

# 基于文献调研的我国部分地区单位产量氮流失量影响因子研究

王 芊

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部农业环境重点实验室, 北京 100081)

**摘 要** 基于 CNKI、Science Direct、Web of Science 等数据库,以“面源污染”为主题,以“N”、“淋洗”、“径流”、“化肥”、“缓控释肥”、“秸秆还田”等为关键词,搜索 1995 年至 2016 年发表的文献资料,共收集了我国三大平原主要粮食作物氮(N)径流和淋洗的近 200 篇研究文献。通过提取文献中的施肥量、土壤养分、质地、灌溉降雨、产量等数据,计算单位产量 N 流失量及分析其影响因子,并基于逐步回归方法,构建不同作物和施肥管理措施的单位产量 N 流失量模型。结果表明:1)施用化肥条件下,长江中下游平原单位产量 N 淋洗量主要受土壤全 N 的影响,黄淮海平原主要受到施 N 量和土壤全 N 的影响;2)长江中下游平原单位产量 N 径流量主要受到田间水分管理措施及施磷量、土壤全 N 的影响;3)在缓控释肥、秸秆还田条件下,主要影响因子分别为土壤全 N 含量、施 N 量。因此,本研究提出以下建议:在长江中下游平原,单位产量 N 径流量高于单位产量淋洗量,需通过生态沟渠、缓冲带等技术加强对田间径流中的 N 的拦截、回收利用,扩大水稻缓控释肥的施用面积;在黄淮海平原,施用化肥条件下施 N 量是单位产量 N 淋洗量的重要影响因素,应优化减少施 N 量,控制砂质土壤条件下的水肥施用,扩大秸秆还田面积;在东北平原,要加强水肥运筹调控提高氮利用率。

**关键词** 单位产量氮流失负荷; 径流; 淋洗; 影响因子

中图分类号 S19 文章编号 1007-4333(2021)01-0151-13 文献标志码 A

## Impacts factors of nitrogen loss on yield-scaled basis in some regions in China based on literature survey

WANG Qian

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory for Agricultural Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Based on CNKI, ScienceDirect and Web of Science databases, around 200 literature related to N runoff and leaching loss of major cereal systems of three major plains in China and published on 1995 – 2016 were collected by taking “non-point pollution” as searching theme and “N”, “leaching”, “runoff”, “chemical fertilizer”, “slow and controlled-release fertilizer” and “straw returning practice” as keywords. Yield-scaled N loss was calculated by extracting valuable data from the literature, including fertilization amount, soil nutrition, soil texture, precipitation, irrigation and crop yield. Impact factors were analyzed by setting up multi-factors linear regression models of yield-scaled N loss for different crops and specific field management based on step-wise regression method. The main results were: 1) In terms of chemical fertilizer, the main impact factor affecting yield-scaled N leaching loss was soil total nitrogen content (TN) in MLYP (Middle-Lower Yangtze Plain), and N fertilization amount and TN in NCP (North China Plain); 2) Yield-scaled N runoff loss was more affected by irrigation field management, P fertilization amount and TN in MLYP; 3) In terms of SCRF (Slow and controlled-release fertilizer) and straw returning tillage, the main impact factors were TN and N fertilization amount, respectively. Relevant management measures suggested in this study are as follows: In MLYP, yield-scaled N runoff loss is higher than yield-scaled N leaching loss. In order to reduce yield-scaled N runoff loss and enhance the recycling and retaining of N nutrient, it is necessary to adopt technologies such as

收稿日期: 2020-04-28

基金项目: “十二五”水体污染控制与治理专项(2015ZX07103-007)

作者简介: 王芊,助理研究员,博士,主要从事农业面源污染防治研究,E-mail: wangqian02@caas.cn

ecological ditches or buffer zones. The application area of SCRF should be increased. In NCP, in the case of chemical fertilizer, N application is an important factor positively affecting yield-scaled N leaching loss, which suggests a proper value could be determined by decreasing N application amount. It is needed to decrease wheat growing area in sandy soil and increase straw returning tillage area. In Northeast Plain, both irrigation and N fertilization management should be optimized to improve nitrogen use efficiency.

**Keywords** yield-scaled nitrogen pollution loss; runoff; leaching; impact factor

农业面源污染已成为世界范围内普遍关注的问题。在欧美等发达国家,农业面源污染成为河流污染的重要原因,美国 59% 的受污染河流源于农业源污染,欧洲河流氮污染中农业源占 50%~70%<sup>[1]</sup>;我国太湖流域农业源污染占 30%~40%,洱海流域、重庆三峡库区可达到 68% 以上,全国农业源氮、磷污染占 50% 以上<sup>[2-6]</sup>。2015 年我国制定了“到 2020 年化肥使用量零增长行动方案”,大力推广测土配方施肥、秸秆还田、有机肥施用,降低化肥的施用量,以减轻对环境的污染<sup>[7]</sup>。长期以来单位面积污染负荷一直是衡量面源污染水平的主要指标,但由于该指标设定没有考虑到生产经济效益,不能实现环境效益与经济效益的统筹兼顾。近年来,已有研究提出了将氮流失量与产量相结合的单位产量氮流失量指标,作为指导不同管理措施开展的重要依据:如 Zhou 等<sup>[8]</sup>通过收集世界范围内种植玉米、小麦的 30 余篇氮淋洗文献,分析了施氮量与单位产量氮淋洗量间的关系,发现当施氮量降低至 100~200 kg/hm<sup>2</sup> 时,单位产量氮淋洗量平均值为可由 5.40~5.41 kg/t 降低至 3.2~4.5 kg/t; Zhao 等<sup>[9]</sup>基于北美地区 30 余篇玉米氮淋洗试验结果,分析了单位产量氮淋洗量与氮盈余量、降雨量、土壤质地、耕作措施间的关系,发现氮盈余量、降雨量是影响单位产量氮淋洗量的显著因子,土壤质地具有一定的影响,而耕作措施的影响较小。

现有作物产量尺度的氮流失研究多是基于国外研究数据,针对我国不同区域和施肥管理措施下的开展的研究鲜有报道,并且主要为面积尺度下的氮、磷流失研究<sup>[10-17]</sup>。因此,为研究我国单位产量氮流失量的影响因素,本研究拟选取长江中下游、黄淮海和东北平原这三大我国粮食主产区,以大田生产中较为常见的“化肥”、“秸秆还田”、“缓控释肥”的 3 类施肥管理措施等为关键词,搜索 CNKI、ScienceDirect 等国内外主要数据库,收集并进行数据提取有关氮流失文献工作,并基于典型区域计算不同作物、管理措施间的单位产量氮流失量(以下简

称新指标),通过逐步回归方法建立新指标与影响因子间的线性模型,同时对不同区域、管理措施间的新指标差异进行比较,进而为制订区域尺度下农田管理措施提出建议,也为我国农田面源污染防控政策提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据来源

基于 CNKI、Science Direct、Web of Science 等数据库开展面源污染文献收集,以“面源污染”为主题,以“N”、“淋洗”、“径流”、“化肥”、“缓控释肥”、“秸秆还田”等关键词分别进行搜索,论文发表年份为 1995—2016 年,共收集近 200 篇文献。调查作物主要为小麦、水稻、玉米。文献中涉及东北平原和黄淮海平原的氮流失以硝态氮为主,长江中下游平原氮流失主要为全氮。对于淋洗测定深度而言,黄淮海平原测定的土层较深,集中在 100~200 cm 深处。长江中下游平原和东北平原深度较浅,集中在 50~100 cm 深处。

