

# 江淮丘陵区不同氮肥管理模式稻田氨挥发损失特征研究

郭刚<sup>1</sup>, 袁嫚嫚<sup>1</sup>, 曹哲伟<sup>1</sup>, 张兆冬<sup>2</sup>, 王莉莉<sup>2</sup>, 孙义祥<sup>1</sup>

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 安徽省定远县土壤肥料工作站, 安徽 定远 233200)

**摘要:** 为了探索减少江淮丘陵区稻田氨挥发损失和提高其氮肥利用率的途径, 采用密闭室连续抽取法, 研究了不同氮肥管理模式对稻田氨挥发损失特征和氮肥利用率的影响。结果表明, 整个稻季, 氨挥发损失率以分蘖肥期最高, 基肥期次之, 穗肥期最低。较常规施肥(CN), 缓释尿素与普通尿素配施(CRU)处理稻季氨挥发损失总量和损失率分别降低了 26.23% 和 4.52%, 氮肥利用率提高了 6.07%; 各施肥处理的氨挥发量与同期田面水中的铵态氮浓度呈线性正相关。综合分析, 缓释尿素与普通尿素配施既能减少氨挥发损失, 又能获得较高的经济效益, 在江淮丘陵区具有推广应用价值。

**关键词:** 江淮丘陵; 稻田; 缓释尿素; 氨挥发

**中图分类号:** S143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)04-0285-04

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.045

## Study on the Ammonia Volatilization Under Different Nitrogen Schemes from Paddy Field in Jianghuai Hilly Region

WU Gang<sup>1</sup>, YUAN Manman<sup>1</sup>, CAO Zhewei<sup>1</sup>, ZHANG Zhaodong<sup>2</sup>, WANG Lili<sup>2</sup>, SUN Yixiang<sup>1</sup>

(1. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. Soil and Fertilizer Station of Dingyuan County, Dingyuan, Anhui 233200)

**Abstract:** Ammonia volatilization was a major path of nitrogen losses in Paddy field. In order to evaluate the effects of different nitrogen schemes on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency from paddy field in Jianghuai hilly region, a field experiment by the closed airflow chamber method was conducted. The results showed that the ammonia volatilization loss ratio was the highest at tillering stage, followed by basal stage, finally heading stage. Compared with the conventional fertilization, the ammonia volatilization loss amount and ratio under the application of slow-release urea combined with common urea were decreased by 26.23% and 4.52%, respectively, while the nitrogen use efficiency increased by 6.07%. Ammonia volatilization loss was positive correlated with ammonium nitrogen concentration on the surface water. Therefore, the application of slow-release urea combined with common urea can not only reduce ammonia volatilization loss, but also obtain higher economic benefit, which is suitable to be recommended in Jianghuai hilly region.

**Keywords:** Jianghuai hilly region; paddy field; slow-release urea; ammonia volatilization

化学氮肥的施用对农业生产的发展有巨大的贡献。据联合国粮农组织(FAO)的统计,世界粮食产量的增加约有 50% 归功于化学肥料的施用,尤其以化学氮肥的贡献最为显著<sup>[1]</sup>。但是作物对化学氮肥的利用率普遍较低,据统计我国主要粮食作物化肥氮素的利用效率只有 26.1%~28.3%<sup>[2]</sup>。大部分氮素以气态和液态等形式进入到大气和水环境,损失的氮素不仅导致肥料和能源的浪费,对环境也造成严重的污染<sup>[3]</sup>。在我国,氨挥发是稻田氮素损失的主要途径之一,有研究报道

稻田系统中氨挥发损失可达总施氮量的 9%~40%<sup>[4-6]</sup>。安徽江淮丘陵区的耕地为 171.1 万 hm<sup>2</sup>, 占全省耕地总面积的 31.6%, 在全省水稻生产中占有举足轻重的地位。该区域水稻生产中存在化学化肥施用量大和氮肥利用率低等问题,损失的肥料养分对环境威胁很大<sup>[7]</sup>。因此,研究江淮丘陵区氨挥发损失对维护该生态区可持续发展具有重要意义。

