

肥效评价的生态平衡施肥理论体系、指标体系及其实证

侯彦林

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:根据生态平衡施肥理论和实践,在综合评价肥料利用率及其算法前提下,提出了肥效评价的生态平衡施肥理论体系和指标体系,并进行了实证。理论体系包括:(1)以生态平衡施肥的多目标优化施肥为核心内容,即生态平衡施肥是以适宜的肥料成本、保证粮食产量和品质、持续培肥或保持土壤肥力平衡、减少施肥污染的多目标优化;(2)从操作上定义了多个评价指标,并可通过普通肥料田间试验求算;(3)指标体系包括评价肥效和指导施肥双重功能;(4)确立了肥效评价指标体系建立的方法。指标体系包括4方面9项指标:①用产量评价的指标有肥料转化率、最低肥料转化率、最高肥料转化率、平均肥料转化率;②考虑对环境负面影响的指标有肥料离土率、生态施肥量上限;③考虑土壤培肥的指标有培肥施肥量下限;④考虑土壤和肥料共同作用的指标有土壤-肥料养分表观转化率和土壤-肥料养分表观离土率。

关键词:肥料利用率;肥料转化率;生态平衡施肥;理论体系;指标体系

中图分类号:S147.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1257-10

Theory System, Index System of Ecological Balanced Fertilization and Demonstration for Fertilizer Efficiency Evaluation

HOU Yan-lin

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Theory and index systems of fertilizer efficiency evaluation were demonstrated and proposed according to the theory and practice of ecological balanced fertilization under synthesize evaluate fertilizer use efficiency and its calculation method. The theory system of fertilizer efficiency evaluation contained: (1) Multi-target optimize fertilization of ecological balanced fertilization was core content, which means reasonable fertilizer cost, the grain yield and quality can be ensured, sustaining fertilization or maintaining the balance of soil fertility, reducing fertilization pollution; (2) Multi-valuation indexes were defined under operational level and those indexes could be calculated by general fertilizer field experiments; (3) The index system contained fertilizer efficiency evaluation and decision fertilization functions; (4) Method of fertilizer efficiency evaluation index system establishment was established. The index system of fertilizer efficiency evaluation contained four aspects and nine indexes: ① The index valued by yield contains fertilizer yield (FY), minimum fertilizer yield (Min-FY), maximum fertilizer yield (Max-FY) and average fertilizer yield (A-FY). ② The index for considering environmental side effect contained fertilizer leave rate (FLR) and upper limit of ecological fertilization amount (UL-EFA). ③ The index for considering soil fertilization was lower limit of soil fertilization amount (LL-SFA). ④ The index for considering the interaction of soil and fertilizer contains soil-and fertilizer apparent yield (S-FY) and soil-and fertilizer apparent leave rate (S-FLR).

Keywords: fertilizer use efficiency; fertilizer yield; ecological balanced fertilization; theory system; index system

肥料利用率是伴随化学肥料问世的概念和定义,对评价化学肥料功效具有重要的历史和现实意义,目前仍然作为评价化学肥料效果的主要指标而被广泛使用。随着全球性的人口、资源、生态环境等一系列交

叉问题的出现和农业生产者、科研工作者的广泛实践,越来越多的专业研究者认识到肥料利用率的定义和试验方法不甚科学,难以指导生产实践^[1-13]。更为严重的是,如果肥料利用率存在严重的理论和方法问题,势必要对国家肥料资源及其生产、贸易、种植业成本、土壤培肥和面源污染等宏观问题产生深刻和深远的影响。假如目前的肥料利用率及其内涵不能很好地评价肥料功效和科学地指导施肥,那么它就失去了其应有的科学意义和实用价值。在当前积累大量的试验和观察数据基础上,如何对肥料利用率的科学性和实

收稿日期:2011-06-21

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目(WN-2011-8)

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林公主岭人,博士,研究员,主要研究方向为生态平衡施肥、粮食产量预测、面源污染预测、数据挖掘和农业信息技术研究。E-mail: ylhoul@263.net

用性进行评价将是一项带有挑战性和创新性的研究工作。同时,探索使用新的概念和试验方法评价肥料功效的研究工作也迫在眉睫。

现代施肥已经到了多目标施肥阶段,即生态平衡施肥阶段,它是以适宜的肥料成本、保证粮食产量和品质、持续培肥或保持土壤肥力平衡、减少施肥污染的多目标优化^[14-20]。传统的肥料利用率概念由于其自身定义和试验方法的致命问题已不再适应施肥的多目标需求,因此,有必要提出和建立一整套新的评价肥料功效的理论体系、指标体系和试验方法。

1 肥料利用率的定义、算法、应用及其评价

1.1 肥料利用率的定义和算法

在传统的施肥理论中,肥料利用率是评价肥效的重要指标之一,也是重要的施肥参数之一。我国目前肥料利用率与农业发达国家相比较低,普遍认为氮肥的当季利用率为30%~40%(另外残留在土壤中的占25%~35%,离开土体的占20%~60%),磷肥的当季利用率为10%~25%,钾肥的当季利用率为50%~60%^[3-6]。肥料利用率的定义是:(当季)作物吸收来自所施肥料的养分占所施肥料养分总量的百分率,即:

(当季)肥料利用率(%)=(单位面积施肥区农作物吸收某养分量-单位面积缺素区农作物吸收某养分量)÷单位面积某养分施用量×100% (1)

1.2 肥料利用率的应用

1.2.1 养分平衡法^[16]

肥料利用率通常和土壤养分表观利用率一起使用来确定推荐施肥量。代表性的是养分平衡法,也称之为目标产量法,其基本原理如下:

某养分的合理用量=(作物目标产量需养量-土壤养分供应量)÷该养分利用率 (2)

土壤养分供应量=土壤有效养分含量×土壤有效养分(当季)表观利用率 (3)

土壤有效养分表观利用率=缺素区产量带走的养分量÷土壤耕层季前有效养分含量 (4)

作物目标产量需养量=目标产量×该目标产量下每百公斤子粒或鲜重需养量 (5)

每百公斤子粒或鲜重需养量(Y)=f(产量)(多数作物:Y随产量增加而增加) (6)

肥料利用率事先通过田间试验按式(1)求得。

这一方法的优点是概念清晰,容易掌握,主要根据作物产量需养量和土壤养分供应量之差来求算施肥量,主要施肥参数为土壤有效养分表观利用率和肥

料利用率,它与后述的地力差减法属一类施肥模型。从理论上模型似乎正确,但是两个利用率参数是通过缺素区作为对照而获得的,本身就不科学且参数变幅较大和不稳定,主要原因是缺素区和施肥区土壤养分的供应量相等的假设是错误的^[16-17,21-23],在国内测土配方施肥工作中几乎不被使用。但为了进行评价,有必要把实际工作中常用的公式列出,见式(7)~式(10):