提取的指标包括水肥管理措施、土壤养分、质地及产量等,主要包含:氮肥施用量(kg/hm<sup>2</sup>)、磷肥施用量(kg/hm<sup>2</sup>)、砂粒含量(%)、粉粒含量(%)、粘粒含量(%)、土壤全 N(g/kg)、全 P(g/kg)、碱解氮(mg/kg)、速效磷(mg/kg)、降雨量(mm)、灌溉量(mm)、施肥方式、作物产量(t/hm<sup>2</sup>)等。土壤质地按美国分类标准,即粘粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)和砂粒(0.05~2.00 mm)。磷肥施用量以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计,土壤养分数据取自 0~20 cm 耕层。对于无法直接获取的文献数据,利用 Engauge Digitizer 软件提取。

### 1.2 逐步回归方法

本研究所利用的新指标的计算公式如下:

$$NI = NL/Y$$

式中:NI 为单位产量氮径流量或淋洗量,kg/t;NL 为氮径流量或淋洗量,kg/hm<sup>2</sup>;Y 为作物籽粒产量,t/hm<sup>2</sup>。

本研究利用 SPSS 13.0 软件开展逐步回归运算。由于不同文献中提供的指标的完整度不尽相同,为了确保在逐步回归建模型过程中尽可能多地纳入数据齐全的自变量,有相当一部分文献在筛选过程中被排除在建模数据之外,因而模型的建模样本量也相应减少。逐步回归计算结果中显示了各步骤的方差,前后步骤方差的差视为新引入的影响因子的方差,该方差与最终模型总方差

之比即为相应影响因子的权重值。对于未采取逐步回归方法的个别后向模型则未计算权重。在构建逐步回归模型时为尽可能考虑更多因素,在前述收集的文献中进一步筛选出 23 篇开展大田试验的文献,各省份的文献数量如表 1 所示。文中箱式图用 Sigmaplot 12.5(Systat Software Inc.)制作,利用 Microsoft Excel 2003 软件制作曲线拟合图和计算回归曲线。

表 1 参与计算文献省份分布情况

Table 1 Adopted literature distribution in three major plains

地点 Place	省份(参与计算文献数量) Province (No. of adopted literature)	合计 Total
长江中下游平原 Middle-Lower Yangtze Plain	江苏(6.0)、浙江(3.0)、安徽(1.0)、上海(1.0)	11
黄淮海平原 North China Plain	北京(4.0)、河北(3.0)、山东(2.0)	9
东北平原 Northeast Plain	黑龙江(1.5)、吉林(1.5)	3

### 1.3 水氮管理方式

在长江中下游平原:1)水稻。主要采取了泡田和晒田交替的常规的灌溉方式,安徽巢湖采取了浅湿灌溉方式。氮肥按播前、苗期、分蘖期、拔节期、穗期施肥 3~4 次,巢湖和江苏宜兴均施用 3 次氮肥,施用比例各不相同。嘉定地区主要追施碳铵,而浙江杭州和宜兴均为尿素。水稻施用缓控释肥涉及江苏常熟和浙江杭州,施肥方式均为底施,灌溉方式为连续灌溉和节水灌溉 2 种;2)小麦。氮肥按播前、苗期、拔节期、穗期施用分 2~3 次施用,生育期一般不灌溉。

在黄淮海平原:1)小麦。在播种、分蘖、起身、拔节、穗期等时期灌溉 2~4 次,每次灌溉量为 75mm。氮肥按底肥、拔节肥施用 2 次;2)玉米。按出苗期和拔节期灌溉 1~2 次,氮肥按底肥、追肥施用 1~2 次;3)秸秆还田涉及河北清苑、栾城与山东南四湖区,水肥管理方式与常规方式相仿。

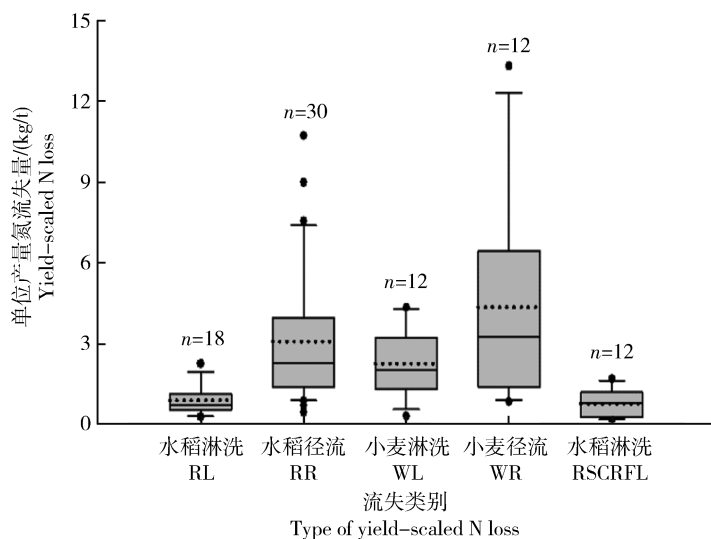
在东北平原:1)玉米。雨养种植,施肥方式多为底肥,玉米生长季降雨量为 280~608 mm;2)水稻。基于黑龙江省齐齐哈尔市的试验,灌溉方式设置了常规灌溉、控制灌溉和浅湿灌溉 3 种方式,氮肥按播种、返青期 2 个时期各一半的比例施入。

## 2 结果与分析

### 2.1 长江中下游平原新指标影响因子

在长江中下游平原,氮流失新指标中以缓控释肥条件下的水稻氮淋洗值最低(0.77 kg/t)。施用化肥条件下,氮流失新指标按从大到小的顺序为小麦径流、水稻径流、小麦淋洗、水稻淋洗,相应的数值分别为 4.35、3.07、2.26、0.89 kg/t(图 1)。从氮流失量与作物产量关系看,与上述 5 类新指标对应的两者的抛物线模型均未达显著水平( $P > 0.05$ ) (图 2)。水稻的抛物线曲线在产量约为 7 t/hm<sup>2</sup> 对应的淋洗量和径流量值最高(图 2(a)、(c)和(e)),以径流量值最高,约为 25 kg/hm<sup>2</sup>(图 2(c))。小麦抛物线曲线在产量处于 4~5 t/hm<sup>2</sup> 时对应的淋洗量和径流量值达到最高(图 2(b)和(d)),小麦淋洗最高值较水稻值高(图 2(a)和(b)),最高值分别约为 13 和 8 kg/hm<sup>2</sup>。

在长江中下游平原,施用化肥条件下水稻氮径流、淋洗新指标模型分别达到了显著、极显著水平,模型自变量分别为施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 量、土壤全 N,权重值分别为 0.15、0.49。降雨量与 2 个因变量间的相关系数均未达到显著水平( $P > 0.05$ ) (表 2)。小麦氮径流新指



箱式图从下到上的横实线分别代表 10%、25%、50%、75%、90% 的分位线,位于分位线之外的点为所对应分布函数  $<10\%$  或  $>90\%$  的点。虚线为平均值。RL, RR, WL, WR 分别代表施用化肥条件下水稻氮淋洗、水稻氮径流、小麦氮淋洗、小麦氮径流。RSCRFL 为施用缓控释肥条件下的水稻氮淋洗。 $n$  为样本量。图 3 和图 5 同。

Solid horizontal lines of the box plot from the bottom to the top represent 10%, 25%, 50%, 75% and 90% percentiles, the dots outside the 10% and 90% percentiles represent data lower than 10% percentile or higher than 90% percentile. Dotted lines represent mean values. RL, RR, WL, WR respectively represent N leaching of rice, N runoff loss of rice, N leaching of wheat, N runoff of wheat after applying chemical fertilizer. RSCRFL represents N leaching of rice by applying slow and controlled-release fertilizer.  $n$  represents number of samples. The same in Fig. 3 and Fig. 5.

