

DOI: 10.11766/trxb201805170170

# 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究\*

陆晓松<sup>1, 2</sup> 于东升<sup>1, 2†</sup> 徐志超<sup>1, 2</sup> 黄晶晶<sup>1, 2</sup> 周聪聪<sup>1, 2</sup> 孙波<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 耕地土壤肥力及施氮量对于小麦产量和氮肥利用率均具有重要影响, 但它们综合影响的定量关系及相对贡献率并不清楚。在太湖流域常熟市研究区, 通过设置不同土壤肥力与施氮量的小麦田间试验, 研究施氮量、土壤肥力综合质量指数对小麦产量和氮肥利用率的影响, 并利用多元回归方法拟合他们之间的定量关系方程, 分析揭示施氮量与土壤肥力综合质量指数对小麦产量和氮肥利用率综合影响的相对贡献率。结果表明, 提升施氮量和土壤肥力综合质量指数, 有利于增加小麦产量, 但不利于小麦氮肥利用率提升; 土壤肥力综合质量指数对小麦产量和氮肥利用率的影响大于施氮量, 两者对产量和氮肥利用率的相对贡献率比值分别为 1.09 : 1 和 1.32 : 1。表明通过提升土壤综合肥力、削减氮肥施用量, 达到粮食与生态双重安全目标, 培育和提升耕地土壤质量显得更为基本和重要。

**关键词** 氮肥利用率; 土壤肥力综合质量指数; 施氮量; 小麦; 太湖地区

**中图分类号** S158 **文献标识码** A

太湖稻麦轮作农区是我国农业高产地区, 对我国的粮食安全有着重要作用<sup>[1]</sup>。据报道, 为实现粮食高产目标, 太湖地区农田长期过量施肥, 导致土壤氮素大量残留, 氮肥利用率较低<sup>[2-3]</sup>。氮肥利用率低不仅导致氮肥的增产效益下降, 同时对生态环境造成危害<sup>[4-5]</sup>。因此, 如何减少氮肥损失, 提高氮肥利用率, 是该地区农业生产面临的重要问题<sup>[6]</sup>。

减少氮肥施用量是提高氮肥利用率最为简单直接的手段<sup>[7-8]</sup>。Brentrup和Palliere<sup>[9]</sup>在洛桑实验站通过长期试验研究发现, 当施氮量为 244 kg·hm<sup>-2</sup>时, 作物的氮肥利用率为 57%, 当氮肥施

用量减少至 48 ~ 96 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮肥利用率提高至 63% ~ 69%, 但土壤肥力氮和产量会很低, 无法保证产量稳定和土壤氮素平衡。显然, 过量减少施氮量不利于耕地土壤氮素的补充以及粮食增产, 保证农作物需求和氮肥供应之间的最大平衡是提高氮肥利用效率的必要条件<sup>[10]</sup>。

土壤肥力对氮肥利用率具有显著影响作用。李锐<sup>[11]</sup>、廖育林等<sup>[12]</sup>研究认为, 高肥力农田具有较低肥力农田更高的氮积累量和氮肥偏生产力, 但其氮肥利用率均小于低肥力农田。丁哲利等<sup>[13]</sup>研究认为, 在相同的优化施肥模式或施氮量下, 土壤肥力较高的农田作物氮肥利用率高于低肥力农田。

\* 国家重点研发计划专项(2016YFD0200301)、国家自然科学基金项目(41571206)和科技基础性工作专项(2015FY110700-S2)资助 Supported by the Special Project of the National Key Research and Development Program (No. 2016YFD0200301), the National Natural Science Foundation of China (No. 41571206) and Special Project of the National Science and Technology Basic Work (No. 2015FY110700-S2)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 陆晓松(1988—), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 主要从事土壤质量评价与修复研究。E-mail: xslu@issas.ac.cn

收稿日期: 2018-05-17; 收到修改稿日期: 2018-09-17; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-10-18

土壤肥力对氮肥利用率影响结论还存在分歧,原因在于研究分析的土壤肥力因素较为单一,多集中在土壤有机质、氮、磷、钾等单因素营养成分与氮肥利用率的关系研究<sup>[14-16]</sup>,需研究土壤综合肥力对氮素利用率的影响<sup>[17]</sup>。

