

有机肥氮素利用率的几种典型计算方法比较

田昌玉¹, 林治安¹, 徐久凯¹, 赵秉强¹, 唐继伟^{1*}, 李建华²

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 德州市陵城区农业农村局, 山东德州 253015)

摘要:【目的】氮素利用率计算方法有多种, 其计算结果的可靠性影响氮素管理的科学性。比较几种典型氮肥利用率计算方法的结果随有机肥施用水平和试验年限的变化, 并从计算公式中各参数的含义讨论计算方法的科学性。【方法】以 12 年长期定位试验为平台, 有机肥设置每季 5 个施氮水平, 分别为 0、120、240、360、600 kg/hm², 种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。采用常规差减法、叠加法、比值法、氮素利用率法和氮素平衡法分别计算了不同有机肥料氮处理下不同年份的氮肥利用率。【结果】1) 用常规差减法和叠加法计算的有机氮肥当年利用率偏低, 比值法计算结果适中, 主要是空白对照作物可能吸收了施肥处理潜层扩散的矿质氮素, 使得空白对照作物吸收氮素量比较高; 叠加法氮肥利用率与常规差减法计算的结果差异不显著。2) 用比值法计算的氮肥利用率与国际通用氮素利用率计算法的结果很接近, 如果能控制空白对照作物吸收的氮素量不受其它高氮肥处理影响, 比值法与氮素利用率法的计算结果一致。3) 氮素平衡法考虑到了施肥对土壤氮素库的影响, 是代表实际氮肥回收率的方法。计算的氮肥利用率呈现氮素平衡法好于氮素利用率法, 氮素利用率法好于比值法。【结论】氮库变化影响比值法的准确性。在长期定位试验空白对照土壤氮素库相对稳定期, 比值法是氮素利用率计算的简略方法; 当土壤氮素库相对稳定条件下(施肥处理和对照土壤氮素库不变, SN = 0), 比值法、氮素利用率法和氮素平衡法计算结果一致; 在土壤氮素库逐年增加或降低条件下, 氮素平衡法是氮素利用率计算的最合理方法。

关键词: 有机肥; 试验年限; 氮素利用率; 氮素平衡法; 比值法; 叠加法; 常规差减法

Comparison of organic fertilizer nitrogen use efficiency calculated by several typical methods

TIAN Chang-yu¹, LIN Zhi-an¹, XU Jiu-kai¹, ZHAO Bing-qiang¹, TANG Ji-wei^{1*}, Li Jian-hua²

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China;

2 The Agricultural and Rural Bureau of Lingcheng District, Dezhou, Shandong 253015, China)

Abstract: 【Objectives】 Many methods are used for the calculation of nitrogen efficiency. The precision and stability of the results may impact the outcome of nitrogen nutrient management. We compared and discussed the precision and availability of the mostly used calculation methods from the subtraction and meaning of the parameters in the formula. 【Methods】 The study was based on 2 years of long-term experiment under winter wheat-summer maize cropping system, in which the organic fertilizer nitrogen treatments were composed of N 0, 120, 240, 360, 600 kg/hm². Subtraction method, accumulation method, ratio method, nitrogen balance method and the international general nitrogen use efficiency (NUE) method were used to calculate the nitrogen utilization efficiencies of organic fertilizer. The variation of the results of the five methods with fertilizer application years and rates were compared. 【Results】 The value calculated by subtraction method and accumulation method was relatively low, because the crops in blank control might be able to absorb nitrogen from the fertilization treatment through latent diffusion. The value had no significant difference between subtraction method and accumulation method. The results calculated by the ratio method and the international general nitrogen use efficiency

收稿日期: 2019-11-25 接受日期: 2020-07-24

基金项目: 现代农业产业技术体系德州综合实验站项目(CARS-03-01E); 山东德州长期定位科学观测试验项目(1610132019032)。

联系方式: 田昌玉 E-mail: tianchangyu@caas.cn; * 通信作者 唐继伟 E-mail: tangjiwei@caas.cn

method were very close. If the latent diffusion of N to blank control could be prevented, the results would be closer. The nitrogen balance method considered the effect of fertilization on soil nitrogen pool, so the value calculated by NUE method should be the closest to the actual value. Balance method was better than the international general NUE method, and NUE method was better than ratio method. 【 **Conclusions** 】 The variation of soil nitrogen pool influences the accuracy of ratio method. In the long-term experiment, the soil nitrogen pool is relatively stable, so the efficiency of organic nitrogen fertilizer calculated by the ratio method, the nitrogen utilization rate method and the nitrogen balance method are close with each other. Under condition of gradual increase or decrease of nitrogen pool in the long-term fertilization, the nitrogen use efficiency calculated by the nitrogen balance method is the most reasonable.

