处理

植株氮素积累量(plant nitrogen accumulation, PNA) = 籽粒氮素积累量(grain nitrogen accumulation, GNA) + 秸秆氮素积累量(straw nitrogen accumulation, SNA)

氮素收获指数(%)(nitrogen harvest index, NHI) = 籽粒氮素积累量/植株氮素积累量 × 100

土壤氮素表观盈余率(%)(soil nitrogen apparent surplus rate, SNASR) = (施氮量 - 植株氮素积累量)/植株氮素积累量 × 100

氮肥吸收利用率(%)(nitrogen apparent recovery efficiency, NARE) = (施氮区植株氮素积累量 - 空白区植株氮素积累量)/施氮量 × 100

氮肥农学利用率(kg/kg)(nitrogen agronomy utilization efficiency, NAUE) = (施氮区水稻产量 - 空白区水稻产量)/施氮量

氮肥生理利用率(kg/kg)(nitrogen physiology utilization efficiency, NPUE) = (施氮区水稻产量 - 空白区水稻产量)/(施氮区植株氮素积累量 - 空白区植株氮素积累量)

氮肥偏生产力(partial factor productivity, PFP) = 施氮区水稻产量/施氮量

试验数据用 Excel 2003 和 SPSS Statistics 15.0 软件进行统计分析。

2 结果分析

2.1 不同施氮处理对水稻产量及构成的影响

表1表明,通过两年的试验表明,不同施氮处理间水稻产量随着施氮量的增加而增加,当施氮量达到270 kg/hm^2(N4)时,水稻产量最高,分别为10167 kg/hm^2 和 10644 kg/hm^2,之后随施氮量继续增加,水稻产量有下降趋势。从表1还可以看出,随着施氮量的增加,水稻单位面积的有效穗数和每穗粒数及瘪粒率都有增加趋势,千粒重则显著减小。2011年N1处理的水稻单位面积的有效穗与其他施氮处理差异不显著(N5除外),但2012年N1处理的水稻单位面积的有效穗数年显著低于其他施氮处理(N2 ~ N5),说明水稻施肥中持续投入较少的氮肥难以保证水稻获得较高的单位面积的有效穗,致使水稻产量显著低于其他施氮处理(N2 ~ N5)(表1)。总的来看,施用氮肥后,水稻产量的增加主要是由于水稻单位面积有效穗数的增加和实粒数能维持在适宜的水平,过多施入氮肥(N 360 kg/hm^2)反而导致水稻瘪粒率增加及千粒重下降,使水稻产量

表1 不同施氮处理对水稻产量及构成的影响

Table 1 Effects of different nitrogen application rates on rice yield and yield components

年份 Year	施氮水平 N level	实际产量 Actual yield (kg/hm^2)	有效穗 Effective panicle No. (No./m^2)	每穗粒数 Grains No. per panicle (No./panicle)	每穗实粒数 Filled grains No. per panicle (No./panicle)	瘪粒率 Empty grain rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)
2011	N0	7178 ±614 d	424.53 c	127.50 c	119.30 b	6.40 c	24.53 a
	N1	9178 ±58 c	552.53 b	144.27 abc	131.00 ab	9.01 b	23.77 b
	N2	9433 ±0 bc	550.40 b	137.90 bc	124.27 ab	9.83 ab	22.89 c
	N3	9767 ±151 ab	588.80 ab	151.87 ab	137.63 ab	9.34 ab	22.50 cd
	N4	10167 ±360 a	567.47 b	144.17 abc	130.50 ab	9.39 ab	22.39 d
	N5	9756 ±455 ab	682.67 a	158.60 a	141.33 a	10.98 a	21.91 e
2012	N0	5524 ±651 c	256.67 d	96.00 c	91.43 c	4.83 b	23.77 a
	N1	8589 ±756 b	406.00 c	136.13 b	126.77 b	6.86 b	23.78 a
	N2	9800 ±575 a	459.67 bc	157.77 ab	145.93 ab	7.49 b	22.96 b
	N3	9867 ±877 a	555.33 a	159.93 ab	146.73 ab	8.20 ab	22.88 b
	N4	10644 ±225 a	506.33 ab	166.93 a	153.53 a	8.09 b	22.40 bc
	N5	10244 ±64 a	525.00 ab	175.47 a	154.30 a	11.92 a	22.01 c