肥料需要量(kg·hm⁻²)=[(目标产量 kg·hm⁻²×作物单位产量养分吸收量 kg·kg⁻¹)-(土壤有效养分测定值 mg·kg⁻¹×2.25×土壤有效养分表观利用率%)]÷(肥料养分含量%×肥料当季利用率%) (7)

式中,2.25是取每公顷地0~20 cm土壤平均重量为225万kg而求得的换算系数(具体土壤可因地制宜确定)。上述文字表达式也可以写成如下公式:

$W_{\text{input}}=(W_{\text{output}}-2.25 \times T_n \times k_{\text{soil}}) \div k_{\text{fer}}$ (8)

但, $k_{\text{soil}}=f(\text{施肥量, 土壤养分含量, 气候} \dots)$ (9)

$k_{\text{fer}}=f(\text{施肥量, 土壤养分含量, 气候} \dots)$ (10)

现在分析式(8)存在的问题:土壤有效养分表观利用率和肥料养分利用率是相互影响的变量,此消彼涨,只要有一个参数确定存在问题就会影响到另外一个参数,施肥参数间如此密切相关决定了同时使用这两个施肥参数很难确定出合理的施肥量;参数的求得建立在缺素区土壤有效养分供应量基础上,而施肥区的土壤有效养分供应量一般比缺素区的高5%~8%^[24-25];没有考虑到土壤有效养分的平衡、培肥或消耗,即多年的变化;耕层养分矿化或释放量和耕层以下养分供应量是被折算在耕层有效养分含量之中的^[14,16-17],因此土壤有效养分利用率有时高达100%以上,故称之为“表观利用率”。如:假设缺P区季前土壤有效P₂O₅含量为10.0 mg·kg⁻¹,季后为5.0 mg·kg⁻¹,玉米产量为4 500 kg·hm⁻²,百公斤玉米子粒需P₂O₅按1.0 kg计算,则玉米带走45.0 kg·hm⁻²的P₂O₅,表层土壤提供P₂O₅为11.3 kg·hm⁻²,则(45.0-11.3)之差的33.7 kg·hm⁻²的P₂O₅来自于表层无效磷的释放和表层以下有效磷的提供,但按表层计算则土壤P₂O₅的表观利用率为45.0÷22.5即200.0%。

1.2.2 地力差减法

该方法的核心内容是:假设缺素区产量所吸收的养分全部来自土壤,同时假设施肥区土壤提供的养分和缺素区土壤提供的养分数量相等,因此,

肥料需要量(kg·hm⁻²)=[作物单位产量养分吸收量 kg·kg⁻¹×(目标产量 kg·hm⁻²-缺素区产量 kg·hm⁻²)]

$\div(\text{肥料养分含量}\% \times \text{肥料当季利用率}\%)$ (11)

该方法的优点是不需要进行土壤测试,避免了养分平衡法的缺点。它是利用缺素区试验估算土壤养分供应量,再利用肥料利用率求算施肥量,是目标产量法的一种变形。但是使用缺素区土壤养分供应量代替正常施肥区的土壤养分供应量,仅此一点,就足以使该方法在理论上被否定^[14,16-17]。

现假设:有一正常施氮区的施N量为 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,生产玉米 $7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,按带走 $150.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{N}$ 计算;不施N区按生产 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 玉米带走 $90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{N}$ 计算;增加 $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 玉米按 $60.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{N}$ 计算,则肥料当季利用率为 $60.0 \div 180.0$ 即33.3%。这个结果是错误的,原因在于施肥区土壤提供的N一般会大于 $90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 肥料利用率及算法的科学性和实用性质疑

为了更好地说明肥料利用率及其试验方法的实质弊端,先列出土壤-肥料-作物系统养分转移矩阵,见表1^[14,17]。其中, W_i 为单位面积季前土壤某养分总量;这里假设 W_{input} 为单位面积一季或多季作物某养分的总施肥量, $W_{\Delta\text{input}}$ 为单位面积一季或多季某养分除肥料外的总的外源量(包括干湿沉降、灌溉、雨水、种子、生物固氮等,秸秆还田情况下可按有机肥对待并折算养分; $W_{\Delta\text{input}}$ 也包含一季或多季来自于土体下层的养分和从土体交换到下层养分的净差值,或为正或为负或为零);一般地, $W_{\Delta\text{input}}$ 相对数值不大,在此将其纳入施肥量一并考虑,并设 $W_{\text{in}}=W_{\text{input}}+W_{\Delta\text{input}}$; W_j 为季后或多季后单位面积上土壤某养分总量; W_{yield} 为一季或多季作物单位面积带走的某养分总量; W_{leave} 为单位面积一季或多季离开所研究土体的某养分总量(这里需要扣除从土体交换到下层养分的量,因为其已含在 $W_{\Delta\text{input}}$ 中)。

肥料利用率的定义从表面上看似乎是科学的和合理的,如果采用示踪方法进行肥料田间试验,可以测出 $W_{\text{in} \rightarrow \text{yield}}$ 的含量,获得当季肥料利用率的结果也是符合其定义的。但是如果使用常规的肥料田间试验的缺素区作为对照,通过式(1)差减法求出的肥料利用率就是不真实的参数了。因为施肥区和不施肥区的土壤养分供应量是不同的,这已被诸多示踪试验所证

实,一般地,正常施肥区的土壤养分供应量高于缺素区5%~8%^[24-25]。说明如下:由于存在肥料的正激发效应,不施肥区的 $W_{(i \rightarrow \text{yield})}$ 和不施肥区的 $W_{(i \rightarrow \text{yield})}$ 在数值上是不等的。同时,肥料利用率按当季计算忽略了肥料在后季的累加贡献和培肥作用,即 $W_{\text{in} \rightarrow j}$ 在以后季中不同程度地有效,因此,肥料利用率不能科学地指导施肥,甚至误导肥料的浪费,导致环境的污染。再者,从长时间来看也低估了肥料对土壤的培肥作用,即 W_{in} 对 $W_{\text{in} \rightarrow j}$ 的累加效应,如最近30多年来全国土壤磷的增加就是明显的实例。目前在全国开展的测土配方施肥工作中,几乎没有人再使用肥料利用率(W_{yield} 减去缺素区的 $W_{i \rightarrow \text{yield}}$ 再除以 W_{in})和土壤养分表观利用率(缺素区的 $W_{i \rightarrow \text{yield}}$ 与 W_i 中有效养分含量之比)这两个过去一直被认为是十分重要的施肥参数来计算推荐施肥量了。实践中基层技术推广工作者多在质疑:最近十多年来,在大致合理的施氮量范围内,土壤全氮几乎不再减少甚至有所增加,即 W_i 与 W_j 变化不大即与 $W_{i \rightarrow j}$ 近似相等,表观上 $W_{\text{in} \rightarrow j} \approx 0$, $W_{i \rightarrow \text{yield}}$ 表观上也近似等于0。因此,作物带走的养分量 W_{yield} 表观上看主要是来自当季的N肥和外源N即 W_{in} ,但是外源N量一般不是很大,据此估算的N肥当季利用率应该是 $W_{\text{yield}}/W_{\text{in}}$,就全国非豆科大田作物而言,目前施 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的纯N生产玉米 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是容易实现的^[26],带走的N大约为 $120.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,估算的N肥当季平均利用率应该在60%左右。