图 1 长江中下游平原单位产量氮流失量(新指标)

Fig. 1 Yield-scaled N loss new index in Middle-Lower Yangtze Plain

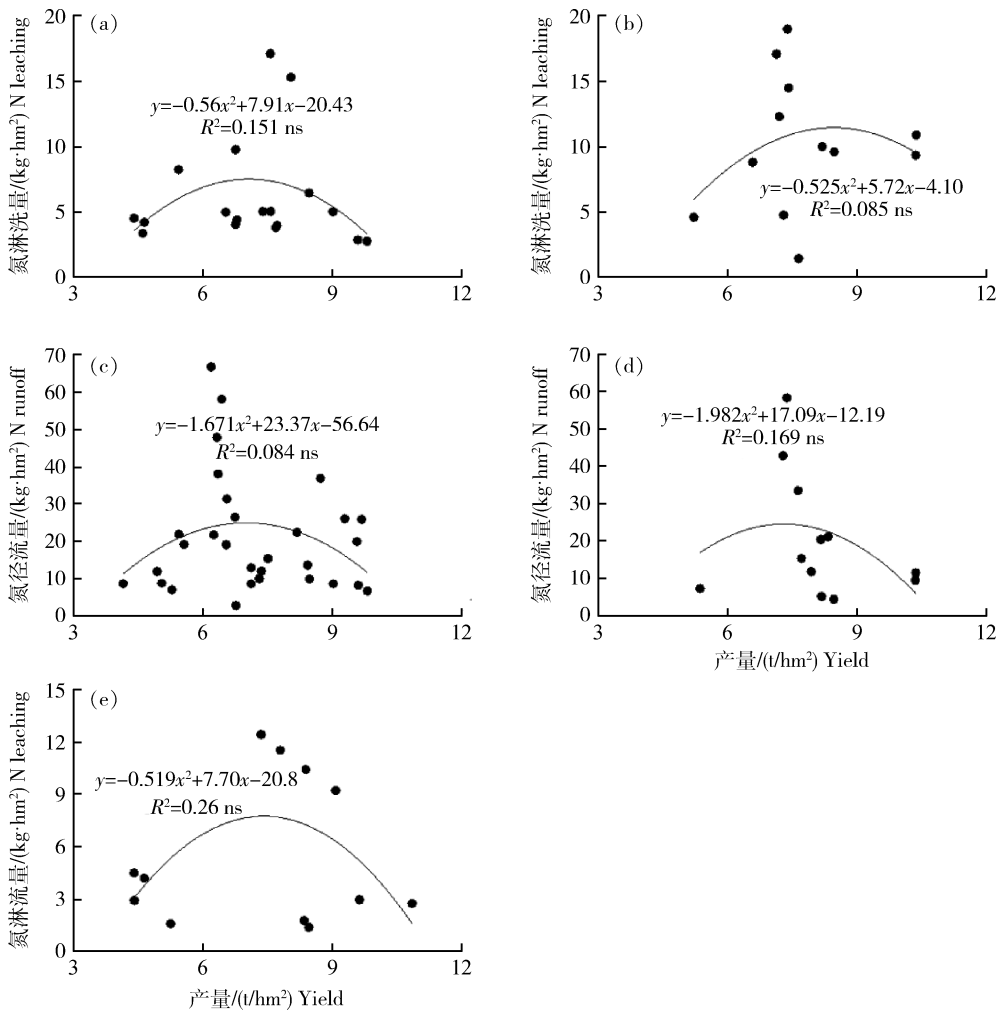
标模型达到极显著水平( $P < 0.01$ ),自变量为土壤全 N 含量和降雨量,权重值分别为 0.52、0.41。小麦氮淋洗新指标模型未达显著水平( $P > 0.05$ ),从相关系数看降雨量的影响相对较高,且呈正相关(数据未列出)。缓控释肥条件下,水稻氮淋洗量新指标模型的自变量仅为土壤全 N 含量,模型达到极显著水平,且与土壤全 N 含量间呈正相关(表 3)。从水肥管理措施看,水稻管理存在着较大差异,小麦管理措施基本相同。施用化肥条件下,水稻氮径流模型的区域间灌溉和施用微肥管理存在着一定差异(安徽巢湖施用了锌肥和采取了浅湿灌溉),水稻氮淋洗模型主要是施用氮肥种类的差异(嘉定主要追施碳铵,而杭州和宜兴均为尿素)。缓控释肥条件下,主要差异为普通灌溉和节水灌溉(杭州采用了节水灌溉处理)。

## 2.2 黄淮海平原新指标影响因子

在黄淮海平原,小麦玉米秸秆还田周年轮作的氮淋洗新指标值比仅施用化肥的小麦或玉米单价低,平均值为 2.35 kg/t,小麦、玉米值分别为 5.87 和 4.66 kg/t<sup>[28-36]</sup>(图 3)。从产量和氮淋洗量之间的变化趋势看,秸秆还田措施下两者呈指数曲线变

化(图 4(c)),仅施用化肥的玉米氮淋洗量与产量呈线性变化(图 4(a)),这 2 个模型的因变量与自变量均呈正相关,模型分别达到极显著水平( $P < 0.01$ )和显著水平( $P < 0.05$ )。对于仅施用化肥的小麦而言,两者间抛物线模型未达显著水平,抛物线在产量约 7 t/hm<sup>2</sup> 时氮淋洗量最高,约为 60 kg/hm<sup>2</sup>(图 4(b))。

在黄淮海平原,仅施用化肥条件下小麦、玉米氮淋洗新指标模型均达到极显著水平。小麦氮淋洗新指标与施氮量呈正相关,与土壤粘粒含量呈负相关。玉米则与施氮量、全 N 含量呈正相关(表 4)。玉米新指标模型中权重值较高的自变量为全 N 含量,权重值为 0.24。小麦新指标模型采用后向回归方法建模,施氮量、粘粒含量与新指标的相关性均未达显著水平,但二元回归模型达到极显著水平,施氮量表现出正向作用,粘粒含量为负向作用。虽然灌溉与降雨量因子未入选模型,但其与玉米氮淋洗新指标呈显著正相关,表明了小麦季与玉米季的不同降雨分布特点。据文献数据显示,小麦季的灌溉降雨量之和变幅较小,均值和标准差分别为 407、56 mm;



(a)、(b)、(c)和(d)分别为施用化肥条件水稻氮淋洗量、小麦氮淋洗量、水稻氮径流量及小麦氮径流量，(e)为缓控释肥条件下水稻氮淋洗量。

$R^2$  代表决定系数, ns 代表模型未达到显著水平, \*、\*\* 代表模型分别达到  $P=0.05$ 、 $P=0.01$  显著性水平。下同。

(a), (b), (c) and (d) represent RL, WL, RR, WR and respectively. (e) represents RSCRFL.