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

也有所下降。

2.2　不同施氮处理对水稻氮素积累量及氮素利用率的影响

施氮肥能促进水稻对氮素的吸收，水稻中的氮素主要集中于籽粒和秸秆中（表2）。相关分析结果表明，施氮量与水稻籽粒氮素积累量、秸秆氮素积累量、植株氮素积累量呈极显著正相关（相关系数在0.872以上），氮素积累量也都是随着施氮量的增加而增加。从表2还可以看出，不同年份水稻氮素收获指数（NHI）有所差异，2011年水稻NHI与施氮量显著负相关（相关系数为-0.403），N0～N4处理间无显著差异；但2012年水稻NHI与施氮量呈极显著负相关关系（相关系数为-0.928），N1～N5处理的NHI显著高于N0水平，这种差异主要是因为N0处理的土壤通过两年的耗竭试验养分含量下降，水稻秸秆的氮积累量下降的幅度（减少了20.58 kg/hm^{2}左右）大于水稻籽粒氮积累量下降的幅度（减少了16.09 kg/hm^{2}左右）。总的来看，水稻NHI随施氮量的增加而减小，表明施氮可降低氮素在籽粒中的比例，提高其在秸秆中的比例。土壤氮素表观盈余率（SNASR）是指施氮量与植株氮素积累量的差与植株氮素积累量的比值，可以在一定程度上反映土壤氮素盈余及作物氮素吸收利用情况。表3显示，SNASR随施氮量的增加而显著增加，当施氮量为360 kg/hm^2（N5）时，SNASR在99.75%～101.49%之间，土壤持续较高的SNASR最终将提高土壤氮素的残留量。从表3还可以看出，2012年相同处理的水稻氮肥吸收利用率（NARE）和农学利用率（NAUE）高于2011年，分别增加了10.35%～16.71%、5.95～11.22%；相同年份不同处理的水稻NARE无显著差异，但水稻偏生产力（PFP）随施氮量的增加而显著降低。2011和2012年水稻植株氮素积累量在施氮量为N 360 kg/hm^2（N5）时最高，分别为179.69 kg/hm^{2}和180.28 kg/hm^2，而NAUE最低为7.16%和13.11%，在该施氮水平时，氮肥生理利用率（NPUE）、水稻氮肥吸收利用率（NARE）也最低，分别为34.28%和41.65%、21.06%和31.41%，说明增加施氮量，提高了水稻氮素的累积量，而没有获得产量的同步增加，氮素利用效率低（表2、表3）。

表2　不同施氮处理对水稻氮素积累量及分配的影响

Table 2　Effects of different nitrogen application rates on N accumulation and distribution in rice

年份 Year	氮水平 N level	籽粒氮素积累量 Grain N accumulation (kg/hm^2)	秸秆氮素积累量 Straw N accumulation (kg/hm^2)	植株氮素积累量 Plant N accumulation (kg/hm^2)	氮素收获指数 Nitrogen harvest index (%)
2011	N0	67.37±5.45 d	36.50±3.85 c	103.87±9.17 d	64.88±0.96 ab
	N1	90.86±0.57 c	44.72±2.43 bc	135.58±2.13 c	67.03±1.29 a
	N2	94.32±1.18 c	50.45±6.90 b	144.76±5.73 bc	65.22±3.30 ab
	N3	102.69±2.93 b	51.33±5.60 b	154.02±5.74 b	66.71±2.65 a
	N4	113.13±3.42 a	65.17±6.42 a	178.30±8.74 a	63.49±2.03 ab
	N5	110.66±6.42 a	69.03±12.99 a	179.69±18.47 a	61.76±3.69 b
	r (n=18)	0.938**	0.872**	0.941**	-0.403*
2012	N0	51.28±5.60 d	15.92±4.67 e	67.19±10.18 d	76.56±3.26 a
	N1	84.14±6.64 c	33.55±3.43 d	117.69±8.37 c	71.49±2.26 b
	N2	97.98±5.78 b	40.18±0.51 c	138.16±6.08 b	70.89±1.11 b
	N3	98.97±8.66 b	43.85±0.81 c	142.82±8.61 b	69.24±2.00 bc
	N4	118.48±4.06 a	56.67±3.33 b	175.15±5.90 a	67.65±1.30 cd
	N5	116.87±1.92 a	63.42±3.04 a	180.28±4.37 a	64.83±0.96 d
	r(n=18)	0.942**	0.981**	0.967**	-0.928**

注（Note）：同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.　*表示相关性在0.05水平（单尾检验）Denotes the significances at the 0.05 level(1-tailed)；**表示相关性在0.01水平（双尾检验）Denotes the significances at the 0.01 level(2-tailed).