李雅剑<sup>[18]</sup>研究表明,土壤综合基础肥力提升有利于玉米产量和氮肥利用率的同步提高;张军<sup>[19]</sup>研究显示,在相同土壤综合肥力下,施氮量增加有利于小麦增产;随着土壤综合肥力水平提升,适宜施氮量减小,最优氮肥利用率提高。目前已开展的这些土壤综合肥力与施氮量对作物氮肥利用率的影响研究,对这两种因素影响分析均是相互独立进行的,他们对氮肥利用率的综合影响定量关系、相对贡献率大小等问题,目前并不清楚,迫切需要研究和回答。

因此,本文在太湖流域典型区,通过不同综合土壤肥力质量田块的小麦氮肥肥效试验,分析施氮量与土壤肥力综合质量指数对小麦产量、氮肥利用率的共同影响和作用关系,揭示他们对产量和氮肥利用率的相对贡献率,为多因素协同提升氮肥利用

效率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

常熟市位于经济发达、交通便利的苏南太湖地区,地理坐标为 $120^{\circ} 33' E \sim 121^{\circ} 03' E$ ,  $31^{\circ} 33' N \sim 31^{\circ} 50' N$ ,面积为 $1\ 276\ km^2$ (图1),属长江冲积平原。常熟市2016年平均气温为 $17.4\ ^{\circ}C$ ,降雨量为 $1\ 824\ mm$ ,处于中亚热带季风气候区。成土母质主要为长江冲积物、古老冲积的黄土状物质、湖泊沉积物以及石英砂岩的残积、坡积物。土壤类型主要包括水稻土、潮土和黄棕壤等。农业播种面积 $68.4 \times 10^4\ hm^2$ ,其中粮食作物面积占70.04%、蔬菜瓜果类面积占20.58%、油料作物面积占6.14%。全年粮食作物单产为 $6.73 \times 10^3\ kg \cdot hm^{-2}$ ,小麦和水稻的单产分别为 $4.25 \times 10^6\ kg \cdot hm^{-2}$ 和 $9.32 \times 10^3\ kg \cdot hm^{-2}$ ;全年农作物化肥总施用量约为 $24.41 \times 10^3\ kg$ ,平均农作物化肥施用量 $357\ kg \cdot hm^{-2}$ <sup>[20]</sup>。