Key words: organic fertilizer; experimental years; nitrogen use efficiency; accumulation method; ratio method; balance method; subtraction method

农业生产中, 科学合理地管理氮肥是保证我国粮食安全的重要措施, 也是减少能源消耗、保护环境的重要技术^[1-3]。氮肥回收率或者氮肥利用率一直作为氮素管理的重要指标, 自 1990 年刘巽浩和陈阜发表“对氮肥利用效率若干传统观念的质疑”^[4]一文以来, 氮肥利用率的计算方法得到了广泛地讨论及改进。杨宪龙等^[5]总结了农田氮肥利用率计算方法, 主要计算方法包括: 叠加计算方法^[6]、比值法^[7]、土壤氮素平衡法^[8]、养分真实利用率算法^[9]、氮肥有效率计算方法^[10], 其中氮肥有效率计算方法适用于¹⁵N 示踪测定方法, 养分真实利用率计算方法与土壤氮素平衡法的差减法计算公式基本相同^[5]。目前国际上推荐的氮素利用率 (NUE) 计算方法, 广范应用于氮素效率的计算^[11-12]。用常规差减法计算的氮肥利用率平均为 35% 左右^[13], 但许多研究认为该结果偏低^[4,6,14], 并尝试改进该方法^[7-10,15]。宇万太等^[14]认为, 常规差减法和¹⁵N 示踪法都不能得到可信的结果, 建议用比值法估算氮肥利用率。李世清等^[6]认为, 差减法计算的氮肥利用率仅仅是表观利用率, 没有将残留肥料氮后效包括在内, 而运用氮肥叠加利用率能够更准确地反映实际氮肥利用率, 每年施氮量 N 120 kg/hm² 下, 采用¹⁵N 示踪法, 4 季作物叠加氮肥利用率达到 64.7%。Sebilo 等^[16]通过 30 年¹⁵N 示踪法测定, 叠加氮肥利用率为 61%~65%, 仍然有 12%~15% 的氮素残留在土壤中 (施氮量每年 120 kg/hm²), 认为¹⁵N 示踪法测定氮肥利用率只有计算多年叠加的氮肥利用率, 才能较好地反映氮肥利用率。杨宪龙^[17]等运用土壤矿质氮为指标, 采用比值法、土壤氮素平衡法和叠加法分别计算并比较了氮肥利用率, 得出的结论是不同年份间土壤氮素平衡法计算结果没有比值法的结果稳定性好。笔者认为, 杨宪龙用土壤氮素平衡法计算氮肥利用率应用了土壤矿质氮变

化量, 实际上土壤氮素平衡法计算氮肥利用率应该采用土壤全氮 (包含矿质氮)^[8], 因为不同年份间的气候变化, 土壤中矿质态氮在年份间变异比全氮大。

本研究基于 10 年定位试验结果, 用常规差减法、叠加法、比值法、氮素平衡法和氮素利用率法计算的氮素利用率结果随时间的变化, 比较不同氮肥利用率计算方法的利弊, 通过分析不同方法计算的氮肥利用率年际间变化的规律特点, 讨论氮肥利用率计算方法及测定中存在的问题, 使现有常规计算方法进一步规范。

1 材料与方法

1.1 试验地点

长期定位试验在中国农业科学院德州实验站陵县试验基地进行。基地 (37°20'N, 116°38'E) 位于黄淮海平原中心地带, 典型农业区, 海拔 21.4 m, 属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区, 四季分明, 日照时数长, 光照强度大。土壤类型为盐化潮土, 盐渍化类型以硫酸盐-氯化物盐土为主, 土壤质地为轻壤土。表层 0—20 cm 土壤有机质含量 9.0 g/kg、硝态氮 10.2 mg/kg、速效磷 16.3 mg/kg、速效钾 107 mg/kg、pH 8.38、EC 158.7 μS/cm。

1.2 试验设计与管理

2006 年 10 月小麦季布置定位试验, 种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟。有机肥设置 5 个氮 (N) 水平: 0、120、240、360 和 600 kg/hm², 随机区组设计, 3 次重复, 共 15 个小区, 小区面积 25 m² (5 m × 5 m)。冬小麦一般于 10 月上中旬播种, 次年 6 月上中旬收获; 夏玉米于冬小麦收获后播种, 当年 9 月下旬至 10 月上旬收获。

有机肥的施用量根据每年施肥前测定的有机肥

含水量、含氮量计算得出, 以全氮含量进行折算。有机肥选用当地养殖场腐熟厩粪, 干基主要养分含量为 N 1.10%~2.31%, P_2O_5 0.74%~3.35%, K_2O 0.67%~3.00%, pH 7.82~8.92, EC 7.01~11.83 mS/cm。2006 年 10 月至 2009 年 6 月施用的有机肥为猪粪, 2009 年 10 月开始施用牛粪(表 1)。2006—2014 年有机肥分别于小麦、玉米播种前作基肥施入; 从 2015 年开始, 由原来小麦、玉米两季施用有机肥改为小麦播种前一次性施入。试验田间日常管理参考当地种植习惯, 采用常规栽培模式。