表3 不同施氮处理对水稻氮素利用率的影响

Table 3 N nutrition balance and N fertilizer efficiency in rice

年份 Year	氮水平 N level	土壤氮素表观盈余率 SNASR (%)	氮肥吸收利用率 NARE (%)	氮肥农学利用率 NAUE (kg/kg)	氮肥生理利用率 NPUE (kg/kg)	氮肥偏生产力 PFP (kg/kg)
2011	N0	-100.00 ±0.00 e	—	—	—	—
	N1	-0.41 ±1.56 d	23.49 ±8.14 a	14.81 ±4.70 a	63.68 ±6.63 a	67.98 ±0.43 a
	N2	24.44 ±4.84 c	22.72 ±7.54 a	12.53 ±3.42 a	55.82 ±4.32 ab	52.41 ±0.00 b
	N3	46.19 ±5.35 b	22.29 ±5.52 a	11.51 ±3.36 ab	51.29 ±4.20 b	43.41 ±0.67 c
	N4	51.63 ±7.62 b	27.57 ±3.00 a	11.07 ±2.67 ab	39.90 ±5.85 c	37.65 ±1.34 d
	N5	101.49 ±21.42 a	21.06 ±3.59 a	7.16 ±1.15 b	34.28 ±5.38 c	27.10 ±1.27 e
2012	N0	-100.00 ±0.00 e	—	—	—	—
	N1	15.00 ±7.92 d	37.40 ±11.20 a	22.70 ±6.78 a	60.84 ±3.73 a	63.62 ±5.60 a
	N2	30.42 ±5.83 c	39.43 ±2.99 a	23.75 ±1.45 a	60.30 ±1.84 a	54.44 ±3.20 b
	N3	57.85 ±9.69 b	33.61 ±4.21 a	19.30 ±2.92 a	57.37 ±3.29 a	43.85 ±3.89 c
	N4	54.25 ±5.25 b	39.98 ±3.41 a	18.96 ±1.82 a	47.45 ±3.12 b	39.42 ±0.84 c
	N5	99.75 ±4.80 a	31.41 ±1.62 a	13.11 ±1.79 b	41.65 ±3.60 c	28.46 ±0.18 d

注(Note): SNASR—Soil nitrogen apparent surplus rate; NARE—Nitrogen apparent recovery efficiency; NAUE—Nitrogen agronomy utilization efficiency; NPUE—Nitrogen physiology utilization efficiency; PFP—Partial factor productivity. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.3 不同施氮处理对田面水可溶性总氮(DTN)浓度的影响

有研究表明[9]水稻田氮肥通过氨挥发、径流、淋溶以及硝化—反硝化等损失可高达30%～70%。尿素施入水田后,经尿酶水解为各种形态的水溶性氮,因此,DTN的变化一定程度可以反映出氮肥投入是否合理。从表4可以看出,不同年份在施入基肥、施入孕穗肥后的9 d内,施氮量都与每日田面水DTN浓度呈极显著正相关性(相关系数在0.609以上);不同年份间田面水DTN浓度有所差异,年N1～N5处理的田面水DTN浓度在施入基肥后的2～5 d内低于2011年相同处理的田面水DTN浓度,这主要由于2012年在该段时间内有降雨发生,降雨在一定程度上稀释了田面水的DTN浓度。与不施氮处理(N0)相比,不同年份在施入基肥和孕穗肥后的3 d内,施氮处理能显著提高田面水DTN浓度;在施入基肥9 d后,2011年N3、N5处理的DTN浓度显著高于其他处理,而2012年N0～N4处理间则无显著差异,但N5处理的田面水DTN浓度显著高于N0处理(表4)。在施入孕穗肥后的9 d后,不同年份间DTN浓度变化相同,施肥处理N0～N3的田面水DTN浓度无显著差异,只有施氮量在270 kg/hm^2(N4)水平以上才能显著增加田面水DTN浓度(表4)。在两年的所有施氮处理(N1～N5)中,施入基肥后第9 d的田面水DTN浓度与第1 d相比减少了5.45～13.66倍,而施入孕穗肥后第9 d的田面水DTN浓度与第一天相比则减少了8.42～23.87倍。因此,施肥处理9 d内是防止田面水DTN损失的关键时期,田面水DTN施肥后9 d内的浓度变化可以作为环境指标而确定氮肥投入阈值。

