

刘宏元, 张爱平, 杨世琦, 等. 山东省冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮素盈余指标体系的构建与评价——以德州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1321-1329.

LIU Hong-yuan, ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, et al. Construction and evaluation of a soil nitrogen surplus index system for the wheat maize rotation system in Shandong Province, China: A case study of Dezhou City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1321-1329.

# 山东省冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮素盈余指标体系的构建与评价——以德州市为例

刘宏元, 张爱平, 杨世琦, 邢磊, 杨正礼\*

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

**摘要:**山东省德州市是我国重要的粮食生产基地,大量施用氮肥以及氮素流失是该地氮素污染的重要原因,设定合理的氮素盈余指标体系迫在眉睫。本研究以田间试验研究和文献荟萃为基础,探究德州市冬小麦-夏玉米轮作氮素盈余情况,建立该地氮素盈余指标体系,并运用欧氏距离法对德州市当前氮素管理指标进行评价。结果表明:德州市整个冬小麦-夏玉米轮作体系轮作周期氮素盈余量为 $196.84 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,小麦季氮素盈余量为 $111.07 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,玉米季氮素盈余量为 $85.77 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮素盈余量在 $30 \sim 70 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时为德州市整个轮作周期氮素盈余量推荐值;德州市小麦季氮素盈余量推荐值为 $10 \sim 50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;德州市玉米季氮素盈余量推荐值为 $20 \sim 60 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在氮素的损失方面,氨挥发以及淋洗是氮素损失的主要去向。小麦季的氮素污染程度高,玉米季氮素污染程度相对较低。运用欧氏距离法计算德州市氮素管理水平(A值)为0.63,属于中级管理水平。综上,德州市冬小麦-夏玉米轮作体系农田氮素含量较高,从而导致氮素大量损失。加强氮素管理水平,提高氮素利用率是德州市氮素资源管理的长期任务。

**关键词:**氮素盈余量;指标体系;欧氏距离;冬小麦-夏玉米轮作体系;德州市

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)06-1321-09 doi:10.11654/jaes.2018-1158

## Construction and evaluation of a soil nitrogen surplus index system for the wheat maize rotation system in Shandong Province, China: A case study of Dezhou City

LIU Hong-yuan, ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, XING Lei, YANG Zheng-li\*

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

**Abstract:** The city of Dezhou in Shandong Province is considered an important center for grain production in China. However, the application of nitrogen fertilizer and nitrogen loss are important sources of nitrogen pollution in this area. Therefore, it is important to determine a reasonable nitrogen surplus index system. Based on field experiments and literature reviews, this study explored the nitrogen surplus of the wheat maize rotation system in Dezhou City, and established a nitrogen surplus index system. According to the results, the surplus amount of nitrogen in the entire rotation cycle, wheat season, and maize season was  $196.84 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $111.07 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and  $85.77 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. In addition, the recommended value of nitrogen surplus in the entire rotation period, wheat season, and maize season in Dezhou City was  $30 \sim 70 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $10 \sim 50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and  $20 \sim 60 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Nitrogen fertilizer was the main source of nitrogen input, while ammonia emissions, leaching, and runoff were the main pathways of nitrogen loss. Nitrogen pollution was serious in the

收稿日期:2018-09-09 录用日期:2018-12-19

作者简介:刘宏元(1992—),男,河北唐山人,博士研究生,主要从事农业面源污染研究。E-mail:769682570@qq.com

\*通信作者:杨正礼 E-mail:yangzli426@126.com

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503106);国家自然科学基金项目(31601834)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (201503106); The National Natural Science Foundation of China (31601834)

wheat season and relatively light in the maize season, and furthermore, nitrogen loss during the entire rotation cycle was serious. The evaluation theory of Euclidean distance accurately calculated the level of N management in Dezhou City with a score of 0.63, which corresponds to a middle level of N management. In summary, this study analyzed the nitrogen surplus situation and established an initial index system of nitrogen surplus in Dezhou City, which also provided the basis for recommending a scientific and reasonable nitrogen management system.

**Keywords:** nitrogen surplus; index system; Euclidean distance; wheat maize rotation system; Dezhou City

农业生产中,氮肥的投入极大提高了粮食产量,有资料表明因氮肥投入而增产的作物养育的人口数量超过了35亿<sup>[1-2]</sup>。同时,氮肥的大量施用也导致了严重的环境问题,如水体富营养化、土壤酸化、 $N_2O$ 和 $NH_3$ 排放增加等<sup>[3-6]</sup>。山东省是我国小麦和玉米的生产大省,根据2017年山东省统计年鉴,化肥单位面积平均用量达到 $466.54 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而德州市农户的氮肥平均施用量已经高达 $591 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,远高于发达国家为防止化肥对水体造成污染而设置的 $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的安全上限<sup>[7]</sup>。第一次全国污染源普查结果显示,山东省种植业源污染物排放占全国农业源比例接近10%。因此,在保证粮食作物产量的前提下,科学施用氮肥已经成为山东省农业相关部门亟待解决的问题。