1.3 测定项目与方法

取样时间为每年的小麦收获后(6 月)和玉米收获后(10 月)。用不锈钢筒形土钻于各小区内采用“S”形取样点采集 0—20、20—40 cm 土层 8 个点的土样并充分混合保存。土样在实验室内自然风干后过 2 mm 筛。全氮采用凯氏定氮法测定。

试验 2006—2009 年有机肥料为风干猪粪, 2009 年后为发酵牛粪, 为保证数据一致性, 文中数据采用 2010 以后测定结果。利用 Excel 2007 进行试验数据的预处理, 采用 SAS 软件进行统计分析, 用最小二插值法进行差异性分析($P < 0.05$ 为显著)。

1.4 氮肥利用率计算方法

1) 常规差减法

$$SNUE = (U - U_0)/F \times 100\% \quad (1)$$

式中: U 为施肥处理作物氮素吸收量, U_0 为不施肥对照作物氮素吸收量, F 为施氮量。

2) 叠加法

$$ANUE = (CU - CU_0)/CF \times 100\% \quad (2)$$

式中: CU 为一段时期内施肥处理作物的氮素累计吸收量, CU_0 为该段时期内不施肥作物的氮素累计吸收量, CF 为该时期内肥料氮素累计投入量。

3) 比值法

$$RNUE = U/(U_0 + F) \times 100\% \quad (3)$$

式中: U 为施肥处理作物的氮素吸收量, U_0 为不施肥处理作物的氮素吸收量, F 为肥料氮素投入量。

4) 氮素利用率法^[2]

$$NUE = \text{产品输出带出氮}/\text{氮素总输入} \times 100\% \quad (4)$$

式中: 氮素总输入包括 U、F、AN、DN、RN 及 SDN。其中, U 为施氮作物的氮素吸收量, F 为肥料氮素投入量, AN 为土壤非共生固氮量, DN 为大气干湿沉降氮量, RN 为灌水携入氮量, SDN 为种子携入氮。

5) 平衡法

$$BNUE = U/(F + AN + DN + RN + SDN + SN) \times 100\% \quad (5)$$

式中: U 为施氮作物的氮素吸收量, F 为肥料氮素投入量, AN 为土壤非共生固氮量, DN 为大气干湿沉降氮量, RN 为灌水携入氮量, SDN 为种子携入氮, SN 为 0—40 cm 土体土壤氮素库容的降低量。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥施用量条件下作物氮素吸收量

每年测定作物籽粒产量和秸秆产量, 并测定含氮量, 最后计算各年份不同有机氮用量下作物地上部分氮素吸收量, 各处理随有机肥用量的增加, 氮素吸收量也呈增加趋势(表 1)。

土壤系统氮素输入量包括施肥投入氮素、种子带入氮素、大气干/湿沉降氮素量、灌水输入氮和土壤非共生固氮量。

施肥投入氮素: 试验有机肥料施用量设置了 5 个氮水平 N 0、120、240、360、600 kg/hm², 小麦、玉米两季每年肥料氮素投入量分别为: 0、240、480、720、1200 kg/hm²。

种子带入氮素: 按小麦、玉米播种量与其含氮量乘积计算, 小麦、玉米每年播种量分别为 187.5 和 37.5 kg/hm², 其含氮量平均分别为 1.86% 和 1.17%, 则每年小麦和玉米种子带入氮素量为 3.92 kg/hm²。

表 1 2010—2017 年不同有机氮用量下作物地上部氮素吸收量 (kg/hm²)

Table 1 Above-ground nitrogen absorption of crops under different organic nitrogen inputs during 2010–2017

有机氮施用量 (kg/hm ²) Organic N input	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
0	145.8 ± 23.5	133.3 ± 4.2	133.7 ± 24.3	96.8 ± 9.9	111.6 ± 17.9	103.3 ± 7.2	132.3 ± 5.1	119.5 ± 23.9
120	269.4 ± 32.3	236.3 ± 8.1	271.8 ± 16.8	216.4 ± 31.4	252.7 ± 21.6	198.5 ± 20.7	243.3 ± 22.7	241.9 ± 8.5
240	340.9 ± 15.9	313.6 ± 5.1	317.8 ± 15.6	289.6 ± 29.1	320.0 ± 18.6	262.4 ± 20.4	346.0 ± 32.7	311.5 ± 11.7
360	368.2 ± 13.6	381.0 ± 3.9	370.6 ± 30.0	320.8 ± 38.8	366.8 ± 43.5	309.1 ± 39.5	422.4 ± 25.1	323.8 ± 9.9
600	382.0 ± 12.8	382.2 ± 8.5	390.9 ± 15.7	353.6 ± 29.9	408.5 ± 4.6	314.1 ± 37.8	420.2 ± 54.1	347.5 ± 41.0

