

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.08.009

方艺, 委亚庆, 张世浩, 等. 重庆稻油轮作区氮素利用及氮肥投入阈值研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(7): 95-104.

# 重庆稻油轮作区氮素利用及氮肥投入阈值研究

方艺<sup>1,2</sup>, 委亚庆<sup>1</sup>, 张世浩<sup>1</sup>, 李泽慧<sup>1</sup>, 习向银<sup>1,3</sup>

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 海南热带海洋学院 旅游学院, 海南 三亚 572022;

3. 土肥资源高效利用重庆市重点实验室, 重庆 400715

**摘要:** 通过研究氮肥用量对水稻油菜轮作作物产量、氮素吸收、经济效益及土壤氮素平衡的影响, 探讨氮素利用与施氮量的关系, 确定作物系统氮肥投入阈值, 达到高产和环境友好双赢的目的, 为重庆地区稻油轮作合理施肥提供理论依据. 于 2018—2019 年在重庆市典型水稻油菜轮作区, 设置 5 个氮肥用量(0, 75, 150, 225, 300 kg/hm<sup>2</sup>), 采用随机区组设计, 研究氮肥用量对重庆地区水稻油菜轮作作物产量、氮素利用、土壤矿质氮空间分布及氮素平衡的影响. 结果表明: 施氮能显著提高重庆地区水稻油菜轮作的作物产量和氮素积累量, 其中施氮量对产量促进作用以油菜季 300 kg/hm<sup>2</sup> 和水稻季 225 kg/hm<sup>2</sup> 最佳, 分别提高 125.75% 和 37.74%; 对氮素积累量促进作用皆以 300 kg/hm<sup>2</sup> 最佳, 分别提高 187.29% 和 111.66%. 油菜季氮肥偏生产力(PFP<sub>N</sub>)、氮肥农学利用率(AE<sub>N</sub>)、氮肥表观利用率(RE<sub>N</sub>)及水稻季 PFP<sub>N</sub> 和 AE<sub>N</sub> 均随氮肥增加呈现下降趋势, RE<sub>N</sub> 则呈现先增加后下降的趋势. 氮肥用量与油菜和水稻产量(油菜季 R<sup>2</sup>=0.913, 水稻季 R<sup>2</sup>=0.913)以及作物吸氮量(油菜季 R<sup>2</sup>=0.895, 水稻季 R<sup>2</sup>=0.879)均呈线性加平台关系, 与油菜和水稻经济效益(油菜季 R<sup>2</sup>=0.914, 水稻季 R<sup>2</sup>=0.898)呈二次曲线关系, 与土壤氮素表观损失量(油菜季 R<sup>2</sup>=0.860, 水稻季 R<sup>2</sup>=0.925)呈线性关系. 油菜季施氮量为 165.35~183.38 kg/hm<sup>2</sup> 和水稻季施氮量为 156.45~193.82 kg/hm<sup>2</sup> 是兼顾作物产量的氮素投入阈值, 油菜季施氮量为 172.41~249.30 kg/hm<sup>2</sup> 和水稻季施氮量为 135.17~246.61 kg/hm<sup>2</sup> 是兼顾作物经济效益的氮素投入阈值, 油菜季施氮量为 83.11~218.57 kg/hm<sup>2</sup> 和水稻季施氮量为 155.47~245.32 kg/hm<sup>2</sup> 是兼顾作物吸氮量和土壤氮素表观损失量的氮素投入阈值. 综合考虑作物产量、经济效益以及环境因素, 重庆稻油轮作区油菜季化学氮肥投入阈值为 172.41~183.38 kg/hm<sup>2</sup>, 水稻季化学氮肥投入阈值为 156.45~193.82 kg/hm<sup>2</sup>.

**关键词:** 水稻油菜轮作; 产量; 氮肥阈值; 氮素利用; 重庆地区

中图分类号: S511 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)08-0095-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on Nitrogen Utilization and Chemical Nitrogen Fertilizer Input Threshold of Rape and Rice Rotation in Chongqing

FANG Yi<sup>1,2</sup>, WEI Yaqing<sup>1</sup>, ZHANG Shihao<sup>1</sup>,  
LI Zhehui<sup>1</sup>, XI Xiangyin<sup>1,3</sup>

收稿日期: 2021-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200100); 农业农村部现代农业产业体系建设项目(CARS-22).

作者简介: 方艺, 硕士, 主要从事植物营养与环境研究.

通信作者: 习向银, 博士, 副教授.