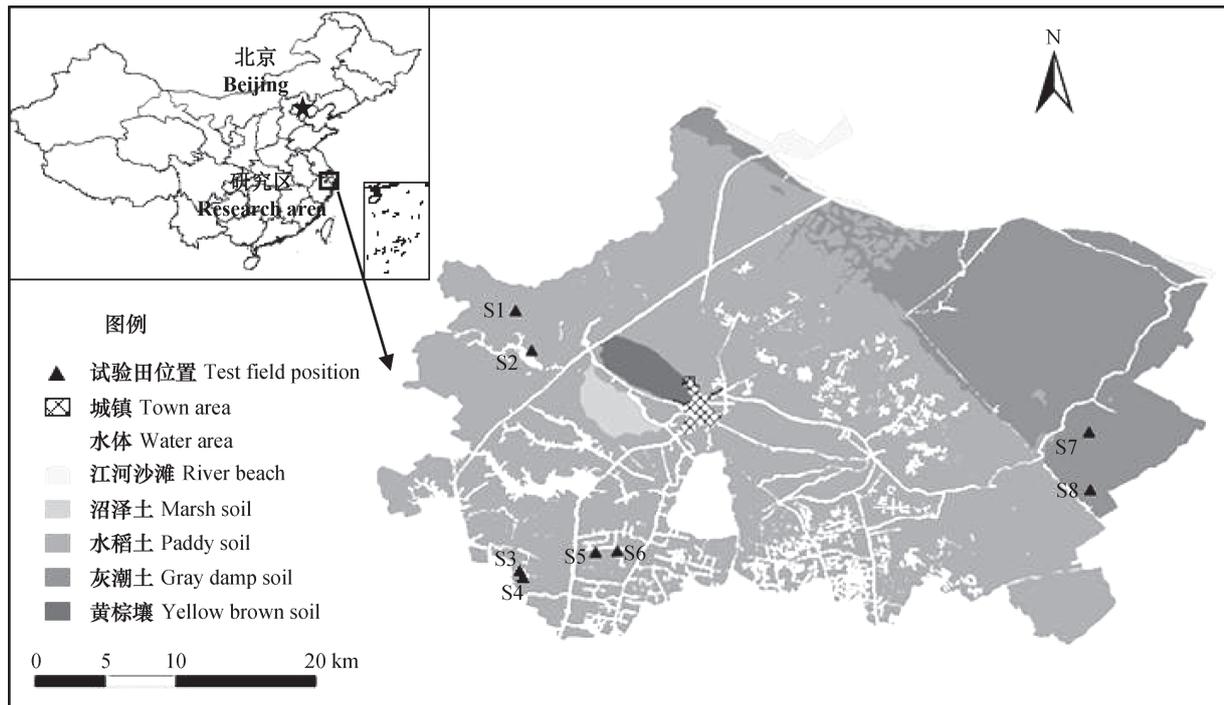


图1 研究区及试验田地理位置

Fig. 1 Geographical location of the research area and the experimental fields

### 1.2 田间试验设计

依据常熟市耕地主要土壤类型及肥力质量的走

访调研,2016年11月在常熟市6个自然村选择8块小麦-水稻的轮作试验田S1~S8(图1),分别播种

扬麦-16号小麦。其中，S1、S2、S3试验田土壤类型为潜育型水稻土，S4、S5、S6田块为潜育型水稻土，S7、S8田块为灰潮土。

在每个试验田设置 4 个不同施氮量水平处理：N0、N1、N2、N3，分别代表施氮量 0、100、200、260 kg·hm<sup>-2</sup>，按4:2:4分别作为基肥、拔节肥、穗肥追肥。施用的氮肥为尿素（含氮率46.4%），磷肥（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）和钾肥（K<sub>2</sub>O）均作为基肥按60 kg·hm<sup>-2</sup>一次性施用，N0组不施用磷肥和钾肥。每个施氮量水平处理各设置3个重复试验小区，每个试验小区面积为4 m × 5 m。

2017年6月初小麦成熟后收割、测定生物量，同时采集地上部分小麦植株生物样品。将植株分秸秆和籽粒两部分，在烘箱75℃，烘干至恒重，然后粉碎，利用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮、凯氏定氮法测定秸秆和籽粒全氮含量。

### 1.3 试验田土壤肥力综合质量评价

试验田块土壤肥力评价采用隶属度函数综合质量指数法，一般步骤包括：获取评价指标、确定指标权重、计算土壤肥力综合质量指数和土壤肥力等级划分<sup>[21]</sup>。2016年10月，基于土壤类型、耕地类型以及样点空间分布均匀性考虑，在研究区共采集195个耕地表层土壤样品，用于获取指标权重，建立该县域土壤肥力综合质量评价体系<sup>[22]</sup>。为使试验田块土壤肥力综合质量指数与该县域土壤肥力综合质量指数具有等同性和可比性，试验田块土壤肥力综合质量评价的指标体系、指标权重和隶属度等，均采用与该县域相同的评价方法和指标体系<sup>[22]</sup>。

土壤肥力综合质量指数（IFI）计算公式如下：

$$IFI(i) = \sum_j^N w_{ij} F_{ij} \quad (1)$$

式中，IFI(*i*)表示土壤肥力综合质量指数。*i*为评价单元。*j*为评价指标，在本研究中取值范围为1~8，最大值*N*等于8。权重*w<sub>ij</sub>*为第*i*个评价单元、第*j*个评价指标的权重。*F<sub>ij</sub>*为第*i*个评价单元、第*j*个评价指标的隶属度。

试验开始前，在每个试验小区按梅花法分别采集0~20 cm表层土壤混合样，共采集96个土壤样品。采用《土壤农化分析》<sup>[23]</sup>及《土壤调

查实验室分析方法》<sup>[24]</sup>对土壤样品进行理化分析，分析项目有全氮（TN）、全钾（TK）、有效磷（AP）、速效钾（AK）、有机质（SOM）、pH、砂粒（Sand）、黏粒（Clay）含量等8个指标，均作为土壤肥力综合质量评价指标。8个试验田的土壤肥力综合质量评价指标均采用所在试验小区平均值参与评价。

### 1.4 氮肥利用效率计算方法

氮肥利用率(NRE)=(施氮区小麦地上部分吸氮量-不施氮区小麦地上部吸氮量)/施氮量×100%。

### 1.5 数据统计与分析方法

利用R-studio软件对小麦产量、氮肥利用率与氮肥施用量和土壤肥力综合质量指数进行多元回归拟合分析。由于土壤肥力综合质量指数为无量纲数值(0~1)，为便于回归拟合方程参数的比较，氮肥施用量采用无量纲的施氮比(*nr*)取代，即实际施氮量与最大施氮量(260 kg·hm<sup>-2</sup>)的比值(0~1)。在拟合过程中，通过对不同函数和多项式的拟合优度(*R*<sup>2</sup>, *P*)比较，选择确定最佳多元回归拟合方程。其他数据分析和制图采用Excel 2010完成。