合理的施氮量是科学施肥最为重要的内容<sup>[8]</sup>,而根据最佳氮素盈余量可以推导出合理的施氮量范围<sup>[9-10]</sup>。农田氮素盈余是氮素管理中的重要指标,是评价氮素投入生产力、环境影响和土壤肥力变化的最佳指标<sup>[11]</sup>。某一生产单位合理的氮素盈余量实质上就是氮素损失后该生产单位可以自身建立起循环且不导致大气、土体和水体污染的氮素含量<sup>[9]</sup>。近年来,已有的氮素盈余参考值往往是华北地区、长江中下游地区等大尺度区域下得出的笼统结果<sup>[10]</sup>,如在巨晓棠等<sup>[9]</sup>文章中,综述了华北地区氮素损失与氮素盈余情况,提出华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系下氮素盈余量推荐值为 $80 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。氮素盈余值由于尺度不同、区域不同,其值往往也有很大的差异。因此,针对某一具体的小尺度区域,系统性的研究农田氮素盈余,根据盈余量参考指标体系进行优化施肥,对当地农田氮素优化管理十分重要。另外,氮素损失量是评估氮素扩散到环境中的重要指标<sup>[11]</sup>,并结合氮素盈余量,根据二者的关系建立氮素污染指标体系可以有效地评价农田污染情况。但因土壤存在较大的空间变异性,氮素分布和流失受诸多因素影响,找到可以把复杂的因素简单化的评价方法非常关键,欧氏距离法在评价农业可持续发展的许多研究中被应用<sup>[12]</sup>,并且评价结果符合实际情况,本文在其基础

上进行改进,构建了氮素管理指标评价方法,可以直观地表现德州市氮素管理水平。

结合文献荟萃和长期定位试验,本文研究了山东省德州市冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮素盈余指标体系的构建与评价方法,旨在建立该地区合理的氮盈余指标体系和评价方法,指出德州市氮素管理存在的问题并给出相应的建议,为该地技术的推广和应用政策的制定提供科学依据,也为其他小尺度区域研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

本研究以华北地区德州市为研究区域,研究该地区冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮素平衡与循环。德州市位于山东省西北部的黄河下游冲积平原,粮食作物以小麦、玉米为主。本文数据多来自于课题组在山东省德州市平原县黄河涯镇德州现代农业科技示范园的试验数据,进而更好地解析冬小麦-夏玉米轮作体系典型农田氮素盈余状况,更新氮素盈余指标相关数据,为以后研究提供参考。本试验平台所采取的种植方式、氮肥管理方式等与德州市农户所采取的措施一致,且德州市土壤肥力主要为中产土壤,整个德州市全氮含量标准误差和碱解氮标准误差均较低,分别为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,因此具有一定代表性,对德州市的施氮现状和土壤氮素平衡研究有重要的参考意义。试验地土壤类型为砂壤土,pH值为8.54,碱解氮为 $26.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,年平均降水量 $547.50 \text{ mm}$ ,主要集中在6—8月。

### 1.2 试验设计

本试验共设5个施氮水平,分别以CK(常规施肥: $570 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、N0(未施肥: $0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、N1(减量10%: $514 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )、N2(减量20%: $456 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和N3(减量30%: $400 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )来表示,其中小麦季施氮量分别为315、0、284、252、221  $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (分基肥和追肥两次施入,比例为1:1),玉米季施氮量分别为255、0、230、204、179  $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各处理磷钾肥用量为:玉米季( $P_2O_5$ ,  $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O$

60 kg·hm<sup>-2</sup>)和小麦季(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 270 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 0 kg·hm<sup>-2</sup>)。为防止试验小区之间侧渗和串流,各个试验小区用预制板隔离,地下埋深60 cm,田埂包高20 cm。试验所选用的玉米品种为鲁宁184,小麦品种为鲁宁22。试验地的其他农作管理措施如除草、病虫害防治等与当地常规管理措施一致。

### 1.3 研究方法

本研究以农田土壤为研究界面,研究华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系上的氮素平衡。氮素盈余量公式为

$$A=I_{\text{Total}}-O_{\text{Total}} \quad (1)$$

式中, $A$ 表示氮素每年在土壤中的氮素盈余量; $I_{\text{Total}}$ 表示输入总量; $O_{\text{Total}}$ 表示输出总量。三者的单位均为kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

$I_{\text{Total}}$ 为各输入项之和,公式为

$$I_{\text{Total}}=I_f+I_{\text{st}}+I_{\text{sc}}+I_i+I_a \quad (2)$$

式中: $I_f$ 为氮肥输入氮量; $I_{\text{st}}$ 为秸秆还田输入氮量; $I_{\text{sc}}$ 为种子输入氮量; $I_i$ 为灌溉水输入氮量; $I_a$ 为大气沉降输入氮量。上述5项参数的单位均为kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