1. College of Resource and Environments, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. College of Tourism, Hainan Tropical Ocean University, Sanya Hainan 572022, China;
3. Key Laboratory of Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In this research, the effects of nitrogen fertilizer application rate on crop yield, nitrogen uptake, economic benefit and soil nitrogen balance of rice-rape rotation system were studied. By discussing the relationship between nitrogen utilization and nitrogen application rate, we determined the nitrogen input threshold which could achieve both high yield and environmentally friendly, and provided theoretical basis for rational fertilizer application in rice-rape rotation area of Chongqing. Five nitrogen rates (0, 75, 150, 225, 300) kg/hm<sup>2</sup> were set in a typical rice rapeseed rotation area in Chongqing from 2018 to 2019 with a random block design. We studied the influence of nitrogen fertilizer application on crop yield, nitrogen use, spatial distribution of soil mineral nitrogen and nitrogen balance in rice-rape rotation. Nitrogen application could significantly increase crop yield and N accumulation of rice rapeseed rotation in Chongqing. The results showed that nitrogen application could significantly increase the crop yield and nitrogen accumulation of rice-rape rotation in Chongqing area. The best promoting effect of nitrogen application was 300 kg/hm<sup>2</sup> in rape season and 225 kg/hm<sup>2</sup> in rice season, which increased the yield by 125.75% and 37.74%, respectively. The best N accumulation rate of nitrogen application was 300 kg/hm<sup>2</sup> in rice season and rape season, which increased N accumulation by 187.29% and 111.66%, respectively. Partial factor productivity of N (PFP<sub>N</sub>), N apparent recovery efficiency (RE<sub>N</sub>) and N agronomic efficiency (AE<sub>N</sub>) in rape season, and PFP<sub>N</sub> and AE<sub>N</sub> in rice season were all decreased with the increase of N application rate, while RE<sub>N</sub> in rice season showed a trend of first increasing and then decreasing. The amount of nitrogen fertilizer had a linear plus platform relationship with the yield of rape and rice ( $R^2=0.913$  in rape season and  $R^2=0.913$  in rice season) and the amount of nitrogen uptake by crops ( $R^2=0.895$  in rape season and  $R^2=0.879$  in rice season). The amount of nitrogen fertilizer had a quadratic curve relationship with the economic benefits of rape and rice ( $R^2=0.914$  in rape season and  $R^2=0.898$  in rice season). There was a linear relationship between the amount of nitrogen fertilizer and the apparent loss of soil nitrogen ( $R^2=0.860$  in rape season,  $R^2=0.925$  in rice season). The nitrogen application rates of 165.35~183.38 kg/hm<sup>2</sup> in the rape season and 156.45~193.82 kg/hm<sup>2</sup> in the rice season were the nitrogen input thresholds for crop yield. The nitrogen application rates of 172.41~249.30 kg/hm<sup>2</sup> in the rape season and 135.17~246.61 kg/hm<sup>2</sup> in the rice season were the nitrogen input thresholds for net income of crops, while the nitrogen application rates of 83.11~218.57 kg/hm<sup>2</sup> in the rape season and 155.47~245.32 kg/hm<sup>2</sup> in the rice season were the nitrogen input thresholds for nitrogen uptake by crops and the apparent nitrogen loss in soil. Taking into account of crop yields, economic benefits and environmental factors, the input threshold of chemical nitrogen fertilizer for rape season in the rice-rape rotation area in Chongqing is 172.41~183.38 kg/hm<sup>2</sup>, and for rice season is 156.45~193.82 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** rice rape rotation; yield; nitrogen fertilizer threshold; Nitrogen utilization; Chongqing area

目前,我国农田氮肥利用率远低于发达国家水平,仅为30%~35%<sup>[1]</sup>.大量未被利用的氮肥导致了一系列问题,如土壤肥力不断升高,肥料的增产效应逐渐降低,单位面积氮肥残留量增加等<sup>[2-4]</sup>.这已成为我国水环境和大气环境污染的重要原因之一,对我国农业的可持续发展以及人类的生存环境构成了威胁<sup>[5-7]</sup>.长江上游是我国重要的农业生态功能区和生态脆弱区,水稻油菜轮作是长江流域最具代表性和分布最广泛的耕作制度之一.合理施肥是农作物增产的关键环节,然而农业生产中盲目施用化肥的现象非常普遍<sup>[8-10]</sup>.最新研究表明,长江流域作物生产总共同向水体流入约为6 Tg的氮素,其中油菜约占7.95%,水稻更是达到22.31%,可见,水稻和油菜是水体氮素负荷的主要贡献者之一<sup>[11]</sup>.确定重庆地区水稻油菜轮作化学氮肥

投入阈值非常必要, 以期能达到作物高产、环境友好及农业可持续发展的目的. 朱兆良<sup>[12]</sup>在总结国内土壤氮素研究结果的基础上, 对中国农田中化肥氮的去向进行了初步估计, 认为通过氨挥发、表观硝化-反硝化、淋溶、径流等途径损失的氮量约为 52%, 印证了中国主要粮食产区氮肥利用率低、损失率高的事实. 有研究表明<sup>[13-17]</sup>, 合理施用氮肥在水稻、油菜生产中可提高氮肥利用率及偏生产力, 也可明显提高土壤肥力、作物产量及经济效益. 因地形、气候、土壤肥力等因素的影响, 不同地方油菜和水稻的适宜施氮量不同. 洞庭湖平原油菜施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup> 时油菜的产量和氮肥利用效率最佳<sup>[18]</sup>, 湖北省油菜适宜施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>, 江浙油菜主产区冬油菜的氮肥适宜用量在 180~270 kg/hm<sup>2</sup> 之间<sup>[20]</sup>. 宫亮等<sup>[21]</sup>确定辽河三角洲地区水稻氮肥施用阈值为 210~245 kg/hm<sup>2</sup>. 施泽升等<sup>[22]</sup>认为洱海北部地区推荐水稻施氮量为 228.26~304.34 kg/hm<sup>2</sup>. 苏南太湖流域目前生产条件下, 兼顾生产、生态和经济比较合理的水稻施氮量为 221.5~261.4 kg/hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>. 水稻油菜轮作是水作和旱作交替下进行种植, 这种土壤干湿交替变化会引起土壤物理、化学和生物特性的变化, 进而对土壤养分循环和土壤肥效产生深刻影响<sup>[24]</sup>. 目前关于氮肥投入阈值研究多数集中于单季作物水稻或者油菜上, 而关于水稻油菜轮作的氮肥投入阈值研究尚未见报道. 本文在重庆永川采用田间随机区组法研究不同氮肥用量对水稻油菜轮作物产量、氮肥利用、经济效益及氮素平衡的影响, 以期为重地区水稻油菜轮作氮肥合理施用提供理论依据. 这对实现粮油作物绿色高产高效与农业可持续发展以及保障农业环境安全具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验于 2018 年 10 月至 2019 年 8 月在重庆市永川区来苏镇水磨滩村三元坝 3 社(29°16'N, 105°48'E)进行. 该区域海拔 282 m, 年平均气温 17.6 °C, 年平均降水量 801.1 mm. 供试土壤类型为水稻土, 土壤有机质 19.3 g/kg, 全氮 1.70 g/kg, 碱解氮 184.35 mg/kg, 有效磷 4.74 mg/kg, 速效钾 133 mg/kg, pH 值 5.64, 有效硼 0.396 mg/kg. 试验期间日均温及日降雨量的动态变化见图 1.