由于稻田中氨挥发排放受土壤性质、气候条件、施肥管理技术、稻田田面水中藻类的生长以及作物生

收稿日期: 2017-02-15

资助项目: 国家重点研发计划项目“长江中下游水稻化肥农药减施增效技术集成研究与示范”(2016YFD0200800); 安徽省农科院科技创新团队项目“水旱轮作最佳养分管理”(13C1008); 院长青年创新基金项目“江淮丘陵稻区氮肥的氨挥发及其影响因素研究”(15B1018)

第一作者: 郭刚(1987—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 助理研究员, 主要从事养分资源综合管理研究。E-mail: gangw1987@163.com

通信作者: 孙义祥(1971—), 男, 安徽霍邱人, 博士, 副研究员, 主要从事养分资源综合管理研究。E-mail: sunyixiang@126.com

长期的综合影响<sup>[3]</sup>,因此不同生态区域水稻生产中氨挥发损失特征具有明显的差异<sup>[8-12]</sup>。而目前针对江淮丘陵区化学氮肥氨挥发损失研究较少<sup>[13]</sup>。本文初步研究江淮丘陵区不同氮肥管理对稻田氨挥发损失特征的影响,分析氨挥发相关的影响因素,综合比较不同氮肥管理模式的经济效益,试图寻找合理的稻田氮肥管理模式,为控制江淮丘陵区稻田氮素损失、提高氮素利用率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于安徽省滁州市定远县池河镇青岗村(32°33'N,117°52'E),属于江淮丘陵地区,亚热带季风气候,年平均气温 14.9~15.7℃之间,年均降水量在 923~997 mm 之间,耕作制度为稻麦轮作,土壤类型为黄褐土。耕层土壤基本理化性质为:pH 6.50,有机质含量 18.9 g/kg,全氮含量 1.1 g/kg,速效磷含量 24.3 mg/kg,速效钾含量 190.5 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置 3 个处理,分别为:不施氮肥(N0)、常规施肥(Conventional N,CN,施氮量 195 kg/hm<sup>2</sup>,氮运筹为基肥:分蘖肥:穗肥=5:2:3)、缓释尿素和普通尿素配施处理(Control Released Urea,CRU,施氮量 195 kg/hm<sup>2</sup>,普通尿素与缓释尿素为 7:3,全部基施)。磷钾肥作为基肥一次性施入,施磷量 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>,施 K<sub>2</sub>O 为 90 kg/hm<sup>2</sup>。施用肥料分别为缓释尿素(树脂包衣,含 N 44%,山东茂施生态肥料有限公司生产)、普通尿素(含 N 46%,中盐安徽红四方股份有限公司生产)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%,铜陵市铜官山化工有限公司生产)和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%,中化化肥有限公司)。每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积为 35 m<sup>2</sup>(5 m×7 m),小区间做埂隔离,并用塑料薄膜覆盖埂体,保证每个小区单独排灌。基肥于移栽前旋耕深施,基肥施用深度为 10 cm,分蘖肥和穗肥分别于移栽后第 14、45 天以撒施方式施入,其他田间管理方法相同。水稻品种为丰两优香 1 号,2015 年 6 月 23 日移栽,10 月 14 日收获,水稻移栽株距为 15 cm,行距为 30 cm。

### 1.3 样品采集与测定

1.3.1 植株样品采集与测定 根据定点调查成熟期的平均分蘖数,每个小区随机采集植株样品 3 穴。分别烘干称重计算干物质质量,磨碎消煮后测定全氮含量<sup>[14]</sup>。小区产量为实测产,单打单收。

1.3.2 田面水采集与测定 采用多点混合取样法,每次施肥后,一周内每天采集一次田面水,一周后每两天采集一次,直至施肥处理铵态氮浓度与对照区无差别为止。水样过滤后,放于 4℃冰箱保存,用纳氏