$O_{\text{Total}}$ 为各损失项之和,公式为

$$O_{\text{Total}}=O_g+O_{\text{st}}+O_r \quad (3)$$

式中: $O_g$ 为小麦玉米籽粒吸氮量; $O_{\text{st}}$ 为小麦玉米秸秆吸氮量; $O_r$ 为损失氮量。上述3项参数的单位均为kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

氮输入项和输出项数据具体来源和算法:

#### (1) 氮输入项

氮肥施用量的数据为课题组在试验田实际施用量;

秸秆还田带氮=秸秆产量×秸秆还田率×秸秆氮含量

式中秸秆产量为田间实测产量;

灌溉带氮=整个轮作周期灌溉量×灌溉水氮含量;

种子带氮=播种量×作物籽粒氮含量;

干湿沉降来自文献汇总结果。

#### (2) 氮输出项

籽粒移出氮=作物籽粒产量×籽粒携出氮量;

秸秆移出氮=秸秆产量×秸秆氮含量;

损失氮包括地表径流、淋洗、氨挥发和N<sub>2</sub>O排放,其数据为田间实测数据。

在本试验条件下,输入项中,干湿沉降数据是根据2010—2017年已发表的关于华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系下沉降的文章汇总分析的结果;非共生

固氮数据参考赵荣芳等<sup>[14]</sup>;种子含氮量为田间实际播种量乘以种子含氮量;灌溉水中氮含量为灌溉水量乘以其含氮量(采集水样分析测定其氮含量)。输出项中,作物吸收氮量和氨挥发、N<sub>2</sub>O排放以及淋洗、径流等损失氮量均为田间实测数据。作物收获时每个监测点收获2 m×3 m=6 m<sup>2</sup>的样方进行籽粒和秸秆测产,采集样品利用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮、蒸馏定氮方法测定籽粒和秸秆含氮量;氨挥发是采用通气法进行捕获,具体采集操作和计算方法见文献[15-16];N<sub>2</sub>O排放采用静态箱法进行采集,采集的气样利用气相色谱(Agilent7890, USA)测定,方法详见陈哲等<sup>[17]</sup>;收集淋洗和径流的水样并测定水量和水样含氮量进而计算淋洗和径流氮素损失量。

### 1.4 氮素管理水平的评价方法

为了更加直观表现德州市氮素管理存在的问题及今后改进方向,我们采用基于欧氏距离的评价方法对其氮素管理指标进行评价。首先是建立目标系统(The goal system),在本研究中,我们参考巨晓棠等<sup>[9-10]</sup>的各指标参考值作为目标系统,这一系统就是未来氮素盈余指标的方向。目标系统就是该系统评价的标尺,一个系统现阶段的状态与目标系统之间的差距就可以衡量该系统的发展状态,用 $D$ 表示,如公式(4)所示:

$$D=|f_i-F| \quad (4)$$

式中: $D$ 代表系统与目标系统的距离, $f_i$ 代表任一系统, $F$ 代表目标系统。此外,引入最差状态系统,是目标系统的完全对立面,所有指标均为最差,基于此,将这些取值称之为零系统(The zero system)。通常,零系统的取值为0,但对于氮素损失量(氨挥发、N<sub>2</sub>O排放和淋洗)的目标系统是0,这样对应的零系统取值就不能为0,要根据情况设定合理的零系统。这样一来,被评价系统的所有指标均处于零系统与目标系统之间,进而方便进行欧氏距离运算。

引入欧氏距离(Euclidean distance)的概念,用 $d_{ic}$ 来代表被评价系统与目标系统的加权欧氏距离,如公式(5)所示:

$$d_{ic}=\sqrt{\sum_{i,k=1}^{m,n}\left(\frac{X_{ik}-X_{ck}}{S_k}\right)^2} \quad (5)$$

式中: $X_{ik}$ 代表被评价系统的第 $k$ 个评价指标, $X_{ck}$ 代表目标系统的第 $k$ 个评价指标值。 $S_k$ 代表第 $k$ 个指标值的标准差。由于上述所说的 $X_{ik}$ 和 $X_{ck}$ 数据数值量纲不同,因此需要将其标准化,如公式(6)所示:

$$X_{it} = \frac{x - m}{S} \quad (6)$$

式中: $x$ 代表原始值, $m$ 代表均值, $S$ 代表标准差。如果施肥量等指标超出区间范围的情况,将按公式(7)处理:

$$Y = 2A - X \quad (7)$$

式中: $Y$ 代表变换后的值; $A$ 代表目标系统的指标参考值; $X$ 代表被评价系统指标值。如果转换后结果为负值,那么 $Y$ 直接取值0(认为评价指标值过高,导致对被评价系统影响效果为负)。由此,可以建立氮素管理指标评价计算公式,公式如(8)所示。

$$A = 1 - \frac{d_{ic}}{d_{zc}} \quad (8)$$

式中: $A$ 代表氮素管理水平; $d_{ic}$ 代表被评价系统与目标系统的距离; $d_{zc}$ 代表零系统与目标系统的距离,即最大距离。 $A$ 值处在 $[0, 1]$ ,这样可以符合通常的认知习惯, $A$ 值越大,氮素管理水平越接近理论目标状态,即氮素各管理指标越好。 $0 < A < 0.60$ 表示低级氮素管理水平, $0.60 \leq A < 0.80$ 表示中级氮素管理水平, $0.80 \leq A \leq 1$ 表示高级氮素管理水平。