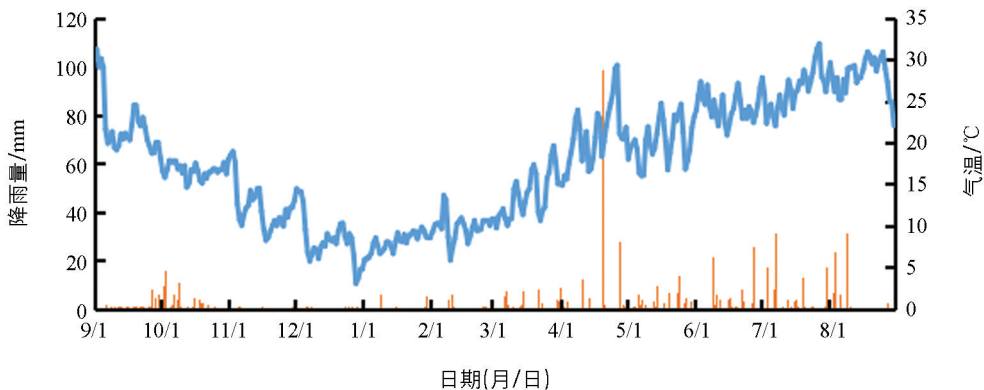


图 1 试验期间日均温和日降雨量的动态变化(2018—2019 年)

### 1.2 供试材料

供试水稻品种为晶两优 534, 生育期约为 126.8 d; 供试油菜品种为宝油早 12, 生育期约为 190 d. 尿素(N, 46.4%), 过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12%), 硫酸钾(K<sub>2</sub>O, 52.0%), 硼砂(B, 11%).

### 1.3 试验设计

试验设置 5 个氮肥处理(表 1), 3 次重复, 随机区组排列, 共 15 个小区. 每个试验小区面积为 20 m<sup>2</sup>. 油菜季氮肥的基肥、越冬肥和薹肥施用比例为 60%, 20% 和 20%. 水稻季氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥施用比例为 50%, 35% 和 15%. 各个小区磷肥、钾肥和硼肥全部基施, 施肥方法均为撒施. 油菜于 2018 年 10 月 23 日直播, 播种量为 3 kg/hm<sup>2</sup>, 2019 年 4 月 25 日收获. 水稻于 2019 年 5 月 29 日移栽, 密度为 15 万窝/hm<sup>2</sup>, 每窝 2 株, 移栽株行距为 21 cm×30 cm, 2019 年 8 月 28 日收获. 为防止各处理间水、肥串灌和被雨水淋垮, 小间用泥土筑埂并用塑料薄膜包裹隔开. 除施肥外, 各小区其他田间管理措施相同.

表 1 各处理肥料用量情况

/(kg · hm<sup>-2</sup>)

处理		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	B
油菜季	N0	0	60	75	15
	N75	75	60	75	15
	N150	150	60	75	15
	N225	225	60	75	15
	N300	300	60	75	15
水稻季	N0	0	60	75	—
	N75	75	60	75	—
	N150	150	60	75	—
	N225	225	60	75	—
	N300	300	60	75	—

## 1.4 测定项目与测定方法

### 1.4.1 土壤样品采集及测定

施肥前采集试验地耕层土样并进行理化性质分析。以整个试验田块为采样单元,采用 S 形取样方法在试验田块内采集 15 个土壤样品进行混匀,作为基础土壤样品,风干过筛,供土壤基础理化性质分析用。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消化-流动注射分析仪测定;有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定; pH 值按照水土比 2.5 : 1 采用 pH 计测定<sup>[25]</sup>。

在作物播种前和收获后,每小区采用 S 形 5 点法采样,采样深度 0~60 cm,每 20 cm 为 1 个混合样。鲜土样约 500 g 冷藏保存,分析硝态氮、铵态氮、质量含水量(土壤中水分的质量与干土质量的比值)。用烘干法测定新鲜土壤水分质量分数,用 KCL 浸提法使用吉田流动注射分析仪(德国 AutoAnalyzer)测定新鲜土壤样本中的硝态氮和铵态氮质量分数。

### 1.4.2 植物样品采集及测定

成熟期各处理采集代表性植株 5 株,在 105 °C 下杀青 30 min,而后在 75 °C 烘干,植株全氮测定采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-凯氏定氮法。

### 1.4.3 计产

每季作物成熟时每小区随机取样 10 株考种,并测量生物产量、籽粒产量,各小区单收单打。

## 1.5 计算公式

本文中计算公式参考文献[26-28]。

氮素积累量(N):

$$N = W \times \omega_N$$

氮肥偏生产力(PFP<sub>N</sub>, 以 N<sub>PFP</sub> 表示):

$$N_{PFP} = Y/F$$

氮肥农学利用率(AE<sub>N</sub>, 以 N<sub>AE</sub> 表示):

$$N_{AE} = (Y - Y_0)/F$$

氮肥表观利用率(RE<sub>N</sub>, 以 N<sub>RE</sub> 表示):

$$N_{RE} = (N_x - N_0)/F \times 100$$

氮肥生理利用率(PE<sub>N</sub>, 以 N<sub>PE</sub> 表示):

$$N_{PE} = (Y - Y_0)/(N - N_0)$$

式中, W 为干物质量, ω<sub>N</sub> 为氮质量分数, Y 为施氮区作物籽粒产量, F 为施氮量, Y<sub>0</sub> 为未施氮区作物籽粒

产量,  $N_x$  为施氮区植株氮积累量,  $N_0$  为未施氮区植株氮积累量。

根据氮素平衡模型计算氮的表观损失量。把化肥施用氮素和土壤矿化氮作为氮素输入来源, 不考虑额外的氮素输入, 且不考虑氮肥激发效应, 假设各处理间土壤氮矿化量相同; 氮肥输出仅考虑作物吸收氮素, 不考虑挥发和淋溶等因素损失的氮素。