## 2 结 果

### 2.1 试验区土壤理化性质及综合肥力质量指数

表1为8个试验田土壤理化性质和土壤肥力综合质量指数。根据各土壤理化性质指标隶属度函数，SOM、TN、TK、AK、AP为戎上型指标，即数值越大，肥力指数越高<sup>[22]</sup>。其中，土壤SOM含量最高的田块S6较含量最低的田块S7高出120%；土壤TN含量最高的田块S8较最低的田块S7高出96%；各试验田TK含量差别较小，含量最高的田块S8较含量最低的田块S1高出22%；AK含量较高的田块S2较含量最低的田块S3高出86%；各试验田AP含量差别较大，其中最高的田块S5为含量最低田块S3的21倍。

土壤pH、Sand、Clay均为峰型函数，即数值距离特定的指标适宜值越近，肥力指数越高<sup>[23]</sup>。土壤pH适宜值为7，其中S8距离适宜值最近，高于适宜值2%，S1距离适宜值最远，低于适宜值25%。Sand适宜值为35%，S1距离适宜值最近，

低于适宜值3%，S3距离适宜值最远，高于适宜值20%；Clay的适宜值为25%，S5和S7分别距离适宜

值最近和最远，低于适宜值15%和48%。S5的土壤肥力指数最大，较最小的田块S7高出79%。

表1 试验田土壤理化性质及肥力综合指数

Table 1 Soil physical and chemical properties and integrated quality index of soil fertility in experimental fields									
试验田编号 Experimental field number	pH	有机质 SOM $/(g \cdot kg^{-1})$	全氮 TN $/(g \cdot kg^{-1})$	全钾 TK $/(g \cdot kg^{-1})$	砂粒 Sand /%	黏粒 Clay /%	速效钾 AK $/(mg \cdot kg^{-1})$	有效磷 AP $/(mg \cdot kg^{-1})$	肥力综合 质量指数 IFI
S1	5.2	34.5	2.2	17.7	33.9	19.9	111.4	2.2	0.673
S2	5.9	34.9	2.1	19.3	32.8	20.7	133.1	3.1	0.708
S3	6.1	34.6	2.1	19.8	28.6	21.2	71.6	2.1	0.586
S4	6.7	28.0	1.7	20.2	28.6	20.9	75.2	4.7	0.513
S5	7.4	35.8	2.2	21.3	29.6	21.3	121.8	44.7	0.768
S6	6.3	43.1	2.5	21.1	29.5	21.2	113.6	4.4	0.706
S7	7.7	19.6	1.4	21.5	42.0	12.9	85.9	15.6	0.430
S8	7.1	39.6	2.7	21.5	39.4	14.5	107.7	12.9	0.711

## 2.2 相同肥力不同施氮量的小麦产量和氮肥利用率

由不同施氮量时各试验田小麦产量（图2a）可以看出，施氮量在N0~N3时，S5试验田的小麦产量均最大；施氮量在N1时，S4试验田产量最小，其余N0、N2、N3施氮量下，S3试验田小麦产量最小。由不同施氮量时小麦NRE（图2b）可以看出，在施氮量为N1时，S3试验田小麦NRE最大，S8试验田小麦NRE最小；在施氮量为N2和N3时，S7试验田小麦NRE最大，S6试验田小麦NRE最小。

小麦产量和氮肥利用率随氮肥增加的变化结果

显示，施氮量在N0~N2范围内，各试验田小麦产量随着施氮量的增加而增大，施氮量从N2增加至N3时，小麦产量不再增大，S2、S6、S7试验田甚至出现明显的产量减小；而小麦氮肥利用率则随着施氮量的增加不断减小。已有研究表明，随着施氮量的增加，不同肥力等级的小麦均表现出NRE下降的趋势，这与本研究的结果一致<sup>[24-27]</sup>。由此可见，施氮量200  $kg \cdot hm^{-2}$ 已达到或接近小麦适宜施氮量，氮肥对小麦增产的效益显著下降，此时再增加氮肥施用量无益于小麦增产，并且会导致氮肥利用率进一步降低。