### 1.5 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2003 进行数据整理和图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 德州市全年和各季氮素盈余量

全年、冬小麦季和夏玉米季氮素盈余表见表1和

表2。在整个冬小麦-夏玉米轮作周期中,由于秸秆还田,秸秆氮素输入和输出项相等,因此表1中省略了输入项中的秸秆输入氮量和输出项中的秸秆吸收氮量。从结果中可以看出,冬小麦-夏玉米轮作农田氮素输入主要来源于化肥投入;而氨挥发和氮素淋洗是重要的氮素损失去向。通过降低化肥施用量,均不同程度地降低了氮素损失量。从表2可以发现,各处理的化肥氮投入量基本满足作物生长籽粒和秸秆所需。除化肥氮的投入,还有干湿沉降、非共生固氮、秸秆还田等其他氮素投入方式,这就造成了土壤氮素盈余,加大了环境污染风险。过量的氮肥施用是对资源的一种浪费,未来要合理引导农户适当施肥,以此实现在保证不减产的情况下优化施肥的目标。而在输出项中,氨挥发和淋洗是氮素损失的主要途径,尤其CK处理,两项输出项占其总氮素输出的31.60%。因此,如何有效降低氨挥发和减少氮素淋洗是该地氮素管理的重要难题。

### 2.2 德州市氮素管理水平的评价

德州市是华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系下典型农田区域,对德州市氮素管理水平进行评价,有利于发现德州市氮素管理存在的问题以及今后改进的方向,使之实现优化施氮的目标。同时,本评价结果也可以为山东省或者其他区域的冬小麦-夏玉米轮作体系氮素管理提供借鉴和参考。参考杨世琦等<sup>[12]</sup>文章建立目标系统的指标参考值,具体见表3。由于各处理输入项中干湿沉降、种子、灌溉、非共生固氮和秸秆等带入的氮素一致,且为了清晰易懂,本评

表1 德州市冬小麦-夏玉米轮作体系下氮素盈余量(kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

Table 1 Nitrogen budget of winter-wheat/summer maize in Dezhou(kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

处理 Treatments	CK	N0	N1	N2	N3
氮素输入项 N input					
化肥 N fertilizer	570.00	0.00	514.00	456.00	400.00
干湿沉降 N deposition	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
非共生固氮 Non-symbiotic	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
种子 Seed	7.10	7.10	7.10	7.10	7.10
灌溉 Irrigation	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
总输入 Input	635.10	65.10	579.10	521.10	465.10
氮素输出项 N output					
籽粒吸收 Grain	227.61	123.67	244.72	238.24	253.13
氨挥发 NH <sub>3</sub> emission	96.71	54.48	80.34	90.56	114.89
N <sub>2</sub> O排放 N <sub>2</sub> O emission	9.94	1.06	8.15	5.31	3.09
氮素淋洗 N leaching	104	7.69	85.56	49.61	25.91
总输出 Output	438.26	186.90	418.77	383.72	397.02
氮素盈余量 N surplus	196.84	-121.80	160.33	137.38	68.08
氮素损失量 N loss	210.65	63.23	174.05	145.48	143.89
氮肥有效率 Fertilizer availability ratio	63.04%	—	66.14%	68.10%	64.03%

表2 德州市小麦季和玉米季氮素盈余量(kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)Table 2 Nitrogen budget of wheat and maize in Dezhou(kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

处理 Treatments		小麦季					玉米季				
		CK	N0	N1	N2	N3	CK	N0	N1	N2	N3
氮素输入项 N input	化肥 N fertilizer	315.00	0	284	252.00	221.00	255.00	0	230.00	204.00	179.00
	干湿沉降 N deposition	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
	非共生固氮 Non-symbiotic	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	种子 Seed	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
	玉米秸秆 Maize straw	145.93	112.22	162.67	168.17	153.30	179.60	129.97	227.20	225.51	168.80
	灌溉 Irrigation	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
	总输入 Input	493.43	144.72	479.17	452.67	406.80	467.20	162.57	489.80	462.11	380.40
氮素输出项 N output	籽粒吸收 Grain	82.39	57.45	86.14	79.95	87.03	145.22	66.22	158.58	158.29	166.10
	秸秆吸收 Straw	179.60	129.97	227.20	225.51	168.80	145.93	112.22	162.67	168.17	153.30
	氨挥发 NH <sub>3</sub> emission	55.26	31.13	45.91	51.75	82.79	41.45	23.35	34.43	38.81	32.10
	N <sub>2</sub> O排放 N <sub>2</sub> O emission	5.68	0.64	4.57	2.86	1.71	4.26	0.42	3.58	2.48	1.38
	氮素淋洗 N leaching	59.43	4.57	49.14	29.14	13.14	44.57	3.12	36.42	20.47	12.77
	总输出 Output	382.36	233.76	412.96	389.21	353.47	381.43	205.33	395.68	388.19	365.65
	氮素盈余量 N surplus	111.07	-79.04	66.21	63.46	53.33	85.77	-104.74	93.83	72.84	17.75
氮素损失量 N loss	120.37	36.34	99.62	83.75	97.64	90.28	26.89	74.43	61.73	46.25	
氮肥有效率 Fertilizer availability ratio	61.79%	—	64.92%	66.77%	55.82%	64.60%	—	67.64%	69.74%	74.16%	