比色法测定其铵态氮含量。

1.3.3 NH<sub>3</sub> 排放通量测定 采用密闭室监测稻田 NH<sub>3</sub> 挥发通量<sup>[15]</sup>(图 1):密闭室为内径 20 cm,高 15 cm 的底部开放的透明有机玻璃圆筒,将密闭室嵌入两行植株之间的表层土壤中,内部留有 8~10 cm 高的空间。圆筒顶部有两个通气孔,一个与 2.0 m 高的塑料管连接(以保证通入密室内的气体不被稻田排放的 NH<sub>3</sub> 污染,其 NH<sub>3</sub> 浓度为大气中的 NH<sub>3</sub> 浓度);另一个与 500 mL 孟氏洗气瓶相连,瓶内装有 2%的硼酸用于吸收气体中的 NH<sub>3</sub>(以 15~20 次每分钟的频率吸气),然后用标准硫酸(0.02 mol/L)滴定其 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度,由此计算稻田 NH<sub>3</sub> 挥发通量。氨挥发的测定在施肥后每天上午 9:00—11:00 进行(这段时间监测时,土壤产生的气态氨相当于全天的平均水平<sup>[12]</sup>),连续抽 2 h,并测定到施肥区与对照区氨挥发通量无差别为止。同时,用酒精温度计(由河北衡火测温仪表厂产出,精确到 1℃)检测该时段的高度为 1.5 m 的大气温度和 5 cm 土层温度。

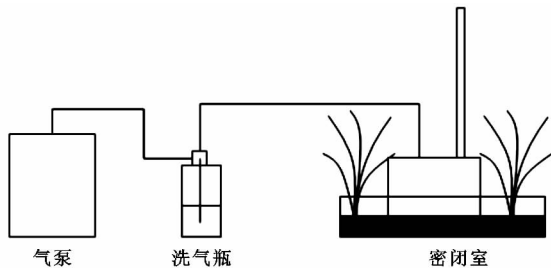


图 1 稻田氨挥发监测示意

### 1.4 数据处理与分析

作物氮素积累量:生育期单位面积植株氮积累量的总和(kg N/hm<sup>2</sup>)=生育期植株含氮量×生育期单位面积植株干物质积累量

氮肥表观利用率:氮肥表观利用率(%)=[(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量]×100

NH<sub>3</sub> 挥发通量的计算方程为: NH<sub>3</sub> (N) = 14 × C<sub>1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub> × (V-V<sub>0</sub>) × 24 × 10<sup>-6</sup> / (3.1415 × d<sup>2</sup> × 10<sup>-4</sup>)。式中: NH<sub>3</sub> (N) 表示以氨形式挥发的氮含量(kg/hm<sup>2</sup>/d); 14 为氮的摩尔质量(g/mol); C<sub>1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub> 为硫酸标液浓度,本试验为 0.02 mol/L; V 和 V<sub>0</sub> 分别表示滴定收集氨处理和空白滴定所消耗的硫酸标液体积(mL); d 为密闭室内的半径(m)。

使用 Microsoft Excel 软件对数据进行计算和统计;采用 SPSS 中 Duncan 法对数据进行差异显著性分析(P<0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮肥管理模式土壤氨挥发损失特征

2.1.1 土壤氨挥发通量动态变化 从图 2 可以看出,施用氮肥后 CN 和 CRU 处理氨挥发通量均呈先

上升后下降的变化趋势,其中基肥期 CN 和 CRU 处理氨挥发通量的最大值均出现在第 2 天,分别为 6.73, 9.47 kg/(hm<sup>2</sup> · d),随后呈现下降至平稳状态,施肥后 1 周氨挥发基本结束;分蘖肥期表现出类似的变化趋势,CN 处理氨挥发通量在第 2 天达到最高(4.25 kg/(hm<sup>2</sup> · d)),而 CRU 处理氨挥发通量较小,最高为 0.62 kg/(hm<sup>2</sup> · d);穗肥期 CN 处理氨挥发通量在第 2 天日达到最高(2.24 kg/(hm<sup>2</sup> · d)),CRU 处理在第 2~5 天都维持较低氨挥发通量,最高为 0.48 kg/(hm<sup>2</sup> · d)。不施氮肥(NO)处理在整个监测期氨挥发均无明显排放。