2.4 不同氮肥投入对水稻产量及环境指标的影响

通过两年的田间定位试验,本试验条件下水稻产量与施氮量的关系可用以下二次曲线方程进行拟合,$y = -0.042089x^2 + 25.618857x + 6313.947033$,$r = 0.831$。通过计算,当水稻籽粒产量最高(10212.39 kg/hm^2)时的施肥量为304.34 kg/hm^2;当以最高产量的95%为相对产量计算可得到,当相对产量为9701.77 kg/hm^2,对应的施肥为414.49 kg/hm^2(舍去)和194.20 kg/hm^2,194.20 kg/hm^{2}为环境友好的推荐施氮量。同理,可以得出田面水可溶性总氮(DTN)浓度(基肥和孕穗肥施入后9 d内各时期平均值之和)随施氮量的变化曲线为: y =

表 4　施肥量对田面水可溶性总氮浓度的影响(mg/L)

Table 4　The dissolved total nitrogen (DTN) concentration in the surface water under different N rates

年份 Year	施肥时期 N application period	施氮水平 N level	施肥后天数 The days after N application (d)				
			1	2	3	5	9
2011	基肥 Base stage	N0	0.42 e	2.64 e	5.34 e	4.32 d	1.68 c
		N1	37.77 d	55.53 d	51.98 d	11.86 cd	3.73 c
		N2	67.66 c	76.78 cd	78.02 cd	18.40 c	6.13 bc
		N3	87.16 bc	118.56 bc	88.24 bc	34.80 b	16.00 a
		N4	112.86 b	147.55 ab	113.31 b	53.20 a	8.26 b
		N5	144.01 a	192.89 a	162.74 a	47.74 a	16.40 a
		$r(n=18)$	0.957**	0.930**	0.943**	0.867**	0.785**
	孕穗肥 Booting stage	N0	3.66 d	3.12 e	1.69 f	1.40 d	1.81 c
		N1	26.79 c	15.11d	6.31 e	2.05 d	1.85 c
		N2	39.96 bc	23.03 cd	14.84 d	5.28 cd	2.02 c
		N3	51.33 b	30.56 bc	20.30 c	8.75 c	2.15 c
		N4	52.51 b	37.06 b	27.45 b	15.14 b	4.90 b
		N5	96.18 a	54.16 a	46.34 a	29.49 a	9.71 a
		$r(n=18)$	0.943**	0.947**	0.942**	0.858**	0.736**
2012	基肥 Base stage	N0	5.72 d	3.12 d	6.88 d	3.01 c	4.07 b
		N1	55.19 c	44.08 c	25.66 bc	8.71 bc	6.34 ab
		N2	75.64 c	52.38 bc	28.52 b	15.65 ab	7.60 ab
		N3	96.98 bc	62.73 bc	46.34 a	19.44 ab	8.17 ab
		N4	108.35 ab	69.89 ab	55.73 a	15.33 abc	8.59 ab
		N5	132.24 a	91.74 a	54.92 a	20.10 a	9.77 a
		$r(n=17)$	0.954**	0.909**	0.897**	0.664**	0.609**
	孕穗肥 Booting stage	N0	2.22 d	1.56 d	1.85 e	1.90 d	2.41 c
		N1	24.47 cd	18.99 c	10.10 de	5.56 cd	2.23 c
		N2	26.52 c	21.81 c	13.58 cd	11.31 bc	3.15 c
		N3	43.51 bc	35.82 b	19.65 bc	10.89 bc	2.76 c
		N4	54.51 ab	40.64 b	27.34 b	17.21 b	5.88 b
		N5	71.44 a	49.77 a	37.35 a	28.54 a	8.19 a
		$r(n=17)$	0.900**	0.951**	0.929**	0.885**	0.805**

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level. ** 表示相关性在 0.01 水平(双尾检验) Denotes the significances at the 0.01 level (2-tailed).