价体系将氮素输入项中的干湿沉降、非共生固氮、种子和灌溉等投入的氮统一为一个整体,即其他氮素总输入。通过1.4的评价方法得出德州市氮素管理水平,结果见图1。N0处理虽然A值较高,但其原因主要是氮素损失量较低。虽然N0处理可以减少氮素损失、增强土壤保护能力,但由于其作物吸氮量也非常低,在实际中不能推广应用。因此,本研究仅将N0处理作为参考,不与其他处理共同分析。由图1可知,德州市农户常规施肥(CK)处理的A值最低,氮肥减量10%~30%(N1、N2和N3)处理的A值略有增加,但与CK处理一样,均属于中级氮素管理水平。这意味

着德州市常规氮素管理水平较低,存在问题较多,不能仅依靠减少化肥施用量来实现优化施肥的目的。为了进一步分析德州市当前氮素管理存在的问题,采用雷达图的方法直观地分析CK处理与零系统和目标系统各指标之间的距离,进而发现其存在的问题。结果(图2)显示,氨挥发量、N<sub>2</sub>O排放量和氮素淋洗量极高对CK处理的A值呈负贡献,也是导致其A值较低的主要原因,即氮素损失是导致A值较低的主要原因。而氮肥施用量、其他氮素总输入和籽粒吸收等处于中间水平,可以有计划地改善这些指标。德州市未来氮素施用主要关注点为减少氮素损失,目前可以通

表3 评价系统指标框架和目标系统参考值

Table 3 The frame of index and the reference values of the goal system

编号 No.	指标 Index	目标系统的指标参考值 The reference value of the target system/kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>
1	氮肥施用量 N fertilizer	350 <sup>[12]</sup>
2	其他氮素总输入 N other	80 <sup>[12]</sup>
3	籽粒吸收 Grain	361 <sup>[12]</sup>
4	氨挥发 NH <sub>3</sub> emission	0
5	N <sub>2</sub> O排放 N <sub>2</sub> O emission	0
6	淋洗 Leaching	0
7	氮肥有效率 Fertilizer availability ratio	90% <sup>[12]</sup>

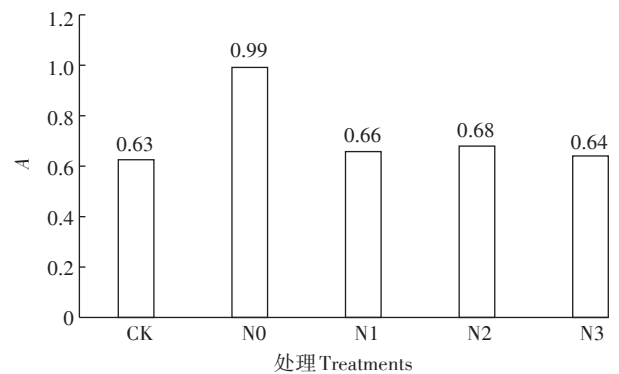


图1 德州市氮素管理指标评价结果

Figure 1 The evaluation results of nitrogen management index in Dezhou

过施用新型缓释肥料、配施有机肥和推广测土平衡施肥技术等方法来解决。

### 2.3 德州市土壤氮素盈余指标体系的构建

基于上述研究结果,分别探讨全年、冬小麦季和夏玉米季的施氮量、氮素盈余量与氮素损失量(包括氨挥发、N<sub>2</sub>O排放、淋洗和径流)的关系,以便建立合理的氮素盈余指标体系。图3表示的是整个轮作周期施氮量与氮素盈余量及氮素损失量之间的关系,通过关系式可知:当盈余量为50 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>时,施氮量为352.87 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,且此时氮素损失量为112.74 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,对环境危害较小,因此当氮素盈余量为30~70 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>时为德州市氮素盈余推荐值。根据三者之间的关系,建立德州市冬小麦-夏玉米轮作体系下氮素盈余指标体系(见表4)。

计算出整个轮作周期氮素盈余体系,进一步可以计算各单季对应的结果。图4表示冬小麦季施氮量与氮素盈余量和氮素损失量之间的关系。当氮素盈余量为30 kg N·hm<sup>-2</sup>时,对应的施氮量为195.83 kg