$R^2$  represents determination coefficient. ns represents the model doesn't reach 0.05 significant level. \* and \*\* represent the model reaches  $P=0.05$  and  $P=0.01$  significance level, respectively. The same below.

图 2 长江中下游平原氮流失量与作物产量关系

Fig. 2 Relationships between N loss and crop yield in Middle-Lower Yangtze Plain

而在玉米季,降雨期较集中且降雨量变幅较大,水分供应以降雨为主,均值和标准差分别为 370、138 mm。在秸秆还田条件下,由于文献数据较少,故本研究利用一个轮作周期内小麦和玉米两季数据进行计算,氮淋洗新指标模型仅含施氮量因子,且达极显著相关(表 4)。

### 2.3 东北平原新指标影响因子

在东北平原,施用化肥条件下玉米氮淋洗新指标值比水稻高,玉米平均值为 2.98 kg/t,水稻值为 1.59 kg/t<sup>[38-40]</sup>(图 5)。从玉米的氮淋洗量与产量间

的曲线关系看,两者间存在开口向下的抛物线变化,模型达到显著水平( $P < 0.05$ ),而水稻的则无明显的变化趋势,模型未达到显著水平(图 6)。

由于东北平原的文献相对较少,未在文中专门列出玉米、水稻的单位产量氮淋洗量模型。模型结果显示,玉米单位产量氮淋洗量与降雨量呈负相关,与化肥氮施用量呈正相关,降雨量的权重值高于施氮量。而水稻单位产量氮淋洗量与灌溉降雨之和、化肥氮施用量均呈正相关,灌溉降雨之和是主要的影响因子。

表2 长江中下游平原施用化肥的新指标模型系数<sup>[18-26]</sup>

Table 2 Yield-scaled N loss model by applying chemical fertilizer in Middle-Lower Yangtze Plain<sup>[18-26]</sup>

作物 Crop	新指标类别 NI type	项目 Item				显著性 Significance	样本量 No. of samples
		常数项 Constant	全 N 含量 Total N	降雨量 Rainfall	施 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> application amount		
水稻 Rice	氮径流 N runoff	1.760	—	—	0.012 (0.15)	0.032	30
	氮淋洗 N leaching	0.329	0.345 (0.49)	—	—	0.001	18
小麦 Wheat	氮径流 N runoff	-37.06	17.902 (0.52)	0.031 (0.41)	—	0.001	12

注:第4~6列自变量回归系数后的括号中的数字为权重。“—”代表该自变量未入选模型。表格标题后面列出了参与运算的文献序号。下同。

Note: Weight coefficients are listed inside the brackets after and regression coefficients of independent variables for each model in 4-6 columns in the table. — represent the corresponding variable isn't included by the model. Relevant literature was listed as the superscript figures behind the title of table. The same below.

表3 长江中下游平原缓控释肥条件下水稻氮淋洗新指标模型系数<sup>[23,27-28]</sup>

Table 3 Yield-scaled N leaching loss model by applying slow and controlled-release fertilizer in Middle-Lower Yangtze Plain<sup>[23,27-28]</sup>

作物 Crop	新指标类型 NI type	常数项及自变量系数 Constant and independent variable		显著性 Significance	样本量 No. of samples
		常数项 Constant	全 N 含量 Total N		
		水稻 Rice	氮淋洗 N leaching		

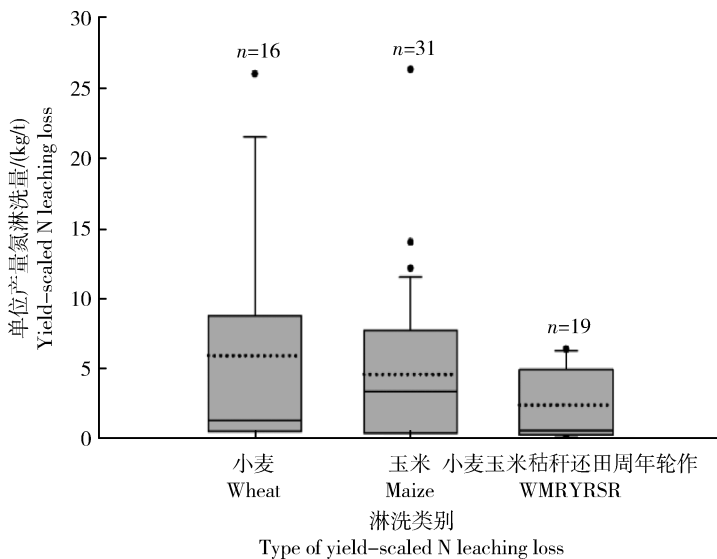
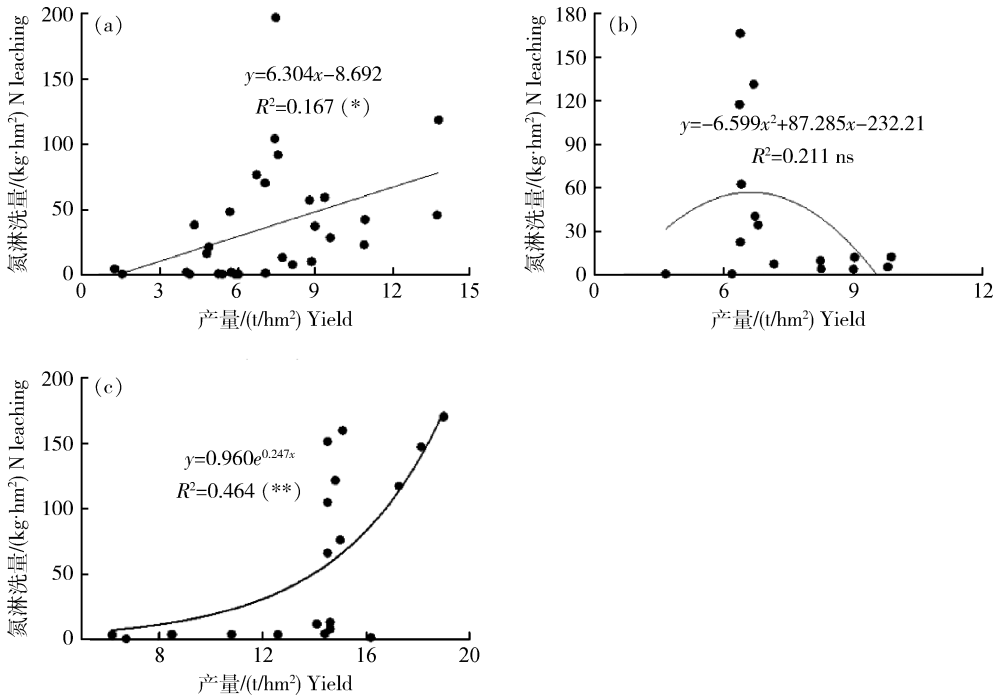


图3 黄淮海平原氮淋洗新指标

Fig. 3 Yield-scaled N leaching loss in North China Plain



(a)、(b)分别为施用化肥条件玉米氮淋洗量、小麦氮淋洗量。(c)为秸秆还田条件下小麦玉米周年轮作氮淋洗量。

(a) and (b) represent maize N leaching and wheat N leaching by applying chemical fertilizer, respectively. (c) N leaching in the case of WMRYRSR.