$0.000236\ x^2 + 0.271011x + 4.243089$, $r = 0.912$; SNASR 随施氮量的变化曲线为: $y = -0.000845x^2 + 0.839024x - 97.434136$, $r = 0.968$。本研究以氮肥效应为基础,以水稻籽粒产量和环境指标(田面水 DTN、SNASR)作为确定氮肥投入阈值的约束条件,按 0 到最高产量的 95% 时对应的施氮量(环境友好的推荐施氮量)、环境友好的推荐施氮量到达到最高产量时氮肥投入量的 75%、达到最高产量时

氮肥投入量的75%到达到最高产量时的氮肥投入量、达到最高产量时的氮肥投入量到达到最高产量时的氮肥投入量的125%、大于达到最高产量时的氮肥投入量的125%计算,可以得出本试验的氮肥投入阈值分为五种情况(图1):1)当施肥量为0～194.20 kg/hm^{2}时,水稻产量范围在6313.95～9701.78 kg/hm^2, SNASR在-97.43%～33.63%间,田面水DTN 9 d内的平均浓度在4.24～65.77 mg/L之间,水稻因施氮量较少将减产,但不会对环境造成污染。2)当施肥量为194.20～228.26 kg/hm^{2}时,水稻产量范围在9701.78～9968.73 kg/hm^{2}间,SNASR为33.63%～50.05%,田面水DTN 9 d内的平均浓度在65.77～78.40 mg/L间,减量施氮难以使水稻获高产,对环境造成污染的机会较小。3)当施肥量在228.26～304.34 kg/hm^{2}时,水稻产量范围在9968.73～10212.39 kg/hm^2, SNASR在50.05%～79.65%之间,田面水DTN 9 d内的平均浓度在78.40 mg/L～108.58 mg/L间,水稻在正常的环境条件下能持续高产,水田生态系统通过自身调节能使环境可承受。4)当施肥量在304.34～380.43 kg/hm^{2}时,水稻产量在10212.39～9968.73 kg/hm^{2}之间,能保证较高的水稻产量;但由于施肥量加大,使SNASR在79.65%～99.46%之间,田面水DTN 9 d内的平均浓度在108.58～141.50 mg/L之间,土壤、水体环境面临污染压力,有环境污染的风险。5)当施肥量大于380.43 kg/hm^{2}后,水稻产量小于9968.73 kg/hm^2, SNASR在99.46%以上,田面水DTN在9 d内的平均浓度在141.50 mg/L以上,将造成水稻减产、环境受污染的不利局面。

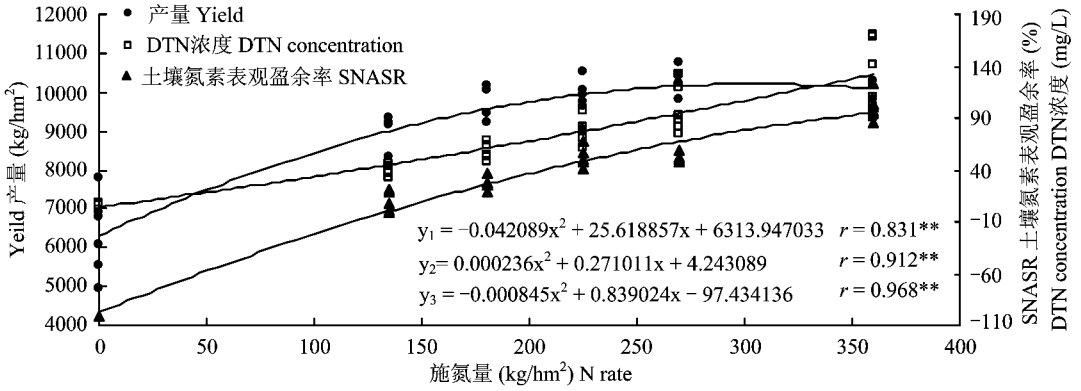

图1 施氮量与产量及环境指标的拟合曲线

Fig. 1 The relationship between the yield, the N environmental indicators and the N rates

[注(Note): DTN—可溶性总氮 Dissolved total nitrogen; SNASR—Soil nitrogen apparent surplus rate; y_1—水稻产量 Rice yield; y_2—施入氮肥后9 d内田面水DTN的平均浓度 Mean values of DTN concentrations in the surface water during 9 days after N application; y_3—土壤氮素表观盈余率—Soil nitrogen apparent surplus rate.]