N·hm<sup>-2</sup>,此时损失量为76.25 kg N·hm<sup>-2</sup>,对环境危害较小。因此将30 kg N·hm<sup>-2</sup>设置为冬小麦季氮素盈余量推荐值,氮素盈余量在10~50 kg N·hm<sup>-2</sup>范围内即为合理。同样的,依据不同盈余量的施氮量和氮素损失量所造成的污染程度设置5个等级,分别为极低、低、合理、高和极高,提出相应的管理建议(见表4)。

与冬小麦季相同,图5表示夏玉米季施氮量与氮

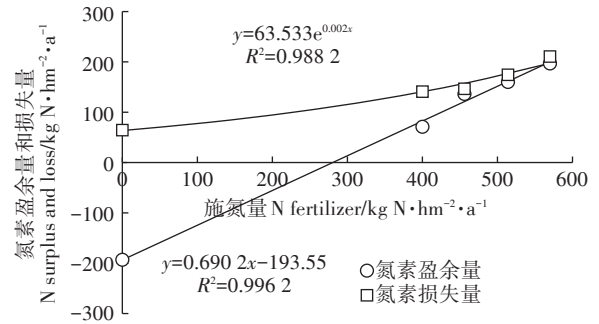


图3 冬小麦-夏玉米轮作体系下施氮量、盈余量和损失量的关系图

Figure 3 Relationship between nitrogen application and surplus and loss of wheat-maize rotation system

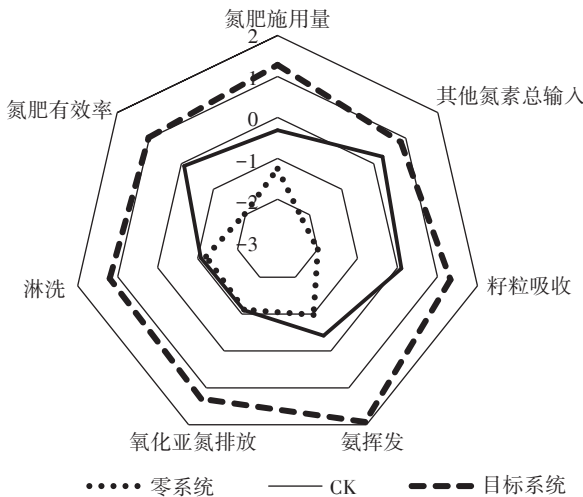


图2 CK处理分析雷达图

Figure 2 The radar of the analysis of the CK treatment

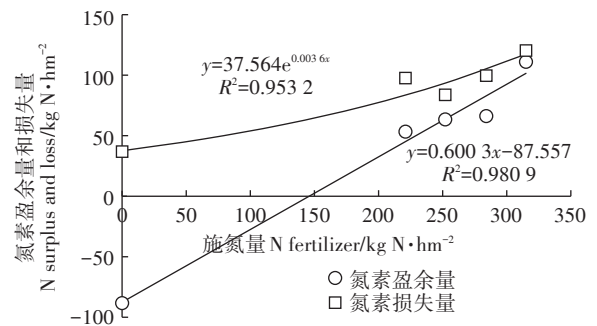


图4 冬小麦季施氮量、盈余量和损失量的关系图

Figure 4 Relationship between nitrogen application and surplus and loss of wheat

表4 冬小麦-夏玉米轮作氮素污染评价管理建议

Table 4 Suggestions on management of nitrogen pollution in wheat and maize

氮素盈余量 N surplus/kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>			最佳施氮量	污染级别	管理建议
全年	冬小麦季	夏玉米季	N fertilizer/kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	Pollution level	Management recommendation
<-10	<-30	<-20	全年:320~380	极低	损耗土壤氮素,需及时补充氮肥
≥-10且<30	≥-30且<10	≥-20且<20	冬小麦季:160~210 夏玉米季:160~210	低	损耗土壤氮素,需适量补充氮肥
≥30且<70	≥10且<50	≥20且<60		合理	推荐氮素盈余量范围
≥70且<110	≥50且<90	≥60且<100		高	氮素较多,对环境有潜在风险,减少氮肥
≥110	≥90	≥100		极高	氮素过多,对环境有不利影响,需合理控制氮素施用

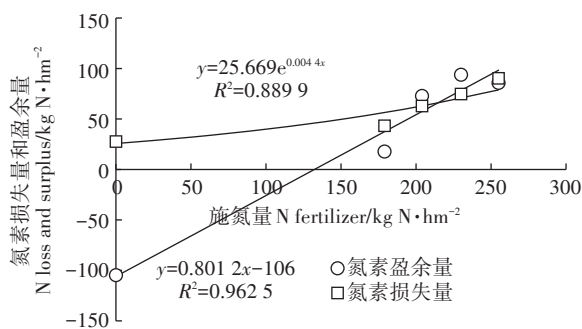


图5 夏玉米季施氮量、盈余量和损失量的关系图

Figure 5 Relationship between nitrogen application and surplus and loss of maize

素盈余量和氮素损失量之间的关系。当氮素盈余量为  $40 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,对应的施氮量为  $182.22 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,此时氮素损失量为  $57.08 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,对环境危害小。因此将  $40 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  设置为夏玉米季的氮素盈余量推荐值,氮素盈余量在  $20 \sim 60 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  范围内即为合理。同样的,依据不同氮素盈余量所对应的施氮量和氮素损失量所造成的污染程度设置5个等级,分别为极低、低、合理、高和极高,提出相应的管理建议(表4)。