土壤剖面中各土层矿化氮累积量( $N_{\text{MIN}}$ ):

$$N_{\text{MIN}} = d \times \rho b \times C \times 0.1$$

土壤矿化氮量( $\sum N_{\text{MIN}}$ ):

$$\sum N_{\text{MIN}} = N_0 + RN_{\text{MIN}} - BN_{\text{MIN}}$$

氮表观损失量( $N_{\text{al}}$ ):

$$N_{\text{al}} = (F + BN_{\text{MIN}} + \sum N_{\text{MIN}}) - (N_x + RN_{\text{MIN}})$$

式中,  $d$  为土层厚度(cm);  $\rho b$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $C$  为土壤中矿化氮质量分数( $\text{mg}/\text{kg}$ );  $RN_{\text{MIN}}$  为不施氮区土壤残留  $N_{\text{MIN}}$ ;  $BN_{\text{MIN}}$  为不施氮区土壤起始  $N_{\text{MIN}}$ 。

## 1.6 统计分析

采用 EXCEL 2016 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理分析, 采用单因素方差分析( $p < 0.05$ )的 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮水平对稻油轮作产量及氮肥利用率的影响

由表 2 可以看出, 施氮处理能显著提高油菜季产量和成熟期氮素积累量( $p < 0.05$ ), 增加幅度分别为 73.31%~125.75%和 94.86%~187.29%, 且 N300 处理增产效果最佳。与不施氮处理相比, N300 处理使油菜季产量增产 1 335.00  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 油菜季成熟期氮素积累量增加 77.67  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。油菜季氮肥偏生产力、氮肥农学利用率、氮肥表观利用率随施氮量增加均显著下降, 由小到大依次为 N300, N225, N150, N75。与低氮处理(N75)相比, 中高氮处理(N300, N225, N150)的氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥表观利用率降幅范围分别为 40.70%~50.65%, 44.52%~67.43%, 37.09%~57.13%。油菜季氮肥生理利用率各个施氮处理之间差异无统计学意义( $p < 0.05$ )。

表 2 施氮水平对水稻油菜轮作产量和氮肥利用率的影响

作物	处理	产量/	氮素积累量/	氮肥偏生产力/	氮肥农学利用率/	氮肥表观利用率/	氮肥生理利用率/
		( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	%	( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
油菜	N0	1 061.67±90.18c	41.47±1.34e	—	—	—	—
	N75	1 840.00±126.19b	80.81±1.39d	24.53±1.68a	10.38±1.68a	52.46±1.85a	19.81±3.34a
	N150	2 041.67±63.71b	88.14±6.68c	13.61±0.42b	6.53±0.42b	31.11±4.46b	21.21±2.42a
	N225	2 315.00±30.00a	105.82±2.77b	10.29±0.13c	5.57±0.13bc	28.60±1.23bc	19.49±0.75a
	N300	2 396.67±191.40a	119.14±4.62a	7.99±0.64d	4.45±0.64c	25.89±1.54c	17.24±2.72a
水稻	N0	9 350.00±307.59d	124.37±14.98d	—	—	—	—
	N75	10 778.57±363.30c	155.61±9.52c	145.71±4.84a	19.05±4.84a	41.65±12.69a	45.73±11.63c
	N150	11 897.14±454.83b	202.48±10.76b	79.31±3.03b	16.98±3.03a	52.07±7.18a	81.53±14.56b
	N225	12 878.57±502.09a	253.07±18.20a	57.24±2.23c	15.68±2.23ab	57.20±8.09a	112.95±16.07a
	N300	12 507.14±301.02ab	263.24±9.37a	41.69±1.00d	10.52±1.00b	46.29±3.12a	101.06±9.64ab

水稻季各施氮处理具有显著的增产效果( $p < 0.05$ ), 产量较不施氮处理提高了 15.28%~37.74%, 其中 N225 处理效果最佳, 增产 3 528.57  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。水稻季成熟期氮素积累量增加幅度为 25.12%~111.66%, 以 N300 处理效果最佳, 增加 138.87  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。水稻季氮肥偏生产力和氮肥农学利用率随施

氮量增加的变化规律与油菜季相似,较 N75 处理分别下降了 45.57%~71.39%,10.87%~44.78%。水稻季氮肥表观利用率各个施氮处理之间差异无统计学意义( $p < 0.05$ )。水稻季氮肥生理利用率变化动态由小到大依次为 N75, N150, N300, N225。相对于 N75 处理,其他施氮处理氮肥生理利用率增加幅度为 78.29%~146.99%,其中 N225 处理增幅最大,达到了 67.22 kg/kg。

## 2.2 施氮水平对稻油轮作土壤剖面无机氮分布的影响

油菜收获后耕层 0~60 cm 土壤剖面中矿质氮质量分数分布见图 2。由图 2 可知,施氮显著提高了油菜季耕层 0~20 cm 土壤铵态氮和硝态氮的质量分数( $p < 0.05$ ),而且均有随施氮量增加而增加的趋势。油菜季耕层 20~40 cm 土壤中 N0, N75 和 N150 处理铵态氮质量分数分别高于耕层 0~20 cm,但在耕层 20~40 cm 各处理之间差异无统计学意义。这可能是因为施肥和矿化等导致耕层 20~40 cm 土壤铵态氮质量分数增加且容易被土壤胶体吸附所致。油菜季耕层 40~60 cm 各施氮处理土壤铵态氮质量分数也保持较高的水平但处理间差异无统计学意义。油菜季耕层 0~40 cm 硝态氮质量分数随土层深度增加而明显减少,同层硝态氮质量分数有随施氮量增加而增加的趋势。油菜季耕层 40~60 cm 各处理土壤硝态氮质量分数略低于耕层 20~40 cm(N300 除外),且 N225 处理和 N300 处理土壤硝态氮质量分数显著高于其他处理( $p < 0.05$ )。

水稻收获后耕层 0~60 cm 土壤剖面中矿质氮质量分数分布见图 2。与 N0 处理相比,施氮显著提高了水稻季耕层 0~60 cm 土壤铵态氮和硝态氮质量分数( $p < 0.05$ ),且无机氮质量分数随土层深度增加而减少,耕层 0~20 cm 土壤无机氮质量分数随施氮量增加而增加。水稻季耕层 20~40 cm 的土壤 N150, N225, N300 处理铵态氮质量分数显著高于 N0 和 N75 处理,40~60 cm 的土壤 N300 处理铵态氮质量分数最高且显著高于其他处理( $p < 0.05$ )。