3 讨论与结论

土壤供氮不足时,水稻缺少氮的吸收,其生长发育则缓慢或停滞;当土壤氮素供应与氮肥投入超过作物的需求时,土壤剖面氮素积累与环境压力则显著增加[10-11]。所以寻找合适的氮肥投入阈值对挖掘水稻的产量潜力,减少农田氮素面源污染都至关重要。水稻的种植在国内很广泛,由于不同地区的土壤和环境条件差异较大,水稻对不同施肥措施和不同的生长季节响应也不尽一致,因此不同地区水稻产量及氮肥投入往往有所差异。有专家学者[12-13]认为,通过施氮量-产量模型确定最高产量及水稻经济适宜施氮量是有效的方法之一。有研究表明在水稻季减量施肥不会降低土壤后续生产力[14],轮作模式中的氮素表观损失主要发生在水稻季,减氮处理能减少氮素表观损失[15]。也有学者[16-17]认为,水稻种植应兼顾生产、生态和经济三效益,并引用了环境经济学Coase原理和农业技术经济学的边际收益分析原理,求得在富阳地区适宜施氮量应为195～232 kg/hm^2,相应的产量为8336.13 kg/hm^2;而在苏南太湖流域合理的水稻施肥量为221.15～261.14 kg/hm^2。同许多试验研究结果[18-21]一样,当施氮量达到304.34 kg/hm^{2}时产量最大,随后增加氮肥投入只会使水稻产量下降。本研究获得水稻最高产量时的施氮量略高于国内研究结果,这可能与水稻品种需肥特性有关。该区农

户水稻施肥更多是以厩肥为基肥，在返青期及孕穗期追施尿素，而在前茬作物种植中，农户受经济效益的驱动，不同作物类型的肥料施用量差异较大，经济作物（如大蒜、洋葱）的氮、磷施用量大于大田作物的施用量（如蚕豆、大麦、小麦），土壤养分残留偏高[22]，因此不同轮作模式条件下应适当调整水稻的施氮量。本试验采用水稻品种楚粳28，因其具有抗病性强的特性和适宜在高海拔地区种植的优点是该地区主要推广的水稻品种，但该品种获得高产往往需要投入较高的氮肥，这为氮素的高损失创造了有利条件。因此必须充分挖掘不同水稻品种的增产潜力，这与水稻栽培过程中氮肥的适时、平衡施用是密不可分的，今后仍需加强这方面的研究，以实现水稻的高产，减少水稻施肥中的氮素损失。本试验的氮肥效应模拟结果能代表并预测该区水稻土投入氮肥后的产量、相关环境指标的变化，可为该区水稻的种植提供最佳的施氮量。本试验结果表明：水稻施氮量为 304.34 kg/hm^2 时，水稻产量达到最高（10212.39 kg/hm^2）。当施肥量在 228.26 ～ 304.34 kg/hm^2 时，水稻的产量范围为 9968.73 ～ 10212.39 kg/hm^2，土壤氮素表观盈余率（SNASR）在 50.05% ～ 79.65% 之间，田面水可溶性总氮（DTN）9 d 内的平均浓度在 78.40 mg/L ～ 108.58 mg/L 之间。因此在当前生产条件下，推荐水稻施氮量为 228.26 ～ 304.34 kg/hm^2 时可保证水稻稳定高产并且环境可承受。

参 考 文 献：

[1] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4.
Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 1-4.

[2] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, 32(1): 60-64.
Feng T, Yang J P, Shi H X *et al*. Effect of N fertilizer and N use efficiency under different N levels of application in high fertility paddy field[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2006, 32(1): 60-64.

[3] Ngkee K, Bholahk F. Nitrogen and phosphorus transport by surface, from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2002, 91: 147-157.