当前的肥料利用率低估了肥料对土壤的培肥作用。就我国目前土壤磷而言,30年前开始使用磷肥,当时全国土壤平均有效 P_2O_5 含量不足 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而目前为 $20.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,平均每年至少提高 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,对改善土壤磷库状况起到了良好的培肥作用,这已成不争的事实。如果按多年肥料对粮食的贡献来分析,如果肥料多年的利用率能够稳定在50%以上的话,至少对环境的负面影响没有目前普遍认为的大,所以按目前的肥料利用率计算或许确实夸大了肥料对环境的污染作用。如果全国氮肥平均利用率能够达到50%以上,则今后氮肥的需求量不会增加的太快,这对制定肥料工业发展计划、国际贸易和国家相关政策都将产生巨大的影响。

既然肥料利用率在理论和应用上存在致命缺陷,那么用什么样的指标评价肥料效果更科学呢?我们的观点是:应该以土壤-作物-肥料系统的养分循环为研究对象,从养分相互转化关系入手,制定可以通过普通田间试验即可获得的评价肥效和指导施肥的指标,

表1 土壤-肥料-作物系统养分转移矩阵

Table1 Transfer matrix of nutrient in soil-fertilizer-crop system

	W_j	W_{yield}	W_{leave}
W_i	$W_{i \rightarrow j}$	$W_{i \rightarrow \text{yield}}$	$W_{i \rightarrow \text{leave}}$
W_{in}	$W_{\text{in} \rightarrow j}$	$W_{\text{in} \rightarrow \text{yield}}$	$W_{\text{in} \rightarrow \text{leave}}$

该指标结合其他指标要能够反映施肥成本、产量、品质、土壤培肥、面源污染等方面需求,从而建立一整套以该指标为核心的评价肥效和指导施肥的指标体系,实现施肥的多目标优化,完成生态平衡施肥的总目标。

2 肥效评价的生态平衡施肥理论体系和指标体系的建立

2.1 土壤-肥料-作物系统养分平衡模型的建立^[14]

为了建立新的肥料功效评价指标体系,根据表1和质量守恒定律获得式(12)~(14),即“全量养分的通用施肥模型”:

$$W_{in} + W_i = W_{yield} + W_{leave} + W_j \quad (12)$$

$$W_{in} + (W_i - W_j) = W_{yield} + W_{leave} \quad (13)$$

$$W_{in} = W_{yield} + W_{leave} + (W_j - W_i) \quad (14)$$

变换式(13)得,

$$W_{yield} / [W_{in} + (W_i - W_j)] + W_{leave} / [W_{in} + (W_i - W_j)] = 1 \quad (15)$$

定义为:土壤-肥料养分转化率+土壤-肥料养分分离土率=1

变换式(14)得,

$$W_{yield} / W_{in} + W_{leave} / W_{in} + (W_j - W_i) / W_{in} = 1 \quad (17)$$

定义为:肥料表观转化率+肥料表观离土率+肥料表观土壤培肥率=1

如果是多年的情况,则:

$$\Sigma W_{in} + (W_i - W_j) = \Sigma W_{yield} + \Sigma W_{leave} \quad (19)$$

根据式(19)可以进行类似式(15)和(17)的变换,可以获得包括多种气候条件下的多年平均转化率、离土率、培肥率,对于评价肥料的功效和指导施肥具有重要的理论和实用价值,相应地命名如下。 $\Sigma W_{yield} / [\Sigma W_{in} + (W_i - W_j)]$:多年平均土壤-肥料表观转化率; $\Sigma W_{leave} / [\Sigma W_{in} + (W_i - W_j)]$:多年平均土壤-肥料表观离土率; $\Sigma W_{yield} / \Sigma W_{in}$:多年平均肥料表观转化率; $\Sigma W_{leave} / \Sigma W_{in}$:多年平均肥料表观离土率; $(W_j - W_i) / \Sigma W_{in}$:多年平均肥料表观土壤培肥率。可以结合具体年限进行深入分析。

2.2 指标的理论解析

2.2.1 肥料转化率、肥料离土率、生态施肥量上限、培肥施肥量下限

以式(17)为例进行解析:现假设有一肥料长期定位试验,设置不同施肥处理区,P和K等肥底相同,只是N的用量从15.0 kg·hm⁻²开始每增加15.0 kg·hm⁻²为1个处理,假设当增加到180.0 kg·hm⁻²左右时,土壤全N基本保持平衡^[26],再从180.0 kg·hm⁻²逐渐增加到450.0 kg·hm⁻²。已知每个小区的 ΣW_{in} 、 W_i 、 W_j 、

ΣW_{yield} ,差减法可求出 ΣW_{leave} 。为方便说明,取多年平均数据,以下不再使用累加数据,其中 $(W_j - W_i)$ 除以年限得到的是多年平均变化率。现就一般规律进行纯理论的分析。

2.2.1.1 施肥量(W_{in})与肥料表观转化率(W_{yield} / W_{in})关系

当 W_{in} 处于15.0 kg·hm⁻²到180.0 kg·hm⁻²这个区间时,随着 W_{in} 的逐渐增加, W_{yield} / W_{in} 以大于1的数据在逐渐降低,这里 W_{yield} 从土壤吸收的养分量和从肥料吸收的养分量此消彼涨;当 $W_i = W_j$ 时, $W_{yield} / W_{in} + W_{leave} / W_{in} = 1$,此时的 W_{yield} / W_{in} 即为在合理施肥量情况下多年平均肥料转化率,而在此之前的 W_{yield} / W_{in} 中的 W_{yield} 里的养分也有土壤的贡献;当 W_{in} 从180.0 kg·hm⁻²增加到450.0 kg·hm⁻²的过程中, W_{yield} / W_{in} 逐渐减小。