图 4 黄淮海平原氮淋洗量与作物产量间的曲线图

Fig. 4 Relationship curves between N leaching loss and crop yield in North China Plain

表 4 黄淮海平原仅施用化肥和秸秆还田条件下氮淋洗新指标模型系数<sup>[29-37]</sup>

Table 4 Yield-scaled N leaching model by only applying chemical fertilizer and the model of wheat-maize round year rotation by implementing straw returning tillage in North China Plain<sup>[29-37]</sup>

作物 Crop	管理措施 Management	项目 Item				显著性 Significance	样本量 No. of samples
		常数项 Constant	施氮量 N application amount	全 N 含量 Total N	粘粒 Clay		
小麦 Wheat	化肥 Chemical	17.92	0.056	—	-1.30	0.001	16
玉米 Maize	fertilizer	-7.08	0.019 (0.15)	8.15 (0.24)	—	0.001	31
小麦、玉米 Wheat and maize	秸秆还田 Straw returning	-0.98	0.010 (0.70)	—	—	0.001	19

注：化肥模型运算借鉴了文献[29]~[34]；秸秆还田模型运算借鉴了文献[35]~[37]。

Note: NI calculations models for applying chemical fertilizer is according to references [29]—[34] and for implementing straw returning practic are according to references [35]—[37].

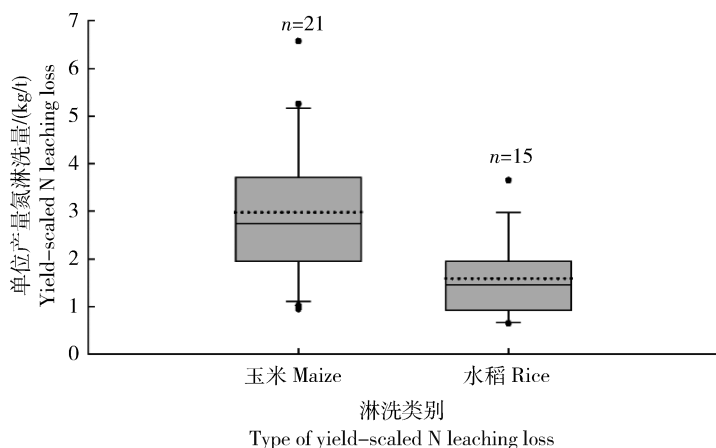
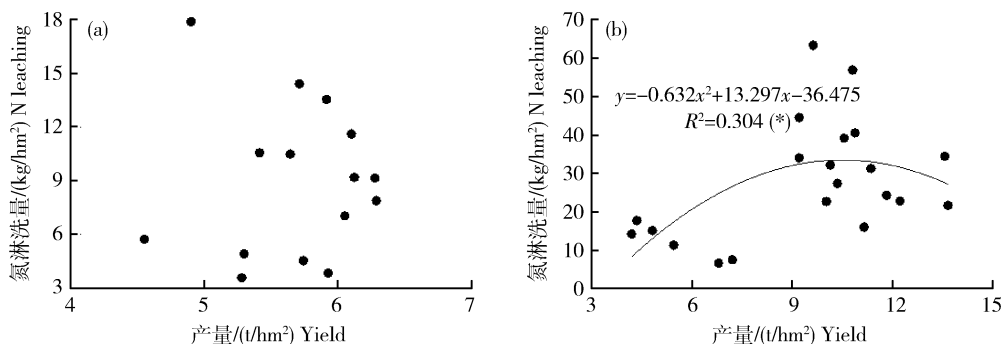


图5 东北平原氮淋洗新指标

Fig. 5 Yield-scaled N leaching loss in Northeast Plain



(a)、(b)分别为施用化肥条件水稻氮淋洗量、玉米氮淋洗量。

(a) and (b) represent rice N leaching and maize N leaching by applying chemical fertilizer, respectively.

图6 东北平原氮淋洗量与作物产量间的曲线图

Fig. 6 Relationship curves between N leaching loss and crop yield in Northeast Plain

### 3 讨论

#### 3.1 不同区域对新指标的影响

我国制订化肥、农药零增长政策的出发点是为了更科学有效地施用化肥、农药,减少不合理的施用量,通过开展有针对性的管理技术措施,进而减少面源污染流失量和提高农业生产效率<sup>[41-42]</sup>。这与本研究中新指标的背景相契合,即在提高效率的基础上不断提高农产品产量,将效率优势转换为经济优势。

由于不同区域的气象、土壤等自然环境条件不同,必然会导致区域间新指标影响因素的差异。江苏环太湖地区是长江中下游平原的重要农业产区,该区为北亚热带季风性湿润气候区,气候温和湿润,热量充足,降雨丰沛,雨热同季,年平均气温 15.4~16℃, >10℃的积温为 4 800~5 000℃,年总降水量 1 010~1 200 mm。主要土壤类型为水稻土,因

长期稻、麦、棉水旱轮作,剖面中沙黏间层明显,故多漏水漏肥,形成漏水水稻田<sup>[43]</sup>。在长江中下游平原,影响新指标的主要因素不是施氮量,而是土壤全 N 含量、降雨、施磷量等因素,应加强土壤养分管理和田间水利基础设施建设,稳步减少施氮量。同样, Zhang 等<sup>[44]</sup>在江苏常熟开展的 2 个周期稻麦轮作试验得出类似的结果,在减少施用氮肥的条件下对水稻的产量影响并不明显,水稻季的后作小麦的产量则与其前作的土壤氮盈余呈显著相关。

黄淮海平原属于暖温带半湿润、湿润气候区,年平均气温 8~16℃, >0℃的积温在 4 200~5 500℃,无霜期较长。光照充足,年日照为 2 800~2 100 h。年降水量为 700~900 mm。潮土是该区域的主要土壤类型,有机质含量普遍偏低。潮土土体深厚,结构较松,宜于耕作管理。该区域影响新指标的主要因素是施氮量,同时也存在土壤质



地和养分含量等因素,表明该地区存在满足减少氮流失和维持现有产量条件的最优施氮量。应重点围绕优化施氮量来开展田间管理,并考虑土壤养分管理和质地改良措施,减少氮流失量。这与一项基于黄淮海平原农田的多年的淋洗试验的结论相似,当施氮量介于 $180\sim 240\text{ kg/hm}^2$ 可兼顾作物产量和淋溶水水质<sup>[45]</sup>。