大气干/湿沉降氮素：选用湿沉降年均总氮量 32.8 kg/hm² 和干沉降年均总氮量 32.3 kg/hm²^[18]之和 66.1 kg/hm² 作为当地大气沉降总量。

灌水输入氮：深井灌溉，灌水携入氮忽略不计。

土壤非共生固氮量：参照文献^[18]给出试验所在地非共生固氮量 15 kg/hm²。

土壤氮素库变化，上一年年终 0—40 cm 土壤全氮含量与本年年终的全氮含量之差。

2.2 不同方法计算的 8 年平均氮素回收率

由表 2 可知，氮肥利用率均随着施氮量的增加而递减，但 4 个有机氮施用水平下，5 种常用方法计算的有机肥氮利用率大小顺序均呈常规法~叠加法 < 比值法 < 氮素利用率法 < 氮素平衡法。对于 4 个有机肥用量处理，常规法和叠加法计算的氮肥利用率差异均未达显著水平，但均显著低于比值法、氮素利用率法和氮素平衡法的计算结果。比值法计算的有机肥氮利用率在低中施肥水平 (120 和 240 kg/hm²) 下显著低于氮素利用率法和氮素平衡法的计算结果，高、极高有机氮施用水平 (360 和 600 kg/hm²) 下与氮素利用率法差异不显著，仍显著低于氮素平衡法的计算结果。氮素利用率法除在低氮条件下 (120 kg/hm²) 与氮素平衡法氮肥利用率差异不显著外，其余氮条件下均显著低于氮素平衡法。

在低有机肥料氮水平 (120 kg/hm²) 下，常规法和叠加法计算的有机氮肥利用率仅为 50.0% 和 51.1%，而比值法计算结果为 67.6%，氮素利用率法和氮素平衡法计算的氮肥利用率分别为 80.1% 和 88.7%，比值法的结果与 Sebilo 等^[16]30 年示踪试验结果接近。5 个氮肥利用率的计算结果，常规法和叠加法偏低，比值法适中，氮素利用率法和氮素平衡法偏高。

2.3 不同方法计算的氮肥利用率年变化

图 1 显示，在试验年份中比值法、氮素利用率

法和氮素平衡法计算的氮肥利用率大小顺序为氮素平衡法 > 氮素利用率法 > 比值法。比值法与氮素利用率法计算的氮肥利用率差异小，而且随着施氮量增加差异逐渐减少，特别是当施氮量 240 kg/hm² 以上，两者差异在 2% 左右。氮素平衡法计算氮肥利用率随试验年限变化规律与有机肥料氮施用量有关，在有机肥氮 120 kg/hm² 处理下，氮肥利用率随试验年限增加而逐年缓慢升高；在有机肥氮 240、360 和 600 kg/hm² 处理下，氮肥利用率随试验年份推移逐年缓慢下降。

常规法和叠加法计算的氮肥利用率不同年份间没有明显变化，但是，其计算结果偏低，不能令人信服。宇万太等^[14]提出了比值法，刘巽浩和陈阜^[4]提出对差减法质疑，巨晓棠^[10]提出氮素有效率方法，田昌玉等^[8]提出氮素平衡法。比值法、氮素利用率法和氮素平衡法都能在很大程度上提高氮肥利用率的计算结果。

2.4 2010 与 2017 年有机氮素利用率计算结果的比较

2010 和 2017 年比较，有机氮施用量为 120 kg/hm² 时，常规法与叠加法计算的氮素利用率基本保持 50.1%~51.1%；比值法计算的氮肥利用率分别为 69.8% 和 67.3%，2017 年比 2010 年减少了 2.5 个百分点；氮素利用率法分别为 82.9% 和 74.4%，2017 年比 2010 年减少 8.5 个百分点；氮素平衡法计算的氮肥利用率分别是 85.3% 和 93.8%，2017 年比 2010 年增加了 8.5 个百分点。有机氮施用量为 240 kg/hm² 时，常规法与叠加法计算的氮素利用率保持在 39.6%~39.4%；比值法计算的氮肥利用率分别为 54.5% 和 52.0%，2017 年比 2010 年减少了 2.5 个百分点；氮素利用率法分别为 60.3% 和 55.1%，2017 年比 2010 年减少了 5.2 个百分点；氮素平衡法

表 2 不同方法计算的 8 年平均氮素回收率 (%)

Table 2 The 8-year mean N recovery rates calculated by different methods

有机氮施用量 (kg/hm ²) Organic N input	常规法 Subtraction method	叠加法 Accumulation method	比值法 Ratio method	氮素利用率法 NUE method	氮素平衡法 Balance method
120	50.0 ± 5.3 c	51.1 ± 5.1 c	67.6 ± 3.5 b	80.1 ± 0.3 a	88.7 ± 3.5 a
240	39.6 ± 1.8 d	39.4 ± 0.9 d	52.6 ± 1.4 c	57.1 ± 1.5 b	71.7 ± 3.2 a
360	32.8 ± 2.9 c	32.8 ± 2.9 c	43.1 ± 2.5 b	45.7 ± 2.6 b	56.1 ± 3.9 a
600	20.7 ± 1.5 c	19.9 ± 1.4 c	28.5 ± 1.4 b	29.6 ± 1.4 b	40.4 ± 1.3 a

注 (Note) : SNUE—Subtraction method; ANUE—Accumulation method; RNUE—Ratio of nitrogen use efficiency; NUE—Nitrogen use efficiency; BNUE—Balance of nitrogen use efficiency. 同行数据后不同小写字母表示不同方法计算结果间差异达 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters in the same row indicate the significant level of 5% in the calculation results of different methods.