2.2.1.2 施肥量(W_{in})与肥料表观离土率(W_{leave} / W_{in})关系

当 W_{in} 处于15.0 kg·hm⁻²到180.0 kg·hm⁻²这个区间时,随着 W_{in} 的逐渐增加, W_{leave} / W_{in} 开始会很小,只有当 W_{in} 大到一定时, W_{leave} / W_{in} 才会有所表现;当 $W_i = W_j$ 时, $W_{yield} / W_{in} + W_{leave} / W_{in} = 1$,此时的 W_{leave} / W_{in} 即为在合理施肥量情况下多年平均肥料离土率,也即在合理施肥量范围内的合理离开土体的养分率,而在此之前的 W_{leave} / W_{in} 中的 W_{leave} 里的养分也有土壤养分的贡献;当 W_{in} 从180.0 kg·hm⁻²增加到450.0 kg·hm⁻²的过程中, W_{leave} / W_{in} 或许开始变化不大,以后或呈现明显的递增。

2.2.1.3 施肥量(W_{in})与肥料表观土壤培肥率 $[(W_j - W_i) / W_{in}]$ 关系

当 W_{in} 处于15.0 kg·hm⁻²到180.0 kg·hm⁻²这个区间时,随着 W_{in} 的逐渐增加, $(W_j - W_i) / W_{in}$ 是负数,比例逐渐降低;当 $W_i = W_j$ 时, $W_{yield} / W_{in} + W_{leave} / W_{in} = 1$,此时的 $(W_j - W_i) / W_{in}$ 即为多年土壤养分平均状态,而在此之前的 $(W_j - W_i) / W_{in}$ 中主要是地力下降消耗土壤养分过程;当 W_{in} 从180.0 kg·hm⁻²增加到450.0 kg·hm⁻²的过程中, $(W_j - W_i) / W_{in}$ 逐渐增大,表现为土壤养分积累的培肥过程。

2.2.1.4 施肥量和土壤养分变化量 $[W_{in} + (W_i - W_j)]$ 与土壤-肥料养分表观转化率 $[W_{yield} / (W_{in} + (W_i - W_j))]$ 关系

当 W_{in} 处于15.0 kg·hm⁻²到180.0 kg·hm⁻²这个区间时,随着 W_{in} 的逐渐增加, $W_{yield} / [W_{in} + (W_i - W_j)]$ 以小于1的数值在逐渐降低;当 $W_i = W_j$ 时, $W_{yield} / W_{in} + W_{leave} / W_{in} = 1$,此时的 W_{yield} / W_{in} 即为多年肥料平均转化

率,而在此之前的 $W_{\text{yield}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 中的 W_{yield} 里的养分也有土壤的贡献;当 W_{in} 从 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $450.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的过程中, $W_{\text{yield}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 逐渐减小。

2.2.1.5 施肥量和土壤养分变化量 $[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 与土壤-肥料养分表观离土率 $[W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]]$ 关系

W_{in} 处于 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 到 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 这个区间时,随着 W_{in} 的逐渐增加, $W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 开始会很小,只有当 W_{in} 大到一定时, $[W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]]$ 才会有所表现;当 $W_i=W_j$ 时, $W_{\text{yield}}/W_{\text{in}}+W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}=1$, 此时的 $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 即为多年肥料平均离土率,是在合理施肥量范围内的合理离开土体的养分。而在此之前的 $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 中的 W_{leave} 里的养分也有土壤养分的贡献;当 W_{in} 从 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $450.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的过程中, $[W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]]$ 或许开始变化不大,以后或呈现递增。

通过以上分析,可以确定4个关键参数:

(1)当 $W_j=W_i$ 时可以确定:在合理施肥量情况下的“肥料(养分)转化率”(Fertilizer Yield, %, 简称 FY)和“肥料(养分)离土率”(Fertilizer Leave Rate, %, 简称 FLR);肥料转化率指在一定施肥量下连续进行3~5 a 以上肥料田间试验,当土壤某养分处于平衡或积累状态时,此时作物吸收的养分从表观上看全部都是来自于肥料,其数量与所施入肥料的养分(有时含外源养分)的比值就是肥料转化率,它是按生态平衡施肥理论定义的新概念,既可以是一季,也可以是多季的转化率。(2)将 $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 超标时的 W_{in} 定义为“生态施肥量上限”(Upper Limit of Ecological Fertilization Amount, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 简称 UL-EFA)^[27-28]。(3)将 W_j 刚好大于 W_i 的 W_{in} 定义为“培肥施肥量下限”(Lower Limit of Soil Fertilization Amount, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 简称 LL-SFA)。如果生态施肥量上限大于培肥施肥量下限,则两者之间的施肥量都是安全的;反之,即在培肥的过程中就将产生面源污染。

2.2.2 最低肥料转化率、最高肥料转化率、平均肥料转化率

进一步分析式(17):

当 $W_j>W_i$ 时,即可能在比较高的施肥情况下,原来土壤里的养分表观上未对作物提供养分,式(17)变成在高施肥量 W_{in} 下的式(18),即肥料表观转化率+肥料表观离土率+肥料表观土壤培肥率=1。

当 $W_j=W_i$ 时,即可能在比较合适的平衡施肥情况下,原来土壤里的养分表观上也未对作物提供养分,

式(17)变成在(平衡施肥) W_{in} 下的:肥料转化率+肥料离土率=1。

当 $W_j<W_i$ 时,即可能在比较低的施肥量情况下,原来土壤里的养分对作物提供了养分,式(17)变成在低施肥量 W_{in} 下的式(15)。 W_{yield} 和 W_{leave} 的养分都来自于土壤和肥料两部分,现在的问题是如何把它们区分开?

以上问题分3种情况分析,现假设: $W_{\text{in}}=180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{N}$, $(W_i-W_j)=90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{N}$, $W_{\text{yield}}=150.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{N}$, $W_{\text{leave}}=120.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{N}$ (差减法求得)。

A 按含量比例估算的肥料(平均)转化率:肥料一旦施入土壤就变成土壤养分的一部分,考虑多年的、表观的情况,将土壤里原来有的养分和施入的包括本季以前施入的养分一视同仁看待,则这两种养分被作物吸收和离开土体的量可以按其各自的含量比例估算。此例中,土壤 N 贡献量比例为 $90.0 \div 270.0 = 33.3\%$, 则,肥料(平均)转化率 $= [W_{\text{yield}}(150.0) - \text{土壤提供给作物的 N}(150.0 \times 33.3\%)] \div W_{\text{in}}(180.0) \approx 55.6\%$, 肥料(平均)离土率 $= [W_{\text{leave}}(120.0) - \text{土壤提供给离土的 N}(90.0 - 150.0 \times 33.3\%)] \div W_{\text{in}}(180.0) \approx 44.4\%$ 。

B 最低肥料转化率:认为离开土体的养分首先全部来自肥料,不够的部分再由土壤补充,土壤消耗掉的养分扣除离开土体的养分外全部提供给了作物,则,最低肥料转化率 $= [W_{\text{yield}}(150.0) - (W_i - W_j)(90.0)] \div W_{\text{in}}(180.0) \approx 33.3\%$