东北平原区属温带季风气候类型,年降水量 $300\sim 900\text{ mm}$ ,年均气温 $0.7\sim 9.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,无霜期为 $90\sim 185\text{ d}$ ,热量适于一年一熟。黑土是该区域的主要土壤类型,黑土区的地形主要是山麓平原台地及山前洪积阶地,地势平缓辽阔,呈波状漫岗起伏,坡度一般在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 。影响该区域新指标的影响因子主要是水分,另外还有施氮量。研究结果表明水肥管理对于东北黑土区玉米、水稻氮利用率的影响<sup>[46-47]</sup>。玉米产量与氮肥利用率呈正相关,随着降雨量的增加促进了玉米的生长,提高了氮肥利用率,从而降低了氮的淋洗风险。对于黑土区水稻籽粒氮含量与氮肥的施用方法和施用量具有统计相关性,且氮肥利用率还受到水氮运筹方法的影响,不当的水肥管理方式会造成氮损失的增加。

本研究结果显示,施化肥条件下黄淮海平原的玉米、小麦氮淋洗新指标达到 $4.66\sim 5.87\text{ kg/t}$ ,而长江中下游平原的水稻、小麦值为 $0.89\sim 2.26\text{ kg/t}$ ,这与两地的环境有关:黄淮海平原的高施氮量造成较高的土壤氮残留,极易随灌溉和降雨而淋失<sup>[30]</sup>;而长江中下游平原发生的氮反硝化、氨挥发和径流损失较高,而淋洗量相对较少,施肥不会带来过多的氮残留<sup>[25]</sup>。东北平原水稻、玉米的氮淋洗新指标值为 $1.59\sim 2.98\text{ kg/t}$ ,介于长江中下游平原与黄淮海平原之间,这与当地一年一熟的种植制度及氮肥的激发效应存在关系<sup>[47]</sup>。相对于一年两熟制,一年一熟制,肥料氮投入减少,因土壤中的残留氮升高引起的氮淋洗风险也有所降低,但是东北平原地区增加氮肥时存在着正激发效应,又促进了土壤氮残留的增加。

### 3.2 不同管理措施间新指标影响因子差异

#### 1) 施用化肥

灌溉和降雨是引起农田氮流失的2个主要的水分因子。长江中下游平原的小麦氮径流新指标模型的影响因子包括了降雨量因子,但土壤全N含量的权重更高。而水稻氮径流新指标模型未包括降雨因子,这与水分管理措施间差异有关。小麦仅靠降雨

补给水分,而水稻采用了泡田、晒田等灌溉措施,减弱了降雨对水稻氮径流的影响。已有测定水稻氮径流量的方法既有仅考虑降雨引的损失量( $\text{NI}=16.3\text{ kg/t}, n=16$ )<sup>[19,20,22,25]</sup>的类型,也有同时考虑排水和降雨二者之和的损失量( $\text{NI}=26.3\text{ kg/t}, n=14$ )<sup>[21]</sup>的类型。东北平原模型数据主要由单一地点试验数据构建,涉及到玉米和水稻2个氮淋洗新指标模型的主要因子均为水分因子。由于东北玉米主要是雨养种植方式,在降雨量未能造成显著氮淋洗的条件下,随着降雨量的升高玉米产量的增加幅度超过了氮淋洗量,就会导致新指标与降雨量呈负相关的现象。这也得到了玉米氮淋洗量与产量间关系图的进一步印证,当产量增加到一定程度后玉米氮淋洗量开始下降,表明了降雨增加导致了玉米强烈的氮吸收作用,减少了氮的淋洗(图6)。

施氮量及土壤养分对新指标具有重要影响。黄淮海平原和东北平原2个北方地区新指标模型均包括施氮量因子,但南方长江中下游平原新指标模型未包括施氮量。长江中下游平原氮肥反硝化损失严重,产量因基础肥力较高受施氮量的影响较小,施氮量对氮流失和产量的影响有限<sup>[21]</sup>。长江中下游平原的小麦氮径流、水稻氮淋洗和黄淮海平原玉米氮淋洗新指标模型均包括了全N含量因子,这表明除肥料外土壤氮残留或矿化作用对新指标具有重要影响,通过适当减少施氮量水平仍能保证较高的经济效益。黄淮海平原小麦氮淋洗新指标模型包括了土壤粘粒含量、施氮量2个因子,表明存在施肥与土壤质地间的互作作用,应根据土壤条件合理施肥,减少氮淋洗损失。

此外,长江中下游平原水稻氮径流新指标与施磷量呈显著正相关。施磷量与氮径流量和籽粒产量分别呈正相关和负相关,却均未达到显著水平(数据未列出),这表明增加施磷量可能通过促进植物根系生长和土壤氮的矿化增加了氮径流量,施磷量过高也会影响土壤铁和锌等微量元素的供应进而降低作物产量<sup>[48]</sup>,从而使施磷量成为显著影响因子。

#### 2) 秸秆还田

开展秸秆还田措施对于氮淋洗的影响研究结果不尽相同:有研究认为秸秆覆盖减少地面蒸发,在增加水分下渗的同时加剧了氮淋洗<sup>[49]</sup>;也有研究发现秸秆覆盖条件下存在水肥互作效应,能促进小麦对氮肥的吸收利用,减少了土壤中氮残留<sup>[50-51]</sup>。本研究数据显示,施氮量是小麦玉米周年轮作体系新指

标的主要影响因子,相对于仅施用化肥秸秆还田减轻了氮淋洗。但是随着小麦玉米的周年产量达到较高水平后,氮淋洗量急剧增加(图4(c))。这表明在较高的水肥条件下,伴随着秸秆还田措施的疏松土壤和增加秸秆氮的矿化的双重作用,促进了氮淋洗的发生。在华北平原黑龙港流域开展的秸秆还田试验结果就表明,降雨量的增加会使0~90 cm土壤的硝态氮残留量显著增加<sup>[52]</sup>。

### 3) 缓控释肥

施用缓控肥条件下,长江中下游平原的水稻新指标模型仅含土壤全N含量因子,而施氮量的影响不显著,表明了缓控释肥符合作物的吸肥规律,可减轻氮淋洗发生。与施用化肥条件下的模型相比,缓控释肥的土壤全N的权重更高,二者分别为0.49、0.80。这表明缓控释肥条件下由于化肥氮逐步释放,水稻生长需氮更依赖于土壤肥力,从而加速了土壤矿化进程,使得土壤全N含量与新指标相关性更为显著。与在湖北江汉平原开展的水稻-油菜轮作的缓释肥试验结果相似,缓释肥能够稳定水稻产量,并减少氮的淋洗量<sup>[53]</sup>。在太湖直湖港流域开展水稻氮淋洗试验结果发现,缓控释肥相对于常规施肥增加了氮肥恢复效率,显著增加了氮肥农学效益,进而减少了氮淋洗损失量<sup>[54]</sup>。

本研究采用了3个平原部分地区的文献数据进行分析,文献量相对较少,不足以全面反映区域总体情况,分析结果仅限于典型区域的分析。另外,由于区域内水肥管理措施间的差异,也会对结果造成一定影响。今后有待于进一步增加研究样本量,减少管理措施差异影响,提高研究结果的针对性。