2.1.2 氨挥发损失量与损失率比较 从表 1 可以看出,CN 处理阶段氨挥发累积损失量的顺序为分蘖肥>基肥>穗肥,CRU 处理阶段氨挥发累积损失量的顺序为基肥>分蘖肥>穗肥,CN 和 CRU 处理基肥氨挥发损失量占总损失量的比例分别为 39.09%和88.00%。CN 模式下,氨挥发损失量占施氮量的比例大小顺序是分蘖肥>基肥>穗肥,分蘖肥

处理	基肥		分蘖肥		穗肥		季氨挥发	稻季氨挥
	损失量/ (kg N · hm <sup>-2</sup> )	占施 N 量/%	损失量/ (kg N · hm <sup>-2</sup> )	占施 N 量/%	损失量/ (kg N · hm <sup>-2</sup> )	占施 N 量/%	损失总量/ (kg N · hm <sup>-2</sup> )	发损失率/%
N0	1.20c	—	0.63c	—	0.52c	—	2.35c	—
CN	15.74b	16.06	17.49a	44.84	7.05a	11.94	40.27a	20.55
CRU	27.65a	14.11	1.92b	—	1.85b	—	31.42b	16.03

注:“—”表示无值;同列数字后不同字母表示达 5%显著水平。

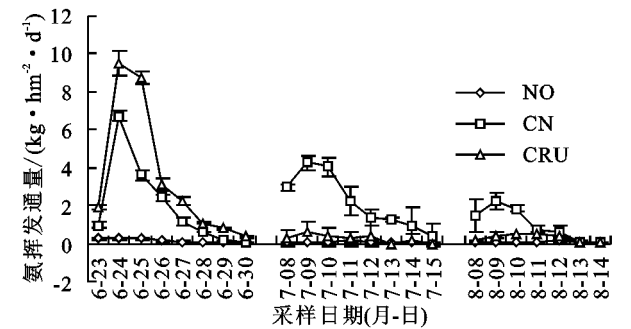
2.2 不同氮肥管理模式下田面水铵态氮浓度的变化

由图 3 可以看出,各处理的田面水中铵态氮浓度与氨挥发通量的变化趋势基本一致,大致呈先上升后下降的趋势,CN 模式下的 3 次施肥后铵态氮浓度在 1~2 天内达到最大值。施基肥后田面水铵态氮浓度在第 2 天达到最大值,CN 和 CRU 处理分别为 27.42, 43.23 mg/kg,随后迅速下降,7 天后降至 1.77,7.09 mg/kg;施分蘖肥和穗肥后田面水铵态氮浓度最高值出现在施肥后第 1 天,CN 处理分别为 18.64 mg/kg 和 7.47 mg/kg,明显低于基肥时期,随后也逐渐下降,至第 7 天时浓度与对照接近。N0 处理田面水铵态氮浓度在整个生育期内均处于较低水平。通过相关性分析得出,基肥、分蘖肥、穗肥的田面水中铵态氮浓度与氨挥发通量之间存在极显著线性相关关系,相关系数大小顺序为基肥( $r=0.946, n=24$ )>分蘖肥( $r=0.848, n=24$ )>穗肥( $r=0.841, n=21$ );监测期稻田田面水的平均铵态氮浓度与氨挥发总量亦呈极显著的正相关关系( $r=0.968, n=9$ )。

2.3 不同氮肥管理模式下水稻产量、氮肥利用效率和经济效益比较

从表 2 可以看出,尽管缓释尿素与普通尿素配施

期氨挥发损失率达到 44.84%。整个监测期间,CN 和 CRU 处理的氨挥发损失量分别为 40.27,31.42 kg N/hm<sup>2</sup>,较 CN,CRU 的稻季氨挥发损失总量降低了 26.23%;CN 和 CRU 处理的氨挥发损失率分别为 20.55%和 16.03%,CRU 处理稻季氨挥发损失率较 CN 降低了 4.52%。