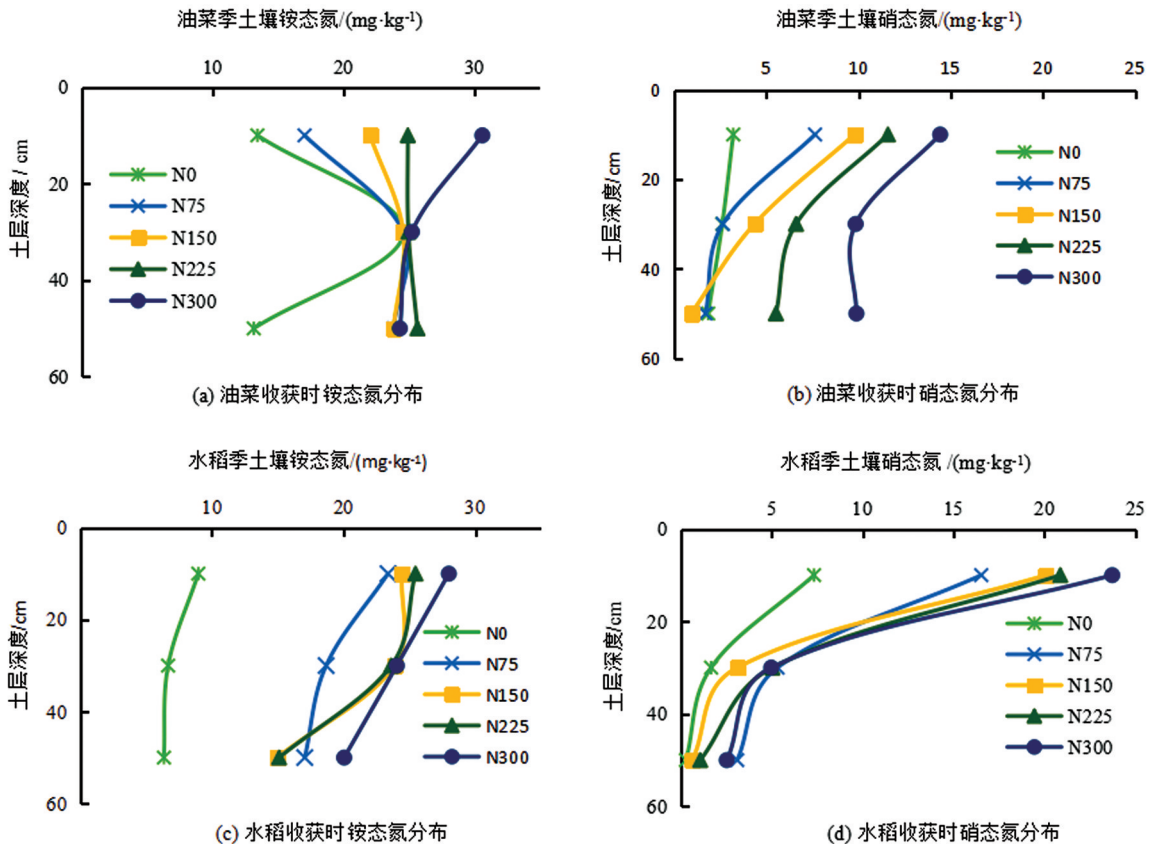


图 2 油菜和水稻收获时 0~60 cm 土壤剖面中铵态氮和硝态氮分布

## 2.3 油菜水稻轮作物产量与施氮量的关系

目前常采用一元二次方程或线性加平台方程拟合作物产量和施氮量的关系<sup>[2, 13]</sup>。图 3 中,在中低

施氮量时, 产量与施氮量表现为线性正相关(油菜:  $y = 6.533x + 1157.8$ ,  $0 \leq x \leq 183.38$ ,  $R^2 = 0.913$ ; 水稻:  $y = 16.982x + 9401.67$ ,  $0 \leq x \leq 193.82$ ,  $R^2 = 0.913$ ). 在施氮量中等或较高时产量基本保持恒定(油菜:  $y = 2355.82$ ,  $x > 183.38$ ; 水稻:  $y = 12692.86$ ,  $x > 193.82$ ). 油菜最高产量为  $2355.82 \text{ kg/hm}^2$ , 对应施氮量为  $183.38 \text{ kg/hm}^2$ , 水稻最高产量为  $12692.86 \text{ kg/hm}^2$ , 对应施氮量为  $193.82 \text{ kg/hm}^2$ . 超过该值, 油菜和水稻的籽粒产量增加不再显著, 氮肥利用率则下降, 肥料对产量的边际收益降低. 总之, 该范围对应推荐施氮量既保证了油菜和水稻获得高产又降低了农民的成本投入, 减少了氮素的流失.