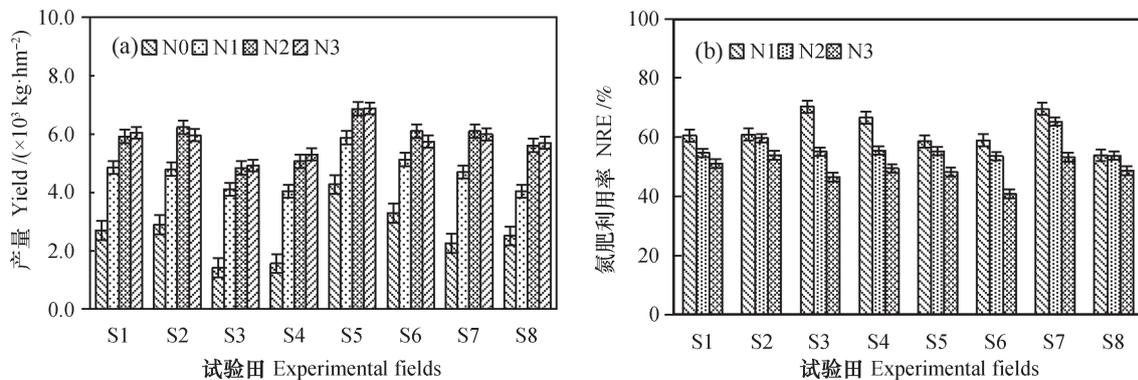


图2 不同施氮量下小麦产量和氮肥利用率

Fig. 2 Wheat yield and nitrogen recovery rate relative to nitrogen application rate

## 2.3 相同施氮量不同肥力的小麦产量和氮肥利用率

小麦产量随土壤肥力指数变化趋势特征（图3a）表明，在相同施氮量下，随着土壤

肥力指数的升高，小麦产量呈上升趋势，而小麦NRE随土壤肥力指数升高呈现减小趋势（图3b）。

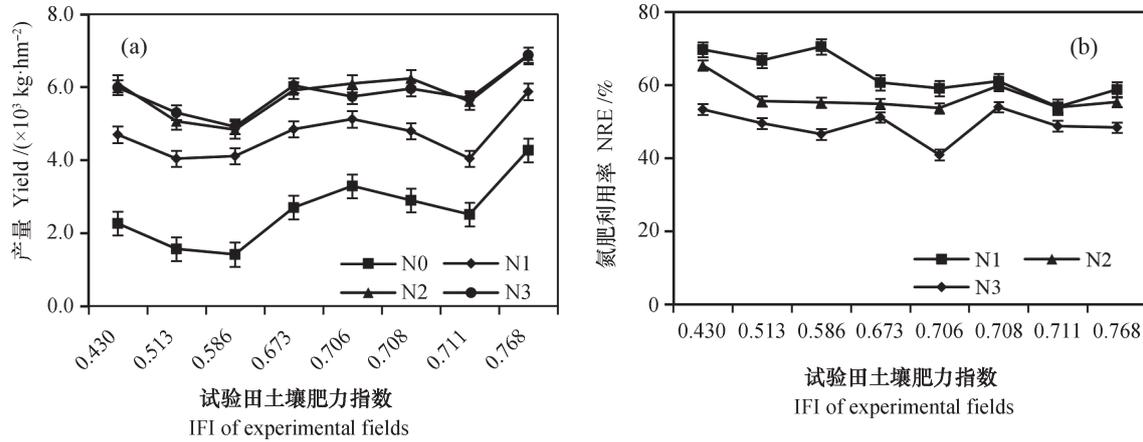


图3 不同土壤肥力水平下小麦产量及氮肥利用率

Fig.3 Wheat yield and nitrogen recovery rate relative to soil fertility

对小麦产量和NRE与土壤肥力综合质量指数IFI的相关性分析结果显示，在不施氮（N0）情况下，小麦产量与IFI呈显著相关（ $P < 0.05$ ）；当施氮量增加至N1~N3时，小麦产量与IFI相关性不显著（ $P > 0.05$ ），随着施氮量增加，其相关性不断减弱（表2）。

小麦NRE与IFI的相关性也表现出类似特征。当施氮量为N1和N2时，小麦NRE与IFI呈显著相

关（ $P < 0.05$ ）；当施氮量为N3时，小麦NRE与IFI的相关性不显著（ $P > 0.05$ ）（表2）。表明在施用氮肥的条件下，小麦产量和NRE与基础肥力关系受到严重干扰，土壤肥力不再是单一控制产量和NRE高低的主控因子。其主要原因是，随着施氮量的增加，小麦从氮肥中获取氮素增产的量不断增大，而对基础肥力中的氮素利用率不断减小<sup>[16]</sup>。