注:施基肥日期为 6 月 22 日;分蘖肥为 7 月 7 日;穗肥为 8 月 7 日。下同。

图 2 不同氮肥管理模式氨挥发通量动态变化

(CRU)处理与常规施肥(CN)处理的产量间无显著差异,但 CRU 处理的水稻吸氮总量和氮肥表观利用率较 CN 处理分别增加 11.90 kg N/hm<sup>2</sup> 和 6.07%,差异均达 5%显著水平。单位产量氨挥发量是指氨挥发总量与产量之间的比值。较 CN 处理,CRU 处理单位产量氨挥发量降低 22.8%,说明缓释尿素与普通尿素一次性配施在保证产量的同时,还能显著减少稻田氨挥发的损失,从而提高氮肥的利用率。对经济效益进行计算可看出,虽然 CRU 处理增加了 99.96 元/hm<sup>2</sup> 的肥料投入,但减少了后期两次追肥的人工成本。综合计算其经济效益增加 981.73 元/hm<sup>2</sup>。

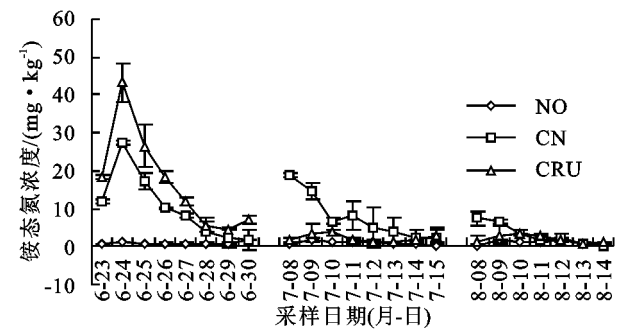


图 3 不同氮肥管理模式下田面水铵态氮浓度的动态变化

表 2 不同氮肥管理模式下水稻产量、氮肥利用效率和经济效益

处理	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水稻吸氮总量/ (kg N·hm <sup>-2</sup> )	氮肥表观 利用率/%	单位产量氮挥发量/ (kg N·T <sup>-1</sup> )	肥料投入成本/ (元·hm <sup>-2</sup> )	追肥人工成本/ (元·hm <sup>-2</sup> )	经济效益/ (元·hm <sup>-2</sup> )
N0	4485.24b	68.34c	—	0.52c	—	—	9860.93
CN	8191.83a	130.75b	31.84b	4.92a	2076.20	900	15048.03
CRU	8275.42a	142.65a	37.91a	3.80b	2176.16	—	16029.76

注:水稻 2.2 元/kg;缓释纯氮 6.4 元/kg;普通纯氮 4.7 元/kg;追肥人工 450 元/hm<sup>2</sup>;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.8 元/kg;K<sub>2</sub>O 8.0 元/kg;经济效益=产值—肥料投入成本—追肥人工成本;同列数字后不同字母表示达 5%显著水平。

### 3 讨论

不同生态区域水稻生产中未施氮土壤的氮挥发损失量具有明显的差异。在相同的测定方法下,俞映惊等<sup>[16]</sup>研究得出太湖地区稻田不施氮肥处理的氮挥发总量为 40.0 kg/hm<sup>2</sup>,张惠等<sup>[5]</sup>结果表明黄河上游灌区稻田未施氮肥处理的氮挥发总量为 27.6 kg/hm<sup>2</sup>,而陈振华等<sup>[11]</sup>等研究得出辽河下游平原稻田不施氮肥处理的氮挥发总量仅为 0.45 kg/hm<sup>2</sup>,本研究表明江淮丘陵区不施氮肥处理的氮挥发量(表 1)为 2.35 kg N/hm<sup>2</sup>。通过比较 4 个区域试验点的概况发现,基础土壤的 pH 值、有机质和全氮含量可能是引起氮挥发损失量差异的主要因素。氮挥发总量最大的太湖地区有机质和全氮含量亦最大。黄河上游灌区、江淮丘陵区 and 辽河下游平原三个区域的有机质、全氮含量相近,但是黄河上游灌区的氮挥发总量要远远大于江淮丘陵区 and 辽河下游平原。分析原因可能是黄河上游的土壤 pH 较大,促进了氨的挥发。相比而言,江淮丘陵区氮挥发损失背景值较低,氮肥的施用是造成该区域氮挥发损失的主要因素。