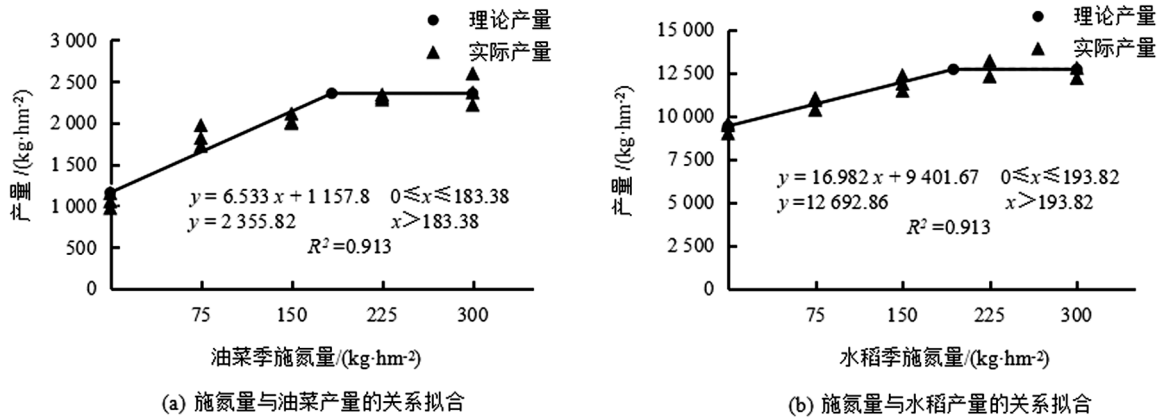


图 3 施氮量与油菜和水稻产量的关系拟合

## 2.4 油菜水稻轮作作物经济效益与施氮量的关系

水稻和油菜经济效益是指水稻和油菜收获销售后, 除去粮食生产总成本所获得的收益. 根据当地市场销售的肥料价格折纯后  $N$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $B$  价格分别为 5.16, 5.28, 8.00, 7.58 元/kg, 油菜、水稻价格分别按照近 3 年均价 6.00 元/kg, 2.52 元/kg 计算. 由图 4 可知, 油菜和水稻的经济效益随着施氮量增加呈现出先增后减的趋势, 油菜的最佳经济施氮量为  $249.30 \text{ kg/hm}^2$ , 此时农民经济效益为  $11907.60 \text{ 元/hm}^2$ ; 水稻的最佳经济施氮量为  $246.61 \text{ kg/hm}^2$ , 此时农民经济效益为  $29706.62 \text{ 元/hm}^2$ .

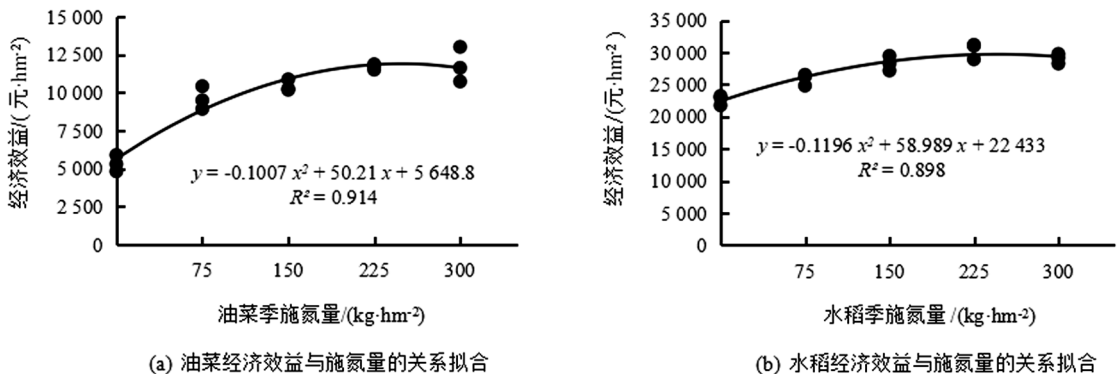


图 4 油菜和水稻经济效益与施氮量间关系拟合

## 2.5 油菜水稻轮作作物吸氮量、土壤氮素表观损失量和施氮量的关系

施氮量和作物吸氮量、氮素表观损失量关系如图 5. 油菜季施氮量和作物吸氮量呈现线性加平台的关系. 当施氮量  $x \leq 218.57 \text{ kg/hm}^2$  时, 油菜吸氮量随施氮量增加而提高, 其线性回归方程为  $y = 0.297x + 47.564$ ,  $R^2 = 0.895$ ; 当施氮量  $x > 218.57 \text{ kg/hm}^2$  时, 油菜吸氮量随着施氮量增加而保持恒定, 其回归方程为  $y = 112.48$ . 油菜季施氮量和氮素表观损失量呈线性关系, 其回归方程为  $y = 0.4022x - 33.427$ ,  $R^2 = 0.860$ . 水稻季吸氮量与施氮量呈现线性加平台的关系. 当施氮量  $x \leq 245.32 \text{ kg/hm}^2$  时, 水稻施氮量和吸氮量呈线性相关关系, 其线性回归方程为  $y = 0.59x + 119.032$ ,  $R^2 = 0.879$ ; 当施氮量  $x > 245.32 \text{ kg/hm}^2$  时, 水稻吸氮量随着施氮量增加而保持恒定, 其回归方程

为  $y=263.77$ 。水稻季施氮量和氮素表观损失量呈线性关系,其回归方程为  $y=0.7079x-110.06$ ,  $R^2=0.925$ 。当油菜季和水稻季化学氮肥投入量分别为  $83.11 \text{ kg/hm}^2$  和  $155.47 \text{ kg/hm}^2$  时,氮素表观损失量为 0;当油菜和水稻化学氮肥投入量小于该值时,氮素表观损失量为负值;当油菜季化学氮肥投入量为  $83.11 \sim 218.57 \text{ kg/hm}^2$ ,水稻季化学氮肥投入量为  $155.47 \sim 245.32 \text{ kg/hm}^2$  时,氮素处于最大作物吸氮量和最小氮素表观损失量之间,既满足了作物的生长,又使氮素损失较少,可作为平衡作物吸氮量和环境友好的合理投入阈值。