表2 小麦产量和氮肥利用率与土壤肥力综合质量指数的相关性

Table 2 Correlation analysis of wheat yield and nitrogen recovery rate with integrated quality index of soil fertility

施氮量 Fertilizer N rate	小麦产量Yield		氮肥利用率NRE	
	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i>	相关系数 Correlation coefficient	<i>P</i>
N0	0.830	0.011	—	—
N1	0.459	0.253	-0.720	0.044
N2	0.495	0.212	-0.557	0.152
N3	0.234	0.578	-0.459	0.253

#### 2.4 土壤肥力综合质量指数和施氮量与小麦产量及氮肥利用率的综合定量关系

R-studio软件多元回归拟合结果表明，小麦产量（Yield）和氮肥利用率（NRE）的最佳拟合函数分别为一次和二次多项式（式（2）和式（3））。其中，*nr*和*ifi*均为无量纲值，取值范围为0~1。

$$Yield = 716 + 3257 \times nr + 3561 \times ifi \quad (R^2 = 0.780, P = 1.137 \times 10^{-10}) \quad (2)$$

$$NRE = 73.92 - 15.83 \times nr^2 - 20.88 \times ifi^2 \quad (R^2 =$$

$$0.710, P = 8.802 \times 10^{-7}) \quad (3)$$

土壤肥力综合质量指数IFI和施氮量NA与小麦产量综合定量关系表明（式（2）），IFI和NA共同提升有利于小麦产量增加，但不利于小麦氮肥利用率NRE的提高（式（3）），两者对小麦产量和NRE的综合作用呈现出相反的特征。如何解决这对矛盾，迫切需要开展深入研究。

分析拟合方程自变量*nr*和*ifi*的回归系数发现，式（2）和式（3）的*ifi*系数绝对值均大于*nr*系数绝对值，表明在增减相同单位的幅度下，土壤肥力综

合质量指数对小麦产量(图4a)和NRE(图4b)变化影响力大于施氮量,回归系数比值即相对贡献率比值分别为1.09:1和1.32:1。因此,通过提升土

壤综合肥力、削减氮肥施用量,实现粮食与生态安全双重目标,培育和提升耕地土壤质量显得更为基本和重要。

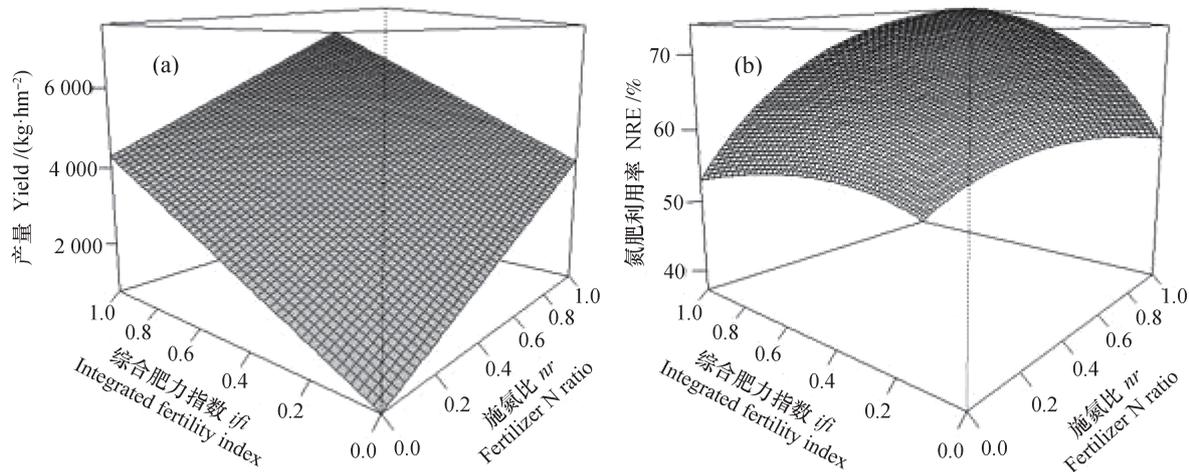


图4 小麦产量和氮肥利用率与土壤肥力综合质量指数及施氮量关系的拟合趋势面

Fig.4 Trend surface of the fitting for relationships of wheat yield and nitrogen recovery rate with integrated quality index of soil fertility and nitrogen application rate