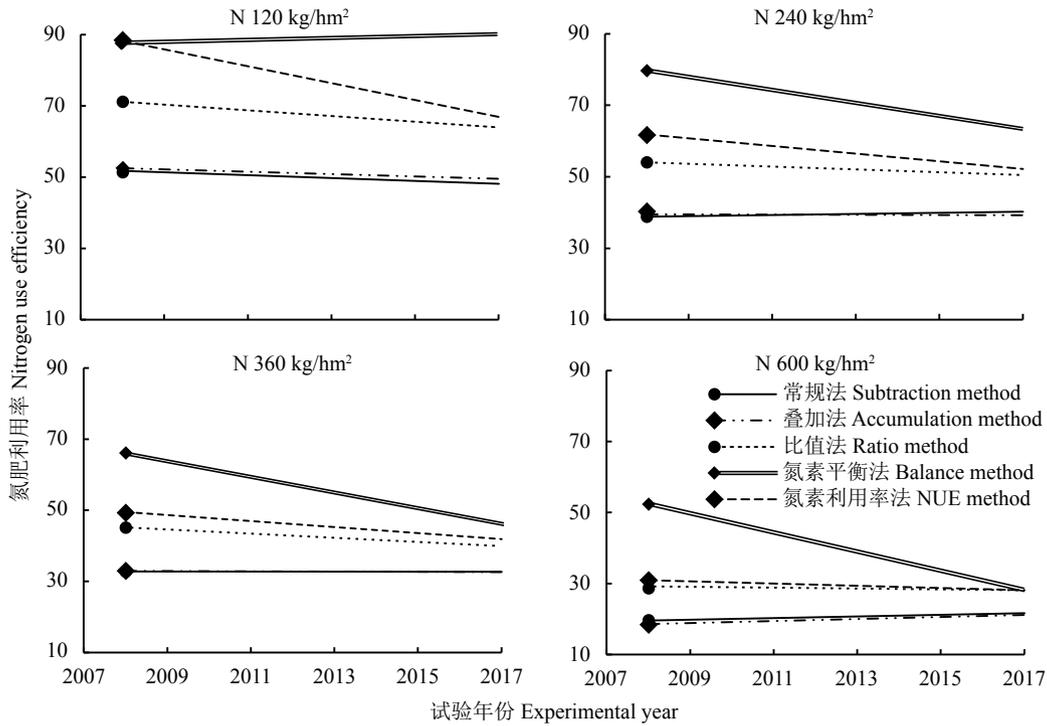


图 1 不同有机肥施用水平下几种典型氮素利用率计算结果随试验年限的变化

Fig. 1 Variation of typical nitrogen recovery rates with years under different levels of organic fertilizer N

[注 (Note) : NUE—Nitrogen use efficiency.]

分别是 76.9% 和 75.9%，2017 年比 2010 年减少了 1.0 个百分点。有机肥氮施用量为 360 kg/hm² 时，常规法与叠加法计算的氮素利用率保持在 32.8%；比值法计算的分别为 42.5% 和 38.6%，2017 年比 2010 年减少了 3.9 个百分点；氮素利用率法分别为 46.7% 和 40.2%，2017 年比 2010 年减少了 6.5 个百分点；氮素平衡法分别为 57.7% 和 47.6%，2017 年比 2010 年减少了 10.1 个百分点。有机肥氮施用量为 600 kg/hm² 时，常规法与叠加法计算的氮素利用率保持在 19.9%~20.7%；比值法计算的氮肥利用率分别为 28.4% 和 26.3%，2017 年比 2010 年减少了 2.1 个百分点；氮素利用率法分别为 29.7% 和 27.0%，2017 年比 2010 年减少了 2.7 个百分点；氮素平衡法的分别是 49.9% 和 30.4%，2017 年比 2010 年减少了 19.5 个百分点。

综合 4 个有机肥施用水平，5 个方法计算的氮肥利用率都随着施氮量的增加而降低。常规法和叠加法计算的氮肥利用率几乎相同，而且 2010 年和 2017 年的结果差异也很小，这两种计算方法的结果具有一致性，不同试验年份也具有稳定性，但是常规法和叠加法计算的氮肥利用率在 4 个施氮量和 2 个年份都低于其它 3 个方法。5 个计算方法的结果