## 4 结论

本研究围绕单位产量氮流失量这一新指标开展了文献收集和整合,比较了不同区域、施肥管理措施间的新指标差异,重点围绕长江中下游平原和黄淮海平原开展了新指标影响因子分析,并提出了区域尺度下的水肥管理优化措施:1)在长江中下游平原,由于其影响因子不包括施氮量,需通过生态沟渠、缓冲带来拦截、回收利用田间径流氮应扩大缓控释肥施用面积;2)在黄淮海平原,影响新指标的影响因子中均包括施氮量,因此应该优化减少施氮量,控制砂质土壤区的水肥施用量,利用在适宜施氮量条件下秸秆还田措施兼具减少新指标值和维持周年产量的优势;3)在东北平原,应加强水氮运筹以提高氮利用

率和减少氮淋洗损失。

## 致谢

感谢生态环境部环境规划院郑利杰、中国环境科学研究院熊向艳和青岛农业大学资源与环境学院的周奕廷、卢家森在数据处理中的细致工作。

## 参考文献 References

- [1] 侯彦林,周永娟,李红英,赵慧明. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271-1276  
Hou Y L, Zhou Y J, Li H Y, Zhao H M. Nitrogen non-point field pollution in China: I Regionalization of pollution types and pollution analysis in different provinces[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1271-1276 (in Chinese)
- [2] 王芊,武永峰,罗良国. 基于氮流失控制的种植结构调整与配套生态补偿措施[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 273-280  
Wang Q, Wu Y F, LUO L G. N-Loss-Control-Oriented readjustment of planting structure and its matching ecological compensation measures-A case study of Zhushanwan catchment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 273-280 (in Chinese)
- [3] 胡博,杨颖,王芊,罗良国. 环境友好型农业生态补偿实践进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 7-17  
Hu B, Yang Y, Wang Q, Luo L G. Progress of eco-compensation practice for environmental friendly agriculture [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(1): 7-17 (in Chinese)
- [4] 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]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(4): 471-474 (in Chinese)
- [5] 曹彦龙,李崇明,阚平. 重庆三峡库区面源污染源评价与聚类分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 857-862  
Cao Y L, Li C M, Kan P. Evaluating and clustering analysis of non-point source pollution in Chongqing Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 857-862 (in Chinese)
- [6] 杨林章,冯彦房,施卫明,薛利红,王慎强,宋祥甫,常志州. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101  
Yang L Z, Feng Y F, Shi W M, Xue L H, Wang S Q, Song X F, Chang Z Z. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J].

- Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2013, 21(1): 96-101 (in Chinese)
- [7] 农业农村部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知. (2015-02-17) [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129\\_5923401.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm)
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of Ministry of Agriculture on issuing zero-growth action plan of chemical fertilizer use until 2020 and zero-growth action plan of pesticide use until 2020. (2015-02-17) [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129\\_5923401.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm)
- [8] Zhou M H, Butterbach-Bahl K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scale basis from maize and wheat cropping system[J]. *Plant and Soil*, 201744, 374(1-2): 977-991
- [9] Zhao X, Christianson L E, Harmel D, Pittelkow C M. Assessment of drainage nitrogen loss on a yield-scaled basis [J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 156-166
- [10] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 赵慧明. 中国农田氮面源污染研究: II 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1277-1282
- Hou Y L, Li H Y, Zhou Y J, Zhao H M. Nitrogen non-point field pollution in China: II Establishment of index system for evaluation of pollution degree [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1277-1282 (in Chinese)
- [11] 侯彦林, 赵慧明, 李红英. 中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证: III 估算模型的实证[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1337-1340
- Hou Y L, Zhao H M, Li H Y. Estimation and demonstration of nitrogen non-point pollution in China: III Demonstration of the model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1337-1340 (in Chinese)
- [12] 董蓓蓓, 马淑花, 曹宏斌, 张懿. 我国农田总氮流失影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2040-2045
- Dong B B, Ma S H, Cao H B, Zhang Y. Investigation into the farmland total nitrogen loss in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2040-2045 (in Chinese)
- [13] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 颜晓元. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, 43(1): 19-25
- Hu Y T, Liao Q J H, Wang S W, Yan X Y. Statistical analysis and estimation of N leaching from agricultural fields in China[J]. *Soils*, 2011, 43(1): 19-25 (in Chinese)
- [14] Hou X K, Zhou F, Leip A, Fu B J, Yang H, Chen Y, Gao S S, Shang Z Y, Ma L K. Spatial patterns of nitrogen runoff from Chinese paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 246-254
- [15] 汪玉, 赵旭, 王磊, 程谊, 王慎强. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 829-835
- Wang Y, Zhao X, Wang L, Cheng Y, Wang S Q. Accumulation, environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake Watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 829-835 (in Chinese)
- [16] 杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 颜晓元. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估计[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 319-325
- Yang W X, Xia Y Q, Jiang X S, Yan X Y. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 319-325 (in Chinese)
- [17] Christianson L E, Harmel R D, Smith D, Willims M R, King K. Assessment and synthesis of 50 years of published drainage phosphorus losses [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45: 1467-1477
- [18] 倪雄伟, 梁新强, 田光明, 黄锦法, 石艳平. 施氮量对稻田旱作期硝酸盐渗漏损失和小麦产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(4): 670-675
- Ni X W, Liang X Q, Tian G M, Huang J F, Shi Y P. Effects of different nitrogen fertilizer rates on nitrate leaching characteristics and wheat yield in paddy field in dry period[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(4): 670-675.
- [19] 陆敏. 水旱轮作农田系统氮素循环与水环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007
- Lu M. Nitrogen recycling in rice-wheat rotation farm system and water environment effect [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007 (in Chinese)
- [20] 王桂苓. 巢湖流域麦稻轮作农田养分径流流失特征初步研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009
- Wang G L. Pilot study on nutrient runoff character of wheat-rice rotation field in Chaohu Lake Basin [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [21] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, Xue F, Zhao D. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2012, 146: 103-112
- [22] 陈秋会, 席运官, 王磊, 李妍, 张弛, 田伟, 田然, 肖兴基, 赵克强. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1550-1558
- Chen Q H, Xi Y G, Wang L, Li Y, Zhang C, Tian W, Tian R, Xiao X J, Zhao K Q. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2016, 35(8): 1550-1558 (in Chinese)
- [23] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 李亮, 金熠, 朱春燕, 赵越. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 270-279
- Ye Y S, Liang X Q, Zhou K J, Li L, Jin Y, Zhu C Y, Zhao Y. Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in