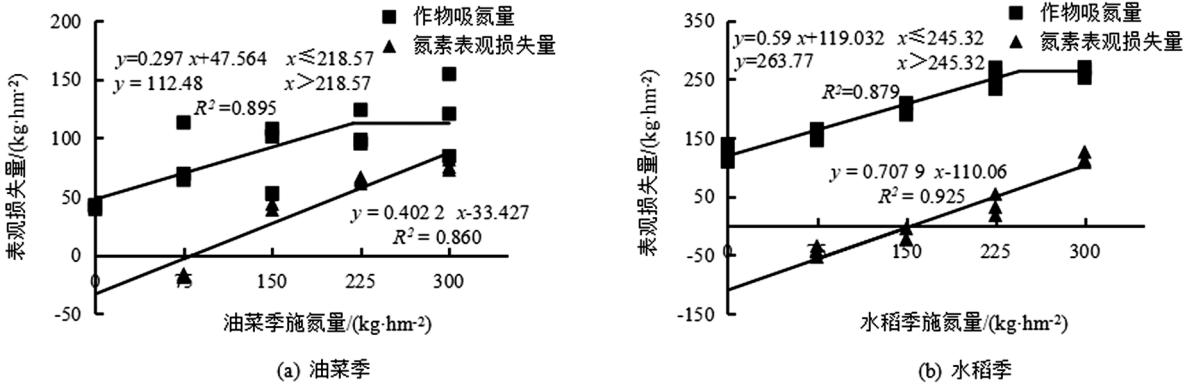


图 5 表观损失量与施氮量之间关系拟合

### 3 讨论

作物高产与农户增收是合理施肥的重要目的,也是科学施肥技术得以应用的重要保障<sup>[29]</sup>。我们在选取不同的肥效效应函数拟合经济阈值和产量阈值时,首先应该考虑到函数的拟合程度和阈值对应氮肥投入量的节省情况<sup>[30]</sup>。本试验采用线性加平台函数对作物产量和施氮量进行拟合,以作物最高产量的 95% 和最高产量为置信区间,有效降低了施氮量,并保证作物高产<sup>[31-32]</sup>。结果表明,重庆地区油菜水稻轮作系统中油菜的产量阈值为  $2\,238.03 \sim 2\,355.82 \text{ kg/hm}^2$ ,对应化学氮肥投入量为  $165.35 \sim 183.38 \text{ kg/hm}^2$ ;水稻的产量阈值为  $12\,058.50 \sim 12\,692.86 \text{ kg/hm}^2$ ,对应化学氮肥投入量为  $156.45 \sim 193.82 \text{ kg/hm}^2$ 。本文利用一元二次函数对经济效益和施氮量进行拟合,在不显著降低农户收益的情况下,分别得出油菜季经济阈值为  $11\,312.18 \sim 11\,907.60 \text{ 元/hm}^2$ ,对应施氮量为  $172.41 \sim 249.30 \text{ kg/hm}^2$ ;水稻季经济阈值为  $28\,221.34 \sim 29\,706.62 \text{ 元/hm}^2$ ,对应施氮量为  $135.17 \sim 246.61 \text{ kg/hm}^2$ 。由于农民对经济效益最大化的追求往往会导致氮肥的浪费,进而导致环境污染,所以最佳经济施氮量通常可作为氮肥阈值的上限,这与宫亮等<sup>[21]</sup>的研究方法相同。

氮素是农业生产中作物高产的重要保障,但是一味追求高产而过量施肥会降低氮肥利用率,并产生水体富营养化、氨挥发和硝酸盐污染的环境问题<sup>[33-36]</sup>。根据朱兆良<sup>[37]</sup>对中国大量施肥田间试验的统计显示,在目前生产水平下,施氮量为  $150 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$  时,大田作物已经可以达到较高的产量。但为满足我国人口增长和生活改善的国情,农民们增加了化学氮肥投入,但过量氮肥投入必然导致氮肥利用率下降和氮素流失所引发的一系列问题。朱兆良<sup>[38]</sup>认为,我国农田中当季氮肥利用率仅为  $30\% \sim 35\%$ ,高产区更是低于  $30\%$ 。张福锁等<sup>[39]</sup>、巨晓棠等<sup>[40]</sup>认为,我国主要粮食作物的氮肥利用率仅为  $27.5\%$ ,比发达国家低  $10\% \sim 20\%$ 。有研究认为,氮肥施用 30 年后仍会在土壤中残留  $12\% \sim 15\%$  的氮素,土壤残留氮的后效更是在 50 年之上<sup>[41]</sup>。目前使用差减法得到的氮肥利用率并没有考虑肥料的后效,我们应该从土壤氮库的供氮能力出发,寻找氮素残留和消耗氮库之间的平衡,从而达到作物高产和环境友好的目的。有研究表明,在农业生产中约有  $5\% \sim 10\%$  的氮素以气态形式挥发,约  $20\% \sim 25\%$  的氮素以径流和渗漏形式损失,剩余大部分以无机氮的形态残留于土壤剖面中<sup>[42]</sup>。土壤无机氮质量分数代表了土壤供氮的状况<sup>[43]</sup>,因此,本文根据氮素平衡模型计算氮素的表观损失量,最后综合考虑土壤氮素表观损失量和植株吸氮量,得出重庆地区稻油轮作中油菜季氮肥环境阈值为  $83.11 \sim 218.57 \text{ kg/hm}^2$ ,土壤氮素表观损失量为  $0 \sim 54.48 \text{ kg/hm}^2$ ;水稻季氮肥环境阈值为  $155.47 \sim 245.32 \text{ kg/hm}^2$ ,土壤氮素表观损失量



为 $0\sim 63.60\text{ kg/hm}^2$ 。这维持了土壤供氮和植物需氮趋于平衡,土壤供氮能力和产量得以维持,农业生产得以可持续发展。本文确定的化学氮肥投入阈值可作为区域氮肥施用的参考值,后期可通过进一步试验加以验证和修正。

## 4 结论

施氮量在 $0\sim 225\text{ kg/hm}^2$ 范围内能显著提高重庆地区水稻油菜轮作的作物产量和氮素积累量。油菜季氮肥偏生产力( $\text{PFP}_N$ )、氮肥农学利用率( $\text{AE}_N$ )、氮肥表观利用率( $\text{RE}_N$ )及水稻季  $\text{PFP}_N$  和  $\text{AE}_N$  均随氮肥增加呈现下降趋势,水稻季  $\text{RE}_N$  则呈先增加后下降的趋势。

在重庆地区稻油轮作系统中,氮肥用量与油菜和水稻产量(油菜季  $R^2=0.913$ ,水稻季  $R^2=0.913$ )以及作物吸氮量(油菜季  $R^2=0.895$ ,水稻季  $R^2=0.879$ )均呈线性加平台关系,与油菜和水稻经济效益(油菜季  $R^2=0.914$ ,水稻季  $R^2=0.898$ )均呈二次曲线关系,与土壤氮素表观损失量(油菜季  $R^2=0.860$ ,水稻季  $R^2=0.925$ )均呈线性关系。