[4] 汪华, 杨京平, 金洁, 孙军华. 不同氮素用量对高肥力稻田土壤-水稻-水体氮素变化及环境影响分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 50-54.
Wang H, Yang J P, Jin J, Sun J H. N variation in rice-soil-water system under different N application level in high-yielding paddy field and its environment effect[J]. J. Soil Water Conserv., 2006, 20(1): 50-54.

[5] 杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析[J]. 云南环境科学, 2006, (25)(增刊): 113-115.
Yang X X. Analysis on total phosphorus and nitrogen pollution status of Erhai watershed[J]. Yunnan Environ. Sci., 2006, (25)(Suppl): 113-115.

[6] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, (4): 188-193.
Si Y B, Wang S Q, Chen H M. Nitrogen and phosphorus loss of farmland and eutrophication[J]. Soils, 2000, (4): 188-193.

[7] 程磊磊, 尹昌斌, 胡万里, 周颖. 云南省洱海北部地区农田面源污染现状及控制的补偿政策[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 471-474.
Cheng L L, Yin C B, Hu W L, Zhou Y. Subsidy policy for agricultural nonpoint pollution control in Northern area of Erhai Lake of Yunnan province[J]. Res. Agric. Mod., 2010, 31(4): 471-474.

[8] 汤秋香, 翟丽梅, 雷宝坤, 等. 洱海流域北部农田养分平衡及残留特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2163-2170.
Tang Q X, Zhai L M, Lei B K *et al*. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2010, 29(11): 2163-2170.

[9] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(1): 1-6.

[10] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X *et al*. On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in north China, plain[J]. Agron. J., 2008, 100(6): 1527-1534.

[11] Alam M M, Ladha J K, Foyjunn Essa *et al*. Nitrogen management for increased productivity of rice-wheat cropping system in Bangladesh[J]. Field Crops Res., 2006, 96: 374-386.

[12] 崔新卫, 朱校奇, 龙世平, 等. 超级杂交稻“Y 两优 1 号”对氮肥用量的响应及其氮肥利用率[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 945-949.
Cui X W, Zhu X Q, Long S P *et al*. Response of super hybrid rice “Y Liang you No. 1” to N-fertilizer dose and its N use efficiency[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2010, 18(5): 945-949.

[13] 李向辉, 鲁艳红, 廖育林, 等. 氮肥施用量对晚稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 湖南农业科学, 2010, (15): 52-54.
Li X H, Lu Y H, Liao Y L *et al*. Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen use efficiency of late rice [J]. Hunan Agric. Sci., 2010, (15): 52-54.

[14] 向圣兰, 刘敏, 陆敏, 等. 不同施氮水平对水稻产量、吸氮

量及土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(19): 8178-8179.
Xiang S L, Liu M, Lu M *et al*. Effects of different nitrogen applications on grain yield and soil fertility [J]. J. Anhui Agric. Sci., 2008, 36(19): 8178-8179.

[15] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1069-1077.
Yi Q, Zhang X Z, He P *et al*. Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(5): 1069-1077.

[16] 王米, 杨京平, 徐伟, 等. 分次施氮对单季稻氮素利用率及生态经济适宜施氮量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35(1): 71-76.
Wang M, Yang J P, Xu W *et al*. Influence of nitrogen rates with split application on N use efficiency and its eco-economic suitable amount analysis in rice[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2009, 35(1): 71-76.

[17] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 李荣刚. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 659-662.
Cui Y T, Cheng X, Han C R, Li R G. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed[J]. Acta Ecol. Sin., 2000, 20(4): 659-662.

[18] Jing Q, Boumanb B A M, Hengsdjk H *et al*. Exploring options to combine high yields with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China[J]. Eur. J. Agron., 2007, 26: 166-177.

[19] Ju X T, Liu X J, Pan J R, Zhang F S. Fate of ^{15}N-labeled urea under a winter summer maize rotation on the north China plain [J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 52-61.

[20] 谢芳, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同施氮处理对水稻氮素吸收及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 24-26.
Xie F, Han X R, Yang J F *et al*. Effect of N fertilizer application on nitrogen absorption and yield of rice[J]. China Soils Fert., 2010, (4): 24-26.

[21] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al*. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(5): 835-839.