大小规律是氮素平衡法 > 氮素利用率法 > 比值法 > 叠加法、常规法 (图 1)。

2.5 不同方法计算的氮肥利用率的变异

表 3 显示，在 N 120 kg/hm² 处理下，氮素平衡法的计算结果变异系数只有 0.4%，氮素利用率法和比值法计算结果的变异系数分别为 3.9%、5.2%，而常规法和叠加法高达 10.6% 和 10.0%。在有机肥氮高和极高施用水平下，常规法和叠加法的变异系数始终高于比值法、氮素利用率法和氮素平衡法。

从同一方法计算的有机肥氮不同施用水平下的

表 3 不同计算方法氮肥利用率 8 年间变异系数 (%)

Table 3 Variation coefficients of nitrogen recovery rate in 8 years

有机氮用量 Organic N input (kg/hm ²)	常规法 Subtract. method	叠加法 Accum. method	比值法 Ratio method	氮素 利用率法 NUE method	平衡法 Balance method
120	10.6	10.0	5.2	3.9	0.4
240	4.5	2.3	2.7	4.5	2.6
360	8.8	8.8	5.8	7.0	5.7
600	7.2	7.0	4.9	3.2	4.7

注 (Note) : NUE—Nitrogen use efficiency.

氮素利用率来看, 常规法与叠加法在中等有机肥氮施用水平计算结果的变异较小, 比值法 4 个有机肥氮施用水平的计算结果变异系数较为接近, 氮素利用率和氮素平衡法的氮肥利用率变异系数在高有机肥氮施用水平有增加。综合看来, 常规法和叠加法计算的氮素利用率变异较大, 特别是在低有机肥氮施用水平; 而氮素利用率和比值法在有机肥氮不同施用水平和施用年限间的变异水平较为稳定; 氮素平衡法变异系数除了氮肥处理 600 kg/hm² 之外, 随施氮水平的增加而增加, 同时低于其他 4 个方法计算的结果, 尤其在低氮施用水平下, 其计算结果非常稳定, 显示了良好的可靠性。

3 讨论

3.1 用叠加法与常规法计算的氮肥利用率之间差异和计算值偏低问题

已有文献表明常规法计算的氮肥利用率偏低^[4-11]。前人研究^[5, 8-12, 15, 17-19]认为, 长期 (> 7 年) 定位试验中, 当土壤氮素养分达到相对平衡时, 用常规法计算的氮肥利用率能代表实际氮肥利用率。从表 2 数据看, 长期定位试验计算的氮肥利用率也仅为 50% (有机肥施用量为 N 120 kg/hm²), 远远小于 Sebilo 等^[16] 30 年示踪试验用叠加法计算的氮肥利用率 (> 65%)。

长期定位试验用常规法计算氮肥利用率偏低, 原因主要是长期定位试验中氮肥空白对照处理作物吸收的氮素不仅来源于大气干湿沉降、非共生固氮、灌水和种子携带氮素, 还包含了吸收土壤潜层水中含有的矿质态氮^[20]。低施氮量的土壤, 因为提供的氮素满足不了作物需求而需要消耗原有土壤氮库 (包括硝态氮), 而高有机肥料氮处理 (360、600 kg/hm²) 土壤潜层水含有丰富矿质态氮^[21-22], 夏季多雨季节期间土壤矿质态氮会从高有机肥料氮处理土壤向低有机肥料氮处理土壤侧渗, 对照处理作物能够以这种方式吸收土壤潜层水含有的矿质氮, 对照处理作物吸收氮素增多, 按方程式 (1) 计算的氮肥利用率就会减少; 如果对照处理没有吸收其它高氮处理潜层硝态氮, 按方程式 (1) 计算的氮肥利用率就会接近实际值。

关于叠加法计算的氮肥利用率, 李世清等^[6]阐述的叠加法计算的氮肥利用率明显偏高, 他们是采用¹⁵N 标记法加叠加法计算的氮肥利用率, Sebilo 等^[16]报道的也是用¹⁵N 标记法加叠加法计算的氮肥利用率, 利用标记氮和叠加法计算的氮肥利用率能增加