### 3 结论

田间试验研究表明,在土壤肥力综合质量指数相同时,随着施氮量增加,小麦产量增大、NRE减小;当施氮量超过200 kg·hm<sup>-2</sup>时,小麦产量增大趋势减弱,部分试验田小麦产量减小,小麦NRE则不断减小,表明施氮量200 kg·hm<sup>-2</sup>已达到或接近研究区小麦适宜施氮量。在施氮量相同时,随着土壤肥力指数提高,小麦产量增大,NRE不断减小;施氮量越高,小麦产量和NRE与土壤肥力综合质量指数的相关性越小,表明土壤基础肥力发挥作用减弱。土壤肥力综合质量指数和施氮量与小麦产量及氮肥利用率存在显著的综合定量关系。施氮量和土壤肥力综合质量指数共同提升有利于增加小麦产量,但不利于提升小麦氮肥利用率NRE,对小麦产量和氮肥利用率的综合作用矛盾突出;土壤肥力综合质量指数对小麦产量和NRE的影响力大于施氮量,两者对产量和NRE相对贡献率比值分别为1.09:1和1.32:1。因此,通过提升土壤综合肥力质量、削减氮肥施用量,实现粮食与生态安全双重目标,培育和提升耕地土壤质量显得更为基本和重要。

### 参考文献

- [1] 刘绪. 减氮对苏南轮作稻麦产量、氮肥利用率和土壤肥力的影响. 南京: 南京农业大学, 2016
- [2] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146 (1): 103—112
- [3] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响. *土壤学报*, 2011, 48 (5): 988—995
- [4] Xue L, Yu Y, Yang L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (11): 115010
- [5] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake Region, China. *Plant & Soil*, 2009, 319 (1/2): 225—234
- [6] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥

- 高效利用的基础研究. 北京: 科学出版社, 2010
- Zhu Z L, Zhang F S. Basic research on nitrogen behavior and efficient utilization of nitrogen fertilizer in main farmland ecosystem (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [ 7 ] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区. 土壤学报, 2014, 51 ( 5 ): 921—933
- Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 ( 5 ): 921—933
- [ 8 ] Gu L, Liu T, Wang J, et al. Lysimeter study of nitrogen losses and nitrogen use efficiency of Northern Chinese wheat. Field Crops Research, 2016, 188: 82—95
- [ 9 ] Brentrup F, Palliere C. Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator. OECD Workshop on Agri-Environmental Indicators, 2010
- [ 10 ] Fageria N K, Baligar V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. Advances in Agronomy, 2005, 88 ( 5 ): 97—185
- [ 11 ] 李锐. 不同基础地力对水稻产量和肥料利用效率的影响. 武汉: 华中农业大学, 2011
- Li R. The effects of different soil fertility on rice yield and fertilizer use efficiency (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011
- [ 12 ] 廖育林, 鲁艳红, 聂军, 等. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 ( 5 ): 1249—1258
- Liao Y L, Lu Y H, Nie J, et al. Effects of long-term fertilization on basic soil productivity and nutrient use efficiency in paddy soils (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22 ( 5 ): 1249—1258
- [ 13 ] 丁哲利, 彭建伟, 刘强, 等. 不同地力水平下不同养分管理模式对早稻氮素利用效率及产量的影响. 中国稻米, 2010, 16 ( 2 ): 30—33
- Ding Z L, Peng J W, Liu Q, et al. Effects of different nutrient management modes on nitrogen utilization efficiency and yield of early rice in different soil levels (In Chinese). China Rice, 2010, 16 ( 2 ): 30—33
- [ 14 ] Potthoff M, Dyckmans J, Flessa H, et al Dynamics of maize (*Zea mays L.*) leaf straw mineralization as affected by the presence of soil and the availability of nitrogen. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37 ( 7 ): 1259—1266
- [ 15 ] 冯程程. 土壤有机质品质与地力提升关系研究. 长春: 吉林农业大学, 2012
- Feng C C. Study on the relationship between soil organic matter quality and soil fertility enhance (In Chinese). Changchun: Jilin Agricultural University, 2012
- [ 16 ] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响. 中国农业科学, 2012, 45 ( 14 ): 2886—2894
- Zeng X M, Han B J, Xu F S, et al. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45 ( 14 ): 2886—2894
- [ 17 ] 张雪凌, 姜慧敏, 刘晓, 等. 优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 ( 2 ): 351—359
- Zhang X L, Jiang H M, Liu X, et al. Optimization of nitrogen rate and base and topdressing ratio to improve agronomic soil fertility and use efficiency of nitrogen in rice (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 ( 2 ): 351—359
- [ 18 ] 李雅剑. 玉米产量和氮肥利用效率与土壤基础生产力的关系. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017
- Li Y J. The relationship of grain yield and nitrogen use efficiency of maize with inherent soil productivity (In Chinese). Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017
- [ 19 ] 张军. 淮北麦茬田地力水平与施氮量对超级稻徐稻3号产量、品质和氮素吸收利用的影响. 江苏扬州: 扬州大学, 2010
- Zhang J. Effects of different soil fertility levels and N application rate on super rice Xu Dao 3 yield, quality, nitrogen absorption and utilization after wheat in Huaibei Region (In Chinese). Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2010
- [ 20 ] 常熟市统计局. 2016年常熟市国民经济和社会发展统计公报 [ EB/OL ]. <http://www.changshu.gov.cn/zgcs/UploadFile/ffe0c347-ef27-4ab3-9ed1-9fa81fffc94d/20170316165033480.doc>
- Chang shu Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of Changshu City in 2016 (In Chinese). <http://www.changshu.gov.cn/zgcs/UploadFile/ffe0c347-ef27-4ab3-9ed1-9fa81fffc94d/20170316165033480.doc>
- [ 21 ] 赵彦锋, 程道全, 陈杰, 等. 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑. 土壤学报, 2015, 52 ( 6 ): 1197—1208
- Zhao Y F, Cheng D Q, Chen J, et al. Problems and analytical logic in building cultivated land productivity