C 最高肥料转化率:认为离开土体的养分全部来自土壤,不够的部分再由肥料补充,则,离开的总量为 $120.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤提供离开的为 $90.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 肥料提供离开的为 $30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 则,最高肥料转化率 $= W_{\text{yield}}(150.0) \div W_{\text{in}}(180.0) \approx 83.3\%$ 。

结论:由长期定位试验或常规试验多个处理情况下可以获得以下指标:(1)当土壤养分处于平衡或积累的状态时,可以获得当季或多年平均肥料转化率;(2)当土壤养分处于消耗的状态时,可以获得最低肥料转化率(Minimum Fertilizer Yield, %, 简称 Min-FY)、最高肥料转化率(Maximum Fertilizer Yield, 简称 Max-FY)和平均肥料转化率(Average Fertilizer Yield, %, 简称 A-FY)。

2.3 指标体系

至此,获得了肥效评价的指标体系,包括4方面9项指标:第1类是用产量评价的指标,有肥料转化率、最低肥料转化率、最高肥料转化率、平均肥料转化率;第2类是考虑对环境负面影响的指标,有肥料离

土率、生态施肥量上限;第 3 类是考虑土壤培肥的指标,有培肥施肥量下限;第 4 类是考虑土壤和肥料共同作用的指标,有土壤-肥料养分表观转化率(Soil and Fertilizer Yield, %,简称 S-FY)和土壤-肥料养分表观离土率(Soil and Fertilizer Leave Rate, %,简称 S-FLR)。其他指标可以根据研究者和使用者的需要确定,在此不一一讨论。

施肥是多目标的,如何协调产量、品质、成本、土壤培肥和控制污染,是一个优化的过程,凡是能够达到高产水平(不一定是最高产)、能够保障品质、不显著增加或降低成本、能培肥或保持土壤肥力、减少污染的施肥量都是我们追求的,暂定义为生态施肥量,它应该是个范围,这个范围受气候、地貌、土壤、作物等因素影响而有所不同,其最大值就是生态施肥量上限。

生态平衡施肥指标体系见表 2。

2.4 肥料转化率的求算方法

2.4.1 肥料长期定位试验

当肥料长期定位试验能够获得 ΣW_{in} 、 W_i 、 W_j 、 ΣW_{yield} 时,即可通过差减法求出 ΣW_{leave} ,相关参数的求算方法如上文所述。

2.4.2 普通肥料田间试验方法

对于任何肥料田间试验,只要能够获得 W_{in} 、 W_i 、 W_j 、 W_{yield} 即可求出 W_{leave} ,然后可以按上文分析计算出各项指标。但是多数情况下 W_j 是没有测定的,此种情况下如何求算以上指标呢?

普通的肥料田间试验只能获得: W_{in} 、 W_{yield} 、 W_i ,一般不知道的 W_{leave} 和 W_j 。

假设有 7 个处理情况下,根据式(1)可以分别列

出如下方程:

$$W_{j1}+W_{leave1}=W_{in1}+W_i-W_{yield1}=A \tag{20}$$

$$W_{j2}+W_{leave2}=W_{in2}+W_i-W_{yield2}=B \tag{21}$$

$$W_{j3}+W_{leave3}=W_{in3}+W_i-W_{yield3}=C \tag{22}$$

$$W_{j4}+W_{leave4}=W_{in4}+W_i-W_{yield4}=D \tag{23}$$

$$W_{j5}+W_{leave5}=W_{in5}+W_i-W_{yield5}=E \tag{24}$$

$$W_{j6}+W_{leave6}=W_{in6}+W_i-W_{yield6}=F \tag{25}$$

$$W_{j7}+W_{leave7}=W_{in7}+W_i-W_{yield7}=G \tag{26}$$

W_{j1} 为施肥过少的处理, W_{j2} 为施肥较少的处理, W_{j3} 为施肥稍少的处理, W_{j4} 为施肥中等的处理, W_{j5} 为施肥稍多的处理, W_{j6} 为施肥较多的处理, W_{j7} 为施肥过多的处理。取 7 个处理的 W_j 之和的平均应该大致等于 W_{j4} ,它大致应该等于 W_{i0} 。于是, $W_{leave4}=D-W_{j4}=D-W_{i0}$ 。即在施肥量中等情况下,由 $W_{j4}+W_{leave4}=W_{in4}+W_i-W_{yield4}$ ($W_{j4}=W_{i0}$) 得到: $W_{in4}=W_{yield4}+W_{leave4}$ 。也可以用长期定位试验大致标定一下 W_{in4} 是否可以作为当地近似的合理施肥量标准,如果可以, $W_{yield4}/W_{in4}+W_{leave4}/W_{in4} \approx 1$ 成立,即,肥料养分转化率+肥料养分离土率 ≈ 1 。于是可以得出结论:中等施肥量或合理施肥量情况下可近似地求出肥料转化率。

2.5 肥效评价指标体系建立方法

2.5.1 利用已有肥料田间试验数据的方法

在掌握足够的肥料田间试验数据情况下,首先寻求某作物某种施肥模式的适宜施肥量 W_{in} ;然后确定 W_i (如有 W_j 最为理想,也可参考长期定位试验数据);估算 W_{yield} ;最后差减方法求出 W_{leave} 。根据不同试验所能提供的数据可以计算出肥料转化率、最低肥料转化率、最高肥料转化率、平均肥料转化率、肥料离土率、生态施肥量上限、培肥施肥量下限、土壤-肥料表观转

表 2 不同土壤养分状态下生态平衡施肥指标体系

Table2 The index system of ecological balanced fertilization under different soil nutrient conditions

类型 Type	指标 Index	土壤全量养分状态 State of Soil Total Nutrient			
		平衡 ($W_j=W_i$) Balance	积累 ($W_j>W_i$) Accumulate	消耗 ($W_j<W_i$) Consumption	
1	肥料转化率	FY	★	★	—
1	最低肥料转化率	Min-FY	—	—	★
1	最高肥料转化率	Max-FY	—	—	★
1	平均肥料转化率	A-FY	—	—	★
4	土壤-肥料表观转化率	S-FY	—	—	★
2	肥料离土率	FLR	★	★	—
4	土壤-肥料表观离土率	S-FLR	—	—	★
2	生态施肥量上限	UL-EFA	☆	★	—
3	培肥施肥量下限	LL-SFA	☆	★	—

注:“★”代表此养分状态下通过常规方法可求该指标;“☆”代表此养分状态下通过常规方法可求或不可求该指标;“—”代表此养分状态下通过常规方法不可求该指标。

化率、土壤-肥料表观离土率以及其他需要确定的参数中的若干个参数或指标。

2.5.2 在没有足够数据情况下的方法

如果某作物某种施肥模式没有任何数据或没有足够的数据确定适宜施肥量,那么要做围绕适宜施肥量的多个肥料田间试验,理论上没必要设置空白区,试验最好在同一地块连续进行 3~5 a 以上,并及时测定土壤全量养分含量。当具备足够的试验数据后,应用 2.5.1 的方法即可获得相应参数。