氮肥利用率数值, 更好地反映实际氮肥利用率; 而采用常规氮素肥料, 由于在潜层水含有硝态氮对空白对照处理影响下, 用叠加法计算不一定能提高氮肥利用率的计算值。

3.2 比值法与氮素利用率法的关系

沈善敏^[7]提出的比值法计算氮肥利用率与国际通用的氮素利用率计算方法很接近。比值法提出 10 年后, 杨宪龙等^[17]采用比值法详细计算氮肥利用率并予以分析, 得出比值法计算的氮肥利用率不仅能更接近实际氮肥利用率而且年际间变异小。为什么比值法提出来 10 年后才有学者应用? 主要原因是没有重计的比值法, 只是在原来常规差减法计算公式中 3 个变量的基础上重新组合的计算式。

$$\text{常规差减法: 氮肥利用率} = (U - U_0) / F \quad (6)$$

$$\text{比值法: 氮肥利用率 (RNUE)} = U / (U_0 + F) \quad (7)$$

式中: U 为施氮作物的氮素吸收量; U₀ 为不施氮作物的氮素吸收量; F 为肥料氮素投入量。

计算氮肥利用率方法从公式 (6) 改进到公式 (7), 对照处理吸收氮素 (U₀) 在两个算式中的意义完全不同。U₀ 在算式 (6) 中通常解释为作物吸收来自土壤氮素量, 实际上 U₀ 随着试验时间延长其测定的值逐年下降, 当对照处理土壤氮素接近相对平衡 (年际间土壤氮素基本保持恒定) 时, 对照处理作物吸收 U₀ 实际上来源于施肥以外其它途径输入土壤的氮素 (大气干湿沉降、灌水、种子、非共生固氮及土壤浅层扩散矿质氮)^[19], 也就是说对照处理作物消耗施肥以外的氮素输入量, 收获物中吸收的氮量 U₀, 在低氮素输入情况下氮素利用率接近 100% (或 90% 以上)^[12], 因此基本上代表试验中不含施肥氮量以外其它途径输入到土壤中的氮素量, 也就是比值法计算氮肥利用率公式 (7) 中 U₀ 的含义, 用公式表示为:

$$U \leq 0AN + DN + RN + HN$$

$$\text{或 } U_0 \approx AN + DN + RN + HN \quad (8)$$

式中: AN 为土壤非共生固氮量; DN 为大气干湿沉降氮量; RN 为灌水携入氮量; HN 为空白对照处理潜层扩散氮。

因此, 氮肥利用率比值法公式 (3) 可以表示为公式 (9) 的形式:

$$\text{比值法: 氮肥利用率 (RNUE)} = U / (U_0 + F) =$$

$$U / (F + AN + DN + RN + HN + \dots) \quad (9)$$

比较氮素利用率公式 (4) 与比值法氮肥利用率公式 (9) 可以看出, 长期定位试验 10 年以后, 比值法

与氮素利用率计算方法非常接近, 计算公式中仅仅相差一个对照处理潜层扩散氮 (HN)。因为 $HN > 0$, 所以比值法计算的氮肥利用率小于氮素利用率; 如果对照处理土壤下层封闭, 阻止潜层矿质氮扩散 ($HN=0$), 那么比值法与氮素利用率计算方法几乎一样, 图 1 中 2017 年结果也证明了这种推论。

3.3 氮素平衡法与氮素利用率法关系

比较氮素平衡法计算式 (5) 与氮素利用率法计算式 (4), 两者之差在于土壤氮素库容的降低量 (SN)。有机肥料长期定位试验中, 土壤氮素库容实际上逐年增加, 所以 $SN < 0$, 因此氮素平衡法计算的氮肥利用率大于氮素利用率法计算结果。表 2 和图 1 也证实这一判断。施入土壤的有机肥料氮一部分被作物生长所消耗, 另一部分存储在土壤氮素库中, 存在土壤氮素库中的氮素是没有被吸收利用的有机肥料氮, 所以在氮素平衡法计算氮肥利用率公式中, 从总氮素输入部分减去土壤氮素库容的增加量 (或加上土壤氮素库容的减少量), 这种算法考虑到了肥料对土壤氮素库的影响, 是一个更符合实际的计算方法。

巨晓棠^[10]阐述目前氮肥利用率计算方法有 3 个误区, 其中之一是“没有将施氮量、作物产量和土壤氮素变化情况紧密联系起来”, 并提出了将施氮量、产量和土壤氮素变化情况紧密联系起来的算法——氮肥有效率算法。

氮肥有效率 = $100\% \times (\text{作物吸收肥料氮} + \text{主要根区土壤残留肥料氮}) / \text{氮肥施用量}$

这个氮肥有效率计算方法是用¹⁵N 标记法测定, 其中“主要根区土壤残留肥料氮”存在于土壤库中, 还没有被利用, 计算的氮肥有效率比实际氮素利用率要偏高些, “主要根区土壤残留肥料氮”通过作物进一步吸收利用, 转化为下一茬作物吸收肥料氮, 土壤残留肥料氮转化为作物吸收肥料氮的转化率不是 100%。

如果肥料氮是化肥氮, 或者施肥对土壤氮素库影响不大, 根据氮肥利用率公式 (4) 和 (5) 可以判定氮素利用率的计算公式与氮素平衡法计算公式一致 ($SN = 0$), 计算土壤氮素库容的变化量应该采用土壤全氮, 而且计算 2 m 土层全氮变化量更合理。