### 3 讨论

土壤氮素平衡包括氮素进入土壤、从土壤中的损失及土壤氮库的变化,可以反映各种氮素损失途径及土壤氮素盈亏。过去的研究中,只是考虑了生育期有机氮的矿化量,而未考虑到无机氮的固持量,这样得出的结果是不完全的<sup>[18]</sup>。因此,本研究补充了无机氮固持量的内容,进而得出更加准确的结果。当氮素盈余量为  $50 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时,所对应的氮素损失量也较小,施氮量为  $352.87 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,此时与巨晓棠等<sup>[9]</sup>推算的华北地区全年合理施氮量( $350 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )一致,因此当氮素盈余量为  $30 \sim 70 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时,为德州市氮素盈余量推荐值,这一推荐值略低于郭婧妤<sup>[19]</sup>推荐的  $60 \sim 100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,主要原因是德州市长期高氮量施用导致土壤氮素含量本身较高且德州市氨挥发强度显著高于华北地区平均值<sup>[20]</sup>,氮素损失量较大。因此,德州市当前的氮素盈余量推荐值应略低于华北地区平均值。在小麦季时,当盈余量为  $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,对应的施氮量为  $195.83 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这一结果与巨晓棠<sup>[21]</sup>推算的华北冬小麦季氮肥推荐量( $196 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ )一致,符合现状条件下农田耕作措施的合理施肥量。在夏玉米季时,当盈余量为  $40 \text{ kg}$

$\text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,对应的施氮量为  $182.22 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这一结果与吴良泉等<sup>[22]</sup>推荐华北地区夏玉米季氮肥施用量  $178 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  一致。为了实现上述目标,德州市冬小麦-夏玉米轮作农田未来施肥方案应按季所需,适当降低氮肥施用量,在保证补充土壤氮库的同时,减少氮素资源浪费,以实现土壤氮素达到相对理想的平衡状态。

利用欧氏距离法对德州市氮素管理水平进行评价,发现常规处理(CK处理)未达到高级氮素管理水平,这主要是由于其极高的氮素损失尤其是氨挥发导致的,而且氮肥减量  $10\% \sim 30\%$  处理的A值依然处于中级氮素管理水平,这说明仅仅依靠减氮的方法不能够根本解决氮素施用存在的问题。CK处理全年氨挥发达到  $96.71 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,这与许多研究一致<sup>[23-25]</sup>,氨挥发主要集中于作物生长的前期,这主要是由于较大的氮源输入,使得氨挥发速率增加<sup>[26]</sup>。另外,7月初至9月初土壤温度和湿度较高,也会促进土壤的氨挥发<sup>[27]</sup>。另一方面,CK处理的氮肥投入已经达到了作物所需氮素含量,同时补充的其他氮素输入,极大地增加了氮素损失的风险。未来,德州市农户应从减少氮肥施用量和应用缓释肥等新型肥料减少氮素损失以及提高氮素利用率等多方面入手,即从源头减少氮素损失,提高氮素利用率,缓解氮素流失风险。此外,农作管理措施中要注意降低灌溉量,特别是避免一次性大量灌溉,以减少氮素淋失。运用本评价方法,可以直观地看出当前氮素管理水平与目标管理存在的差距,便于农户理解以及地方政府推广一些惠农政策;且本评价方法与其他评价方法相比,最大的优势在于其避免了指标权重分配和专家打分主观因素的影响<sup>[28-29]</sup>,降低了人为主观因素的影响。

综合来说,针对德州市氮素管理面临的问题,给出以下建议:第一,根据氮素盈余指标体系,减少氮肥投入量,建议在冬小麦-夏玉米轮作体系下全年施氮量在  $320 \sim 380 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中小麦季和玉米季均为  $160 \sim 210 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,小麦季和玉米季可以根据情况适当调整,但全年总量不宜超过  $380 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的上限。第二,可以使用缓释肥料等新型肥料,以此减少氮素短时间内的大量损失。第三,合理的施肥方法与施肥时期,注重深施、基肥与追肥的配合等以达到减少氮素损失的目的。第四,依靠科技手段减少氮素损失,提高氮肥利用率,如选择合适的肥料品种、有机肥与无机肥配施等方式,减少氮肥在施用前期的

大量损失。第五,注意改善农作管理措施,如避免一次性大量灌溉等等。

#### 4 结论

(1)德州市冬小麦-夏玉米轮作体系整个周期氮素盈余量推荐值为30~70 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;德州市冬小麦季氮素盈余量推荐值为10~50 kg N·hm<sup>-2</sup>;德州市夏玉米季氮素盈余量推荐值为20~60 kg N·hm<sup>-2</sup>。建议德州市冬小麦-夏玉米轮作体系下全年施氮量在320~380 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