- evaluation index system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1197—1208
- [22] 徐志超, 于东升, 潘月, 等. 长三角典型区占补耕地土壤肥力的时段特征. *应用生态学报*, 2018, 29 (2) : 617—625
- Xu Z C, Yu D S, Pan Y, et al. Temporal characteristics of soil fertility of cropland requisition compensation in the typical region of Yangtze River Delta, China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (2) : 617—625
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 1999
- Bao S D. Soil agrochemical analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [24] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012
- Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [25] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析. *土壤学报*, 2015, 52 (6) : 1311—1324
- Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in china in recent 10 years (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1311—1324
- [26] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (2) : 296—303
- Liu X Y, Ju X T, Zhang L J, et al. Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (2) : 296—303
- [27] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究. *土壤学报*, 2009, 41 (3) : 372—376
- Yan J, Shen Q R, Yin B, et al. Effects of fertilizer N application rate on yields and use efficiencies in rice-wheat rotation system in Tai Lake Region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 41 (3) : 372—376

## Study on Comprehensive Quantitative Relationship of Soil Fertility Quality and Nitrogen Application Rate with Wheat Nitrogen Use Efficiency

LU Xiaosong<sup>1,2</sup> YU Dongsheng<sup>1,2†</sup> XU Zhichao<sup>1,2</sup> HUANG Jingjing<sup>1,2</sup> ZHOU Congcong<sup>1,2</sup> SUN Bo<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Both soil fertility and fertilizer N application rate (NA) have important influences on yield and fertilizer N use efficiency (NRE) of wheat. However, it is still unclear about quantitative relationship and relative contribution of their comprehensive effects to the latters. A field experiment was conducted in Changshu of the Taihu Basin. It was designed to have plots different in soil fertility and N application rate for wheat growth, and oriented to explore, how NA and integrated quality index of soil fertility (IFI) affect yield and NRE of the crop. Besides, their quantitative relationships were fitted with the multivariate regression method for analysis of relative contribution rate of the comprehensive effect of NA and IFI to yield and NRE of wheat. Results show that higher NA and IFI helps increase wheat yield, but not NRE of the crop, and that IFI was higher than NA in the effect, and their relative contribution rate was 1.09:1 to wheat yield and 1.32 : 1 to NRE. The findings of the study suggest that to improve comprehensive quality of the soil may achieve the goal of safety for both grain and ecology, while minimizing N application rate. So to build up soil fertility quality of the farmland is more basic and more important in agricultural production.

**Key words** Fertilizer N use efficiency; Integrated quality index of soil fertility; Fertilizer N application rate; Wheat; Taihu Basin

(责任编辑: 檀满枝)