4 结论

5 个计算方法相比, 不论施肥量高低, 利用常规差减法 (常规法) 和叠加法计算所得的氮素利用率最

低, 且在大量有机肥氮水平下变异较大, 结果不能反映实际氮素利用率。用比值法和氮素利用率法计算氮素利用率的结果高于常规差减法和叠加法, 但低于氮素平衡法, 变异系数低于常规法和叠加法, 但高于氮素平衡法, 氮素平衡法计算的氮素利用率高且稳定, 具有很好的重复性和可靠性。

氮库变化影响着比值法的准确性。长期定位试验对照处理土壤氮素库相对稳定, 比值法是氮素利用率计算方法的简略形式; 在土壤氮库相对稳定条件下 (施肥处理和对照处理土壤氮素库不变: $SN = 0$), 比值法、氮素利用率和氮素平衡法计算结果一致; 在土壤氮库逐年增加或降低情况下, 氮素平衡法是计算氮素利用率的最合理方法。

参 考 文 献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.
- [2] 赵秉强, 梅旭荣. 对我国土壤肥料若干重大问题的探讨[J]. 科技导报, 2007, 27(8): 65-70.
Zhao B Q, Mei X R. Discussion on some crucial issues related to soils and fertilizers in China[J]. Science & Technology Review, 2007, 27(8): 65-70.
- [3] 钟旭华, 黄农荣, 郑海波, 等. 不同时期施氮对华南双季杂交稻产量及氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 杂交水稻, 2007, 22(4): 62-66, 70.
Zhong X H, Huang N R, Zheng H B, et al. Effect of nitrogen application timing on grain yield, nitrogen uptake and use efficiency of hybrid rice in south China[J]. Hybrid Rice, 2007, 22(4): 62-66, 70.
- [4] 刘巽浩, 陈卓. 对氮肥利用效率若干传统观念的质疑[J]. 农业现代化研究, 1990, (4): 28-34.
Liu X H, Chen F. Query on nitrogen use efficiency of some traditional ideas[J]. Research of Agricultural Modernization, 1990, (4): 28-34.
- [5] 杨宪龙, 同延安, 路永莉, 等. 农田氮肥利用率计算方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2203-2212.
Yang X L, Tong Y A, Lu Y L, et al. Research advances in the calculating method of nitrogen use efficiency (NUE) in cultivated lands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2203-2212.
- [6] 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价[J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 76-81.
Li S Q, Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dryland agro-ecosystem[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(1): 76-81.
- [7] 沈善敏. 关于肥料利用率的猜想[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 781-782.
Shen S M. A conjecture on the fertilizer recovery measurement by field experiment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,

- 16(5): 781–782.
- [8] 田昌玉, 林治安, 左余宝, 等. 氮肥利用率计算方法评述[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1531–1536.
Tian C Y, Lin Z A, Zuo Y B, *et al.* Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1531–1536.
- [9] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 216–225.
Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 216–225.
- [10] 巨晓棠. 氮肥有效性的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921–933.
- [11] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281–296.
Ju X T, Gu B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281–296.
- [12] 欧盟氮素专家组 (白由路译). 氮素利用效率—农业和食物系统中的氮素利用指标[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.
European Expert Group (Translated by Bai Y L). Nitrogen use efficiency—Nitrogen application indexed in agriculture and food systems[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2018.
- [13] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778–783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783.
- [14] 宇万太, 周桦, 马强, 沈善敏. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响——兼论作物氮肥利用率[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 90–96.
Yu W T, Zhou H, Ma Q, Shen S M. Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 90–96.
- [15] 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.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192–197.
- [16] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy Sciences USA*, 2013, 110(45): 18185–18189.
- [17] 杨宪龙, 路永莉, 李茹, 等. 小麦–玉米轮作体系多年定位试验中作物氮肥利用率计算方法探讨[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3514–3520.
Yang X L, Lu Y L, Li R, *et al.* Discussion on the calculation method of nitrogen use efficiency (NIUE) in long-term field experiments under wheat and maize rotation systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3514–3520.
- [18] 尹兴, 张丽娟, 刘学军, 等. 河北平原城市近郊农田大气氮沉降特征[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 698–710.
Yin X, Zhang L J, Liu X J, *et al.* Nitrogen deposition in suburban croplands of Hebei Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(4): 698–710.
- [19] 田昌玉, 孙文彦, 林治安, 等. 氮肥利用率的问题与改进[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 9–16.
Tian C Y, Sun W Y, Lin Z A, *et al.* Problems and improvements of recovery efficiency of applied N[J]. *Chinese Soil and Fertilizers*, 2016, (4): 9–16.
- [20] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 彭正萍. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1964–1972.
Zhang L J, Ju X T, Zhang F S, Peng Z P. Movement and after effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964–1972.
- [21] Wu H Y, Song X D, Zhao X R, *et al.* Accumulation of nitrate and dissolved organic nitrogen at depth in a red soil critical zone[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 1175–1185.
- [22] Wang Y C, Ying H, Yin Y L, *et al.* Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 657: 96–102.