(2)在本研究中,氮肥是氮素输入的主要来源,而氨挥发以及淋洗是氮素输出的主要去向。冬小麦季的氮素污染程度高,夏玉米季氮素污染程度相对较低,综合整个轮作周期氮素损失量较大,应特别注意冬小麦季的氮素管理。

(3)运用欧氏距离法分析出德州市氮素管理水平与理论目标值存在的差距,德州市氮素管理水平(A值)为0.63,属于中级偏低氮素管理水平,造成各处理A值较低的原因主要是高氨挥发量、高施氮量和高淋洗量等。德州市未来应采取控制氮肥施用量、科学施氮、施用新型肥料和改善粗放农作管理措施等方法。

#### 参考文献:

- 康丽敏. 氮素供应对几种粮食作物蛋白质含量、产量的影响[J]. 现代农业, 2013, 6: 35.  
KANG Li-min. Effects of nitrogen supply on protein content and yield of several kinds of grain crops[J]. *Modern Agriculture*, 2013, 6: 35.
- Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636-639.
- Hoben J P, Gehr R J, Millar N, et al. Nonlinear nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1140-1152.
- Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- Williams A G, Audsley E, Sandars D L. Environmental burdens of producing bread wheat, oilseed rape and potatoes in England and Wales using simulation and system modelling[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(8): 855-868.
- Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196-2210.
- 白由路. 国内外耕地培育的差异与思考[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1381-1388.  
BAI You-lu. Overview of rural land nurtures in China and abroad[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1381-1388.
- Zhang A, Gao J, Liu R, et al. Nursery-box total fertilization technology (NBTF) application for increasing nitrogen use efficiency in Chinese irrigated riceland: N-soil interactions[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(4): 1255-1265.
- 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.  
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281-296.
- 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(4): 783-795.  
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Status, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014(4): 783-795.
- Ju X, Xing G, Chen X, et al. From the cover: Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- 杨世琦. 基于欧氏距离的农业可持续发展评价理论构建与实例验证[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3840-3848.  
YANG Shi-qi. A case study of a novel sustainable agricultural development evaluation method based on Euclidean distance theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3840-3848.
- 李怀军, 刘忠海, 曲善功, 等. 德州市土壤肥力变化及分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(13): 134-137.  
LI Huai-jun, LIU Zhong-hai, QU Shan-gong, et al. Dezhou soil fertility change and analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(13): 134-137.
- 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697.  
ZHAO Rong-fang, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. Nitrogen cycling and balance in winter wheat summer maize rotation system in North China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684-697.
- 万合锋. 猪粪堆肥及其在蔬菜地利用全过程中温室气体(N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)和NH<sub>3</sub>排放特征研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.  
WAN He-feng. Research on the emission characteristics of greenhouse gas (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) and NH<sub>3</sub> through the whole process of pig manure compost and its vegetable land use[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定-通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.  
WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205-209.
- 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O通量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 387-395.  
CHEN Zhe, HAN Rui-yun, YANG Shi-qi, et al. Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 387-395.
- Cui Z, Chen X, Miao Y, et al. On-farm evaluation of the improved soil N-based nitrogen management for summer maize in North China Plain [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(100): 517-525.



- [19] 郭婧妤. 华北平原农田氮素污染评价方法及指标研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
GUO Jing-yu. Study on evaluation method and index of nitrogen pollution in North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [20] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2347-2350.  
SUN Ke-jun, MAO Xiao-yun, LU Qi-ming, et al. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2347-2350.
- [21] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261.  
JU Xiao-tang. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR) discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261.
- [22] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817.  
WU Liang-quan, WU Liang, CUI Zhen-ling, et al. Study on recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer and fertilizer formula for maize in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 802-817.
- [23] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1115-1121.  
DONG Wen-xu, WU Dian-ming, HU Chun-sheng, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1115-1121.
- [24] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 76-81.  
LI Gui-tong, LI Bao-guo, CHEN De-li. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(1): 76-81.
- [25] Wang X, Xu S, Wu S, et al. Effect of trichoderma viride, biofertilizer on ammonia volatilization from an alkaline soil in Northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 66: 199.
- [26] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893-900.  
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 893-900.
- [27] Xu J G, Heeraman D A, Wang Y. Fertilizer and temperature effects on urea hydrolysis in undisturbed soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1993, 16(1): 63-65.
- [28] Yang S Q, Mei X R. A sustainable agricultural development assessment method and a case study in China based on Euclidean distance theory[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 551-557.
- [29] 杨世琦, 邢磊, 刘宏元, 等. 基于欧氏距离理论的农业可持续发展评价方法与实证研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(12): 157-164.  
YANG Shi-qi, XING Lei, LIU Hong-yuan, et al. Sustainable development of agriculture based on Euclidean distance theory evaluation method and case study[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(12): 157-164.