2.5.3 在具有大量数据情况下的方法

如果具有某区域某作物的大量肥料田间试验数据,可以分别计算出每个试验的相应参数,把众多的参数与土壤属性进行统计,可以建立起参数函数从而实现空间预测和获得参数空间预测图。

2.6 肥料转化率和肥料利用率的综合比较

根据以上分析,将肥料利用率和肥料转化率涉及的多项内容进行比较,如表 3。理论上,评价肥料利用率的参考系是缺素区土壤养分供应量;评价肥料转化率的参考系是土壤全量养分变化量,它是以生态平衡施肥理论为基础,将土壤-肥料-作物-环境作为一个系统考虑,它不需要特殊的示踪方法,更不需要空白区和缺素区作为对照,而只需要 3~5 a 定位试验以反映某施肥量情况下土壤-肥料-作物-环境之间的养分稳定关系。方法上,肥料转化率求算所需要的原始试验数据可以为以前任何田间试验数据,这样就实现了信息共享,能够在短时间内按肥料转化率定义对肥料功效进行重新评价,并建立新理论下的测土配方施肥指标体系。实践上,肥料转化率定义和算法来源于实际工作,它就是为了解决实际问题而提出的,其应

用将在后文详细介绍。

2.7 肥效评价的生态平衡施肥理论体系和指标体系的科学意义和实践意义

李比希的矿质营养学说带来了化肥工业的兴起,期望肥料转化率的定义和算法能够改变人们过去和现在对肥料利用率偏低的认识,重新制定化肥工业规划、调整外贸政策,重新审视配方施肥理论和建立新的评价施肥和指导施肥的指标系统,达到生态平衡施肥的目的。

如果按中等施肥量水平施肥可以保持土壤养分基本平衡的话,需要培肥的就多施一些,需要耗养的就少施一些,这样可以更合理地施肥。肥料养分转化率可以改变过去对肥料利用率偏低的看法,从而能够减少施肥量,降低施肥成本和面源污染的风险,也能在保证产品质量的同时,使产量保持在相对较高的水平上。

3 肥效评价的生态平衡施肥指标体系的实证

根据公开发表的资料和掌握的数据选择几类若干案例,验证以上理论的正确性和说明具体应用过程。

3.1 依据天津市现行的施肥指标体系估算的肥料转化率案例

实证 1:以 2011 年天津市测土配方施肥指标体系与第二次土壤普查资料为依据,对全市冬小麦-夏玉米轮作周期中平均产量情况下的氮肥转化率进行估算。取冬小麦平均产量 5 250 kg·hm⁻²,适宜施 N 量 255.0 kg·hm⁻²;取夏玉米平均产量 7 500 kg·hm⁻²,适宜施 N 量 217.5 kg·hm⁻²;外源 N 假设为最大按 50.0

表 3 肥料利用率和肥料转化率的比较

Table 3 Comparison of fertilizer yield and fertilizer use efficiency

项目 Item	肥料利用率 Fertilizer use efficiency(FUE)	肥料转化率 Fertilizer yield(FY)
目的 Purpose	产量	生态平衡施肥五方面目的优化
定义 Definition	主要考虑产量	考虑土壤-作物-肥料-环境系统
方法 Method	缺素区作对照求算	任何情况下都可算(当 $W_1 < W_2$ 时为纯转化率)
参数 Parameter	不稳定	形成 4 方面 9 指标的参数体系,稳定
实用性 Practical	不实用	实用
当季利用率 FUE	10%~80%	40%~80%
产量 Yield	追求高产	追求最佳产量
品质 Quality	不一定佳	品质不差
成本 Cost	相对高	成本适宜
培肥 Fertilization	无法评价	可评价
污染 Pollution	夸大了对环境的负面影响	客观评价离开土体的养分
结论 Conclusion	难以评价肥效和指导施肥	可客观地评价肥效和指导施肥

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算^[29-30];每个轮作周期施 N 量为 $480.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 作物带走的 N 为 $255.0(12\ 750 \div 100 \times 2.0) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 全市全 N 量大于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的面积由第二次土壤普查的 16.7% 增加到目前的 61.8%, 说明施肥总体是培肥的。根据以上数据, 可以计算出当前冬小麦-夏玉米轮作周期 N 肥转化率约为: $255.0 \div (480.0 + 50.0) = 48.1\%$, 同时土壤全 N 量还在持续地增加。以上案例说明: 区域统计资料验证了肥料转化率定义和算法的正确性。

3.2 示踪试验案例

实证 2: 李林等^[31]的结果表明: 夏玉米一季氮素平均吸收利用率、土壤残留率、损失率分别为 36.0%、47.1%、16.9%。

实证 3: 茹德平等^[32]的结果表明: 施氮有效期可连续 3 季作物, 累计利用率为 52.1% (施 N 量为 $750.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 3 季分别为 38.4%、9.5%、4.2%)~60.4% (施 N 量为 $375.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 3 季分别为 43.1%、13.8%、3.5%)。

实证 4: 武金果等^[33]的结果表明: 土壤-小麦系统中约 1/2 的化肥氮被植株回收。

以上 3 个案例都是针对 N 素的, 可以得出: N 肥当季利用率为 30% 以上; 当季土壤残留很高; 残留的养分后季有效。研究表明: 土壤残余氮后效高达 25% 以上^[34-35]。

3.3 长期定位试验案例

实证 5: 雷永振等^[36]的结果表明: 只有在施高量钾时 (K_2O $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 才能使土壤钾得到补充并有盈余。10 a 施钾总量为 $2\ 250.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 吸钾总量为 $1\ 514.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 钾肥利用率为 22.4% (NP 区吸钾总量为 $1\ 010.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。由于土壤钾素盈余 $735.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可以按上文提出的肥料转化率计算方法求得钾肥转化率约为: $1\ 514.6 \div 2\ 250.0 = 67.3\%$ 。

实证 6: 王胜佳等^[37]的 10 a 长期施肥的定位试验结果表明: 空白区吸收养分为 $219.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在 MNPK 区, 施 N 为 $427.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 吸收为 $363.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 盈余 $63.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 按传统的肥料利用率计算得 33.8%; 按我们提出的肥料转化率方法计算的肥料(平均)转化率为 85.1%, 因为 10 a 土壤全 N 含量由 $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $3.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这足以说明土壤从表观上没有把氮贡献给作物。当然如果考虑外源 N, 氮肥(平均)转化率可能略低一些, 但是至少也应为常规算法的 2 倍以上。

实证 7: 王改玲等^[38]的 18 a 长期定位试验结果表明: 试验前耕层土壤全 N 含量为 $0.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 18 a