江淮丘陵区常规施肥模式下氮挥发损失量和损失率分别为 40.27 kg N/hm<sup>2</sup> 和 20.55%,与李艳等<sup>[10]</sup>研究结果接近。在相同施氮量下,较常规施肥模式,缓释尿素与普通尿素配施稻季氮挥发损失总量和损失率分别降低了 26.23%和 4.52%,与周亮等<sup>[17]</sup>和徐久凯等<sup>[18]</sup>研究结果一致,周亮等研究结果表明在相同施氮量下,湖南省早稻和晚稻树脂包膜尿素处理的氮挥发损失率较普通尿素分别减少 15.92%和 7.82%;徐久凯等通过室内模拟研究发现,与普通尿素相比,45%缓释尿素和 55%普通尿素配施氮挥发损失量能显著降低 25.94%。分析其原因,缓释尿素作为基肥与土壤充分混匀施用后,其包膜材料阻隔了膜内尿素与土壤脲酶直接接触,从而阻碍了膜内外水分的运移,减少了参与氮挥发的底物尿素态氮,降低了氮挥发的排放。但是有研究表明缓释肥表面撒施入土壤后,会导致田面水铵态氮的浓度维持在较高水平,从而增加其氮挥发损失<sup>[20]</sup>。虽然缓释肥的施用能降低氮挥发的排放,但是其施用方式不当反而会促使氮素的氮挥发损失。因此,缓释尿素在稻田中不宜采用表面撒施的施肥方式,否则会增加氮挥发的损失。

稻田氮挥发受温度、光照、风速等气候因素和水肥田间管理共同的影响<sup>[17]</sup>,田面水中铵态氮是稻田氮挥发的直接来源。本研究表明无论在常规施肥模式(CN)还是缓释尿素与普通尿素配施(CRU),基肥、分蘖肥、穗肥的田面水中铵态氮浓度与氮挥发通量之间均存在极显著正相关关系,田面水中铵态氮直接影响氮挥发量的大小,与俞映惊等<sup>[16]</sup>和李艳等<sup>[10]</sup>的研究结果相一致。肥料中氮的释放速率影响着田面水的铵态氮浓度,从而影响氮挥发损失的强度。因此,为降低氮挥发的损失,可通过合理的施肥管理和改变肥料特性等措施降低田面水的铵态氮浓度。

### 4 结论

(1)整个稻季氮挥发损失量为 31.42~40.27 kg N/hm<sup>2</sup>,占施氮量的 16.03%~20.55%。分蘖肥阶段的氮挥发损失率约占施氮量的 44.84%。因此,分蘖肥时期是控制氮挥发损失的关键时期。

(2)江淮丘陵区缓释尿素与普通尿素配施能显著降低氮挥发的损失。在相同施氮量下,较常规施肥模式,缓释尿素与普通尿素配施稻季氮挥发损失总量和损失率分别降低了 26.23%和 4.52%,且能获得较高的经济效益。因此,缓释尿素与普通尿素配施适宜在江淮丘陵水稻种植区进行推广应用。

#### 参考文献:

- [1] Roberts T L. The role of fertilizer in growing the world's food[J]. Better Crops with Plant Food,2009(2):12-15.
- [2] 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.
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [4] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: How deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality,2013,42(6):1635-1642.
- [5] 张惠,杨正礼,罗良国,等. 黄河上游灌区稻田氮挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1131-1139.
- [6] 彭世彰,杨士红,徐俊增. 节水灌溉稻田氮挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报,2009,25(8):35-39.
- [7] 黄维,王为东. 巢湖烔炀河水水质空间分布特征及其改善策略[J]. 安徽农业大学学报,2015,42(3):429-438.