- Taihu Lake Region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1): 270-279 (in Chinese)
- [24] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, Xue F, Zhao D. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 49: 93-103
- [25] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, Xing G X, Shi W M, Xu R K, Zhu Z L. Nitrogen balance in highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 76: 1068-1078
- [26] 席运官, 陈瑞冰, 徐欣, 王海, 魏琴, 李菊英. 太湖地区麦季氮磷径流流失规律与控制对策研究[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(5): 106-109
- Xi Y G, Chen R B, Xu X, Wang H, Wei Q, Li J Y. Study on N, P loss through runoff in wheat field of Tai Lake region and counter measures[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(5): 106-109 (in Chinese)
- [27] Wang X Z, Zhu J G, Gao R, Yasukazu H, Feng K. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu Lake Region. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 62-69
- [28] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, Liu J, Gu J T, Guo R, Li L. Alternate wetting and drying irrigation and controlled release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2013(144): 212-224
- [29] 习斌, 翟立梅, 刘申, 刘宏斌, 杨波, 任天志. 有机无机配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326-335
- Xi B, Zhai L M, Liu S, Liu H B, Yang B, Ren T Z. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(2): 326-335 (in Chinese)
- [30] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Pan J R, Christie P. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83: 111-124 (in Chinese)
- [31] 刘微. 小麦-玉米两熟制下土壤硝态氮运移淋失规律及灌水施氮量推荐[D]. 保定: 河北农业大学, 2005
- Liu W. Leaching loss and movement of nitrate in the soil of wheat-corn double cropping system and nitrate fertilizer and irrigation recommendation[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2005 (in Chinese)
- [32] 李周晶. 华北平原不同水肥及栽培模式下的农田氮素损失及水氮利用效率定量评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
- Li Z J. Evaluating nitrogen loss and water and nitrogen use efficiencies in a double cropping system under different integrated managements in the North China Plain[D]. Beijing: China Agriculture University, 2015 (in Chinese)
- [33] 袁京, 李国学, 李荣花, 李宁, 杨帆. 小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 738-744
- Yuan J, Li G X, Li R H, Li N, Yang F. Calculating discharge coefficients for soil nutrients in wheat-maize rotation system under different fertilization practices[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 738-744 (in Chinese)
- [34] Li G H, Zhao L P, Zhang S X, Hosen Y, Yagi K. Recovery and leaching of <sup>15</sup>N-labeled coated urea in a lysimeter system in the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 763-772
- [35] 米慧玲. 不同管理模式下冬小麦夏玉米产量及环境效应的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015
- Mi H L. Effects of different management models on yield and environment cost in the rotation systems of winter wheat and summer maize[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2015 (in Chinese)
- [36] 谭德水, 江丽华, 谭淑樱, 徐钰, 郑福丽, 李国生, 刘兆辉. 湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 128-137
- Tan D S, Jiang L H, Tan S Y, Xu Y, Zheng F L, Li G S, Liu Z H. Effects of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 128-137 (in Chinese)
- [37] Manevski K, Borgeson C D, Li X X, Anderson M N, Zhang X Y, Abrahamsen P, Hu C S, Hanson S. Optimizing crop production and nitrate leaching in China: measured and simulated effects of straw incorporation and nitrogen fertilization[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80: 32-44
- [38] 焉莉. 不同施肥管理对东北玉米连作地农业面源污染影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016
- Yan L. Study on agricultural non-point pollution impact of different fertilization management in maize continuous cropping area in Northeast China[D]. Changchun: Jiling University, 2016 (in Chinese)
- [39] 石敏, 肖伟华, 王春梅, 郝彩莲. 施肥与灌溉对黑土区稻田氮素渗漏淋溶的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 42-49
- Shi M, Xiao W H, Wang C M, Hao C L. Influence of fertilization and irrigation percolation leaching in black soil region[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1): 42-49 (in Chinese)
- [40] Xu X P, He P, Pampolino M F, Li Y Y, Liu S Q, Xie J G, HOU Y P, ZHOU W. Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the Nutrient Expert system for maize in northeast China. *Field Crops Research*, 2016, 194: 75-82
- [41] 金书秦, 邢晓旭. 农业面源污染的趋势研判、政策评述和对策建议[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(3): 593-600
- Jin S Q, Xing X X. Trend analysis, policy evaluation, and recommendations of agricultural non-point source pollution

- [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 593-600 (in Chinese)
- [42] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503-517  
Wang J G, Lin S, Li B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 503-517 (in Chinese)
- [43] 全国农业技术推广服务中心, 中国农科院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究-国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2008  
National Agro-Tech Extension and Service Center (NATESC)/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Study on Arable Land Quality Trend-Summary of National Arable Land Soil Monitoring* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008 (in Chinese)
- [44] Zhang M, Tian Y H, Zhao M, Yin B, Zhu Z L. The assessment of nitrate leaching in a rice-wheat rotation system using an improved agronomic practice aimed to increase rice crop yields [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2017, 241: 100-109
- [45] 张亦涛, 王洪媛, 雷秋良, 张继宗, 翟丽梅, 任天志, 刘宏斌. 农田合理施 N 量的推荐方法[J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 2937-2947  
Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, Zhang J Z, Zhai L M, Ren T Z, Liu H B. Recommended methods of optimal nitrogen application rate. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 2937-2947 (in Chinese)
- [46] 孙宏德, 李军, 尚惠贤, 刘淑环, 刘成祥, 吴国俊, 刘翔. 黑土硝态氮移动规律及提高氮肥利用率的研究[J]. 吉林农业科学, 1995, 4: 61-66  
Sun H D, Li J, Shang H X, Liu S H, Liu C X, Wu G J, Liu X. The research of moving regularity on  $\text{NO}_3\text{-N}$  of Black soil and increasing utilization ratio of nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 1995, 4: 61-66
- [47] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 乔云发. 黑土区水田化肥氮去向的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1859-1862  
Han X Z, Wang S Y, Song C Y, Qiao Y F. Fate of fertilizer nitrogen in paddy field of Black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1859-1862
- [48] Nyle C B, Ray R W. 土壤学与生活[M]. 李保国, 徐建明译. 第十四版. 北京: 科学出版社, 2019: 619  
Nyle C B and Ray R W. *The Nature And Property of Soils* [M]. Li B G, Xu J M, translated. 14th ed. Beijing: Science Press, 2019: 619 (in Chinese)
- [49] 金洁, 杨京平. 从水环境角度探析农田氮素流失及控制对策[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 579-582  
Jin J, Yang J P. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 579-582 (in Chinese)
- [50] 高亚军, 李生秀, 李世清, 田霄鸿, 王朝辉, 郑险峰, 杜建军. 农田秸秆覆盖对农田冬小麦水氮效应的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1450-1454  
Gao Y J, Li S X, Li S Q, Tian X H, Wang Z H, Zheng X F, Du J J. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on winter wheat yield under straw mulch[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1450-1454 (in Chinese)
- [51] 赵鹏, 陈阜. 豫北秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮利用及土壤硝态氮的短期效应[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(4): 19-23  
Zhao P, Chen F. Short-term influences of straw and nitrogen cooperation on nitrogen use and soil nitrate content in North Henan[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(4): 19-23 (in Chinese)
- [52] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 吕丽华, 张雅杰. 华北水氮优化条件下不同种植制度产量、水氮利用及经济效益分析[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(4): 12-18  
Liu M, Tao H B, Wang P, Lü L H, Zhang Y J. Analysis of different cropping systems using optimizing water-nitrogen management on yield, water and nitrogen utilization and economic benefits [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(4): 12-18 (in Chinese)
- [53] 丁武汉, 谢海宽, 徐迟, 戴震, 张婧, 王立刚, 李虎. 一次性施肥技术对水稻-油菜轮作系统氮素淋失特征及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1097-1109  
Ding W H, Xie H K, Xu C, Dai Z, Zhang J, Wang L G, Li H. Impacts of one-off fertilization on nitrogen leaching and economic benefits for rice-rape rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1097-1109 (in Chinese)
- [54] 薛利红, 俞映侠, 杨林章. 太湖流域稻田不同管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1133-1138  
Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133-1138 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东