综合考虑稻油轮作系统中目标产量、经济效益以及环境因素,重庆地区稻油轮作区油菜季化学氮肥投入阈值应为 $172.41\sim 183.38\text{ kg/hm}^2$ ,目标产量为 $2\ 284.15\sim 2\ 355.82\text{ kg/hm}^2$ ,土壤氮素表观损失量为 $35.92\sim 40.33\text{ kg/hm}^2$ ,农民收益为 $11\ 312.18\sim 11\ 469.95\text{ 元/hm}^2$ ;水稻季化学氮肥投入阈值为 $156.45\sim 193.82\text{ kg/hm}^2$ ,目标产量为 $12\ 058.50\sim 12\ 692.86\text{ kg/hm}^2$ ,土壤氮素表观损失量为 $0.69\sim 27.15\text{ kg/hm}^2$ ,农民收益为 $28\ 734.43\sim 29\ 373.33\text{ 元/hm}^2$ 。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [3] 林葆,林继雄,李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化 [J]. 植物营养与肥科学报, 1994(1): 6-18.
- [4] 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.
- [5] 陈语,翟泰雅,王芳芳,等. 氮肥对黄壤温室气体排放和玉米产量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(8): 37-47.
- [6] 马国霞,於方,曹东,等. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 489-497.
- [7] 金书秦,沈贵银. 中国农业面源污染的困境摆脱与绿色转型 [J]. 改革, 2013(5): 79-87.
- [8] 余选礼,董保柱,赵家满,等. 水稻生产氮肥需要量与利用率试验初报 [J]. 现代农业科学, 2009, 16(5): 100-101.
- [9] 金立军,赵丽琴. 水稻氮肥管理技术研究 [J]. 现代农业科学, 2009, 16(5): 112-113, 131.
- [10] 冶军,候振安,马丽,等. 氮磷肥料与水稻产量性状关系的研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(10): 4446-4447, 4587.
- [11] CHEN X J, STROKAL M, KROEZE C, et al. Modeling the Contribution of Crops to Nitrogen Pollution in the Yangtze River [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(19): 11929-11939.
- [12] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [13] 王卫,谢小立,谢永宏,等. 不同施肥制度对双季稻氮吸收、净光合速率及产量的影响 [J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(3): 752-757.
- [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.
- [15] 方林发,张宇亭,谢军,等. 氮肥用量和运筹对冷浸田水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 53-60.
- [16] RATHKE G W, CHRISTEN O, DIEPENBROCK W. Effects of Nitrogen Source and Rate on Productivity and Quality of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) Grown in Different Crop Rotations [J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3): 103-113.
- [17] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745-752.
- [18] 聂泽民,唐海明,聂丽群,等. 移栽密度与施氮量对油菜生长发育和产量的影响 [J]. 湖南农业科学, 2012(3): 21-23.

- [19] 李银水, 鲁剑巍, 廖星, 等. 氮肥用量对油菜产量及氮素利用效率的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(4): 379-383.
- [20] 宋海星, 官春云, 刘强, 等. 施氮对“双低”油菜吸氮特性及氮素生理效率的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 106-109.
- [21] 官亮, 曲航, 刘艳, 等. 辽河三角洲地区高产水稻氮肥投入阈值及利用率 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 23-28.
- [22] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区水稻氮肥投入阈值研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 462-470.
- [23] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 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.
- [24] ZHANG Z S, CAO C G, CAI M L, et al. Crop Yield, P Uptake and Soil Organic Phosphorus Fractions in Response to Short-term Tillage and Fertilization under a Rape-rice Rotation in Central China [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(4): 871-882.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响 [J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.
- [27] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 270-277.
- [28] 何杰, 李冰, 王昌全, 等. 不同施氮处理对水稻油菜轮作土壤氮素供应与作物产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2957-2968.
- [29] 鲁剑巍, 陈防, 余常兵, 等. 油菜施钾效果及土壤速效钾临界值初步判断 [J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4): 107-112.
- [30] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择——经济和环境效益分析 [J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 346-354.
- [31] CERRATO M E, BLACKMER A M. Comparison of Models for Describing; Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer [J]. Agronomy Journal, 1990, 82(1): 138-143.
- [32] 崔振岭. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理——从田块到区域尺度 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [33] LEININGER S, URICH T, SCHLOTTER M, et al. Archaea Predominate among Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Soils [J]. Nature, 2006, 442(7104): 806-809.
- [34] 同延安, OVE EMTERYD, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1239-1244.
- [35] RAYMOND J E, FOX T R, STRAHM B D, et al. Ammonia Volatilization Following Nitrogen Fertilization with Enhanced Efficiency Fertilizers and Urea in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Plantations of the Southern United States [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 376(6): 247-255.
- [36] ZHANG J J, HE P, DING W C, et al. Identifying the Critical Nitrogen Fertilizer Rate for Optimum Yield and Minimum Nitrate Leaching in a Typical Field Radish Cropping System in China [J]. Environmental Pollution, 2021, 268: 115004.
- [37] 朱兆良. 我国土壤氮素研究中的某些进展 [C] //中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集(面向农业与环境的土壤科学综述篇). 沈阳, 2004: 15-20.
- [38] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境 [C] //中国土壤学会, 中国植物营养与肥料学会, 中国作物学会, 等. 《氮素循环与农业和环境》专辑——氮素循环与农业和环境学术讨论会论文集, 厦门, 2001: 9.
- [39] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. 植物学通报, 2007, 42(6): 687-694.
- [40] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考 [J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
- [41] SEBILO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term Fate of Nitrate Fertilizer in Agricultural Soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [42] 郭建华, 赵春江, 孟志军, 等. 北方旱作条件下玉米施用氮肥对氮吸收和淋溶的影响 [J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 562-565.
- [43] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741-1749.