后 N_0P_0 、 N_{180}P_0 、 $\text{N}_{180}\text{P}_{90}$ 、 $\text{N}_{180}\text{P}_{180}$ 4 个处理土壤全 N 含量分别为: 0.73 、 0.87 、 0.85 、 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 说明土壤 N 是积累的。已知 N_0P_0 、 N_{180}P_0 、 $\text{N}_{180}\text{P}_{180}$ 吸氮量分别为: 37.2 、 34.9 、 $34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_{180}P_0 、 $\text{N}_{180}\text{P}_{90}$ 、 $\text{N}_{180}\text{P}_{180}$ 的吸氮量分别为: 90.1 、 124.6 、 $118.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 按传统的肥料利用率计算得到氮肥的利用率分别为: 29.4% 、 49.8% 、 46.4% 。按我们提出的肥料转化率方法计算的肥料(平均)转化率(以 $180.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{N}$ 为基数)分别为: 50.1% 、 69.2% 、 65.6% 。同时也说明无 P 氮的转化率低, 过多施 P 也降低转化率。

实证 8: 黄绍敏等^[39]的结果表明: 该试验为 7 个小麦品种、15 a 9 个不同施肥方式的长期定位试验, 研究了小麦对氮、磷、钾肥的当季和累积利用率; 在施氮量相同 ($165.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 情况下, NPK 和 NP 处理小麦的氮、磷利用率分别为 70.3% 和 68.4% 及 48.3% 和 46.0% 。NP、NPK、MNPK、SNPK (S 代表秸秆) 处理的肥料利用率有累加效应, 其中氮肥第 1~5 a 累积较快, 6 a 后稳定在 48.9% ~ 70.0% ; 磷肥 15 a 一直累积, 1~8 a 累积速度快, 9 a 后较慢; 钾肥 1~5 a 累积较快, 5~7 a 波动, 8 a 后稳定在 35.0% ~ 39.0% 。

长期定位试验同样验证了肥料转化率定义和算法的正确性。

3.4 其他案例

实证 9: 据朱兆良报道全国平均氮素利用率在 30% ~ 41% 之间^[40], 同时他从农田氮素平衡估算出 N 利用率从 1979 年的 57% 下降到 1998 年的 43% ^[41]。巨晓棠^[15]示踪法得出, 施氮量为 $120.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 小麦当季利用率为 44.5% ; 施氮量在 $360.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 只有 26.9% ; 氮素在后茬的利用率不足 8% ^[42]。李永宾认为, 优化施氮模式下氮肥当季利用率最高可达到 56.3% ~ 70.30% ^[43]。钦绳武在潮土上的 5 a 定位试验结果是: NPK 处理氮素当季利用率为 42.1% , 累积利用率为 55.8% , 说明氮素存在累积效应^[44]。

实证 10: 磷肥的当季利用率比较低, 一般认为只有 15% ~ 25% ^[45]。田忠孝等研究施磷量在 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 磷肥当季利用率在 7.4% ~ 15.5% , 3 a 内其后效在 3.4% ~ 6.4% ^[46]。鲁如坤在河南潮土上的结果是: 施磷量为 $33.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第三季小麦磷肥累积利用率为 45.8% ^[45]。

实证 11: 陈伦寿总结全国的资料认为: 钾肥的利用率平均在 35% ~ 50% ^[47]。

以上案例说明按传统的肥料利用率试验和求算方法得出的数据波动较大。究其原因以上这些结果

要么是由短期多点试验得到,受地域、气候、土壤等因素影响较大,要么是用1~2 a的示踪法精确计算得到,二者的结果都有局限性。用示踪法计算虽然准确,但时间短,代表性差,而大田多点试验,代表性强但太粗略;长期定位试验因为试验地点相同、施肥处理和管理措施相同,多年的结果可以弥补和弱化气候等因素的影响,长期定位试验利用率数值大于短期试验^[9]。所以,准确了解肥料利用率至少要有3~5 a田间试验才能保证数据的真实性。

以上众多的试验研究表明:肥料转化率是肥料利用率的真实状态,而肥料利用率只是肥料转化率的短时间的表现形式,因此,用肥料转化率代替肥料利用率评价肥效和指导施肥更科学,也更符合实际。

4 结论

需求是发展的动力,既然肥料利用率已经失去评价肥效和指导施肥的双重功能,那么就应该研究建立新的评价肥效和指导施肥的指标体系。

通过本文系统的理论分析、方法分析和实证,可以得出以下两点主要结论:(1)以肥料转化率等4方面9指标的肥效评价的生态平衡施肥理论体系和指标体系是科学的和实用的;(2)这一理论体系和指标体系有望成为土壤-肥料科学研究中的一个新方向、新理论、新方法。

参考文献:

- [1] 农牧渔业部农业局. 配方施肥技术工作要点[J]. 土壤肥料, 1987(1): 6-12.
- [2] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能:对我国配方施肥工作的评述[J]. 土壤通报, 1989,20(1):46-49.
- [3] 陆允甫,吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 241-250.
LU Yun-fu, LV Xiao-nan. Progress and prospect in fertilizer recommendation based on soil testing in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(3): 241-250.
- [4] 唐近春. 中国土壤肥料工作的成就与任务 [J]. 土壤学报, 1994, 31(4): 341-347.
TANG Jin-chun. Achievements and tasks of soil and fertilizer work in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(4): 341-347.
- [5] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 193-205.
LI Sheng-xiu. The current state and prospect of plant nutrition and fertilizer science[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(3): 193-205.
- [6] 曾宪坤. 中国化肥工业的现状与展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 117-124.
ZENG Xian-kun. Situation and outlook of fertilizer industry in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 117-124.
- [7] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2001.
- [8] 张国梁,章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6): 291-297.
- [9] 宋大平,陈 巍,高彦征. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1144-1151.
SONG Da-ping, CHEN Wei, GAO Yan-zheng. The usage rationality and environmental impacts of chemical nitrogen fertilizer and pesticide in the Huaihe River basin, China[J]. *Journal Agro-environment Science*, 2011, 30(6): 1144-1151.
- [10] 侯彦林,周永娟,李红英,等. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271-1276.
HOU Yan-lin, ZHOU Yong-juan, LI Hong-ying, et al. 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.
- [11] 侯彦林,李红英,周永娟,等. 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 Yan-lin, LI Hong-ying, ZHOU Yong-juan, et al. 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.
- [12] 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 Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying. 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.
- [13] 侯彦林,李红英,赵慧明. 中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证: IV 各类区污染程度和趋势 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1341-1345.
HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHAO Hui-ming. Estimation and empirical analysis of nitrogen non-point field pollution in China: IV Trend and pollution extent of different type areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1341-1345.
- [14] 侯彦林. “生态平衡施肥”的理论基础和技术体系[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 653-658.
HOU Yan-lin. Theory and technological system of ecological balanced fertilization[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2000, 20(4): 653-658.
- [15] 侯彦林,闫晓燕,任 军,等. 区域生态平衡施肥模型建立方法和应用[J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 33-35.
HOU Yan-lin, YAN Xiao-yan, REN Jun, et al. Establishment method and application of regional ecological balanced fertilization models[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 33-35.
- [16] 侯彦林,陈守伦. 施肥模型研究综述[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 494-498.
HOU Yan-lin, CHEN Shou-lun. Summarization of fertilization model research[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 494-498.
- [17] 侯彦林. 生态平衡施肥: I 理论体系[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(2): 66-70.
HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: I Theoretical system [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008, 23(2): 66-70.
- [18] 侯彦林. 生态平衡施肥: II 施肥参数指标体系 [J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(3): 65-67.

- HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: II. Fertilization parametric norm system[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008,23(3): 65-67.
- [19] 侯彦林.生态平衡施肥:Ⅲ施肥专家系统软件[J].磷肥与复肥, 2008,23(4):62-64.
- HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: III. Specialist system software for fertilization[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008,23(4):62-64.
- [20] 侯彦林.生态平衡施肥:Ⅳ应用案例[J].磷肥与复肥, 2008,23(6): 74-76.
- HOU Yan-lin. Ecological balanced fertilization: IV. Application cases of general fertilization software[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2008, 23(6):74-76.
- [21] 刘文通,刘声元,郝景发.长春地区诊断施肥量计算公式中几个参数的探讨[J].土壤通报,1984,15(3):117-120.
- [22] 张宽,赵景云,王秀芳,等.黑土供磷能力与磷肥经济合理用量问题的初步研究[J].土壤通报,1984,15(3):120-123.
- [23] 姜文彬,杨铁成,单文波.玉米诊断施肥技术的研究与应用[J].吉林农业大学学报,1986,8(4):62-68.
- [24] 周鸣铮,王竺美.浙江省水稻土“因产定氮”基本公式及其有关参数的探讨[J].土壤学报,1987,24(2):127-133.
- ZHOU Ming-zheng, WANG Zhu-mei. Studies on new equations and its parameters for calculation of the requirement of nitrogen according to the maximum yield of rice predicted[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(2):127-133.
- [25] 李伟波,李运东,王辉.用¹⁵N研究吉林黑土春玉米对氮肥的吸收利用[J].土壤学报,2001,38(4):476-482.
- LI Wei-bo, LI Yun-dong, WANG Hui. Application and recovery of ¹⁵N-fertilizer for spring maize in black soil of Jilin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001,38(4):476-482.
- [26] 朱兆良,张绍林,徐银华.平均适宜施氮量的含义[J].土壤,1986,18(6):316-317.
- [27] Pier J W, Doerge T A. Concurrent evaluation of agronomic, economic, and environmental aspects of trickle-irrigated watermelon production[J]. *J Environ Qual*, 1995,2:75-84.
- [28] Sexton B T, Moncrief J F, Rosen C J, et al. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil[J]. *J Environ Qual*, 1996,25:982-992.
- [29] Annett Weigel, Rolf Russow, Martin Korschens. Quantification of airborne N-input in long-term field experiments and its validation through measurements using ¹⁵N isotope dilution[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2000,163:261-265.
- [30] Goulding K W T. Nitrogen deposition to land from the atmosphere[J]. *Soil Use and Management*, 1990,6:61-63.
- [31] 李林,王日义,衣玉祥,等.应用¹⁵N研究玉米对氮肥的吸收利用[J].核农学通报,1989,10(6):271-273.
- [32] 茹德平,赵彩霞,李习军,等.用¹⁵N示踪技术研究高产小麦、玉米的施氮规律[J].核农学通报,2005,19(2):151-154.
- RU De-ping, ZHAO Cai-xia, LI Xi-jun. Studies on utilization of nitrogen by wheat and maize with ¹⁵N tracer method[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005,19(2):151-154.
- [33] 武金果,易玉林,郭中义,等.应用¹⁵N示踪研究砂姜黑土冬小麦尿素施用方式和氮素利用率[J].安徽农业科学,2004,32(5):926-927,952.
- WU Jin-guo, YI Yu-lin, GUO Zhong-yi, et al. Study on ¹⁵N trace in the rational urea application technique for winter wheat in sandy and black soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2004,32(5):926-927, 952.
- [34] Rasmussen P E, Douglas J R C L, Collins H P, et al. Long-term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(13):1829-1837.
- [35] Huang Wen-yuan, Lu Yao-chi, Noel D Uri. An assessment of soil nitrogen testing considering the carry-over effect[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2001,25:843-860.
- [36] 雷永振,邱卫文,王祥珍,等.玉米钾肥长期定位试验作物产量和土壤钾素的变化[J].辽宁农业科学,2003(4):1-3.
- LEI Yong-zhen, QIU Wei-wen, WANG Xiang-zhen, et al. Variation of crop yield and soil potassium in long-term location experiment in maize[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2003(4):1-3.
- [37] 王胜佳,陈义,吴春艳,等.施用不同肥料对稻田作物产量与土壤肥力的长期影响[J].浙江农业学报,2004,16(6):372-376,200.
- WANG Sheng-jia, CHEN Yi, WU Chun-yan, et al. Long-term effect of application of different fertilizer on the crop production and soil fertility in rice fields[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004,16(6):372-376,200.
- [38] 王改玲,郝明德,李燕敏.基于黄土旱塬区长期定位试验的施肥效益分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):129-132.
- WANG Gai-ling, HAO Ming-de, LI Yan-min. Analysis of the benefit of fertilizer based on long-term fertilization in dry-land of loess plateau[J]. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2010,28(3):129-132.
- [39] 黄绍敏,宝德俊,皇甫湘荣,等.长期定位施肥小麦的肥料利用率研究[J].麦类作物学报,2006,26(2):121-126.
- HUANG Shao-min, BAO De-jun, HUANGPU Xiang-rong, et al. Long-term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat in soil[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006,26(2):121-126.
- [40] 孙传范,曹卫星,戴廷波.土壤-作物系统中氮肥利用率的研究进展[J].土壤,2001,(2):63-69.
- SUN Chuan-fan, CAO Wei-xing, DAI Ting-bo. Progress in the study on nitrogen use efficiency in soil-crop system[J]. *Soils*, 2001(2):63-69.
- [41] 朱兆良,孙波.中国农业面源污染控制对策研究[J].环境保护,2008,394(4B):4-6.
- [42] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,等.北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J].植物营养与肥料学报,2003,9(3):264-270.
- JU Xiao-tang, PAN Jia-rong, LIU Xue-jun, et al. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003,9(3):264-270.
- [43] 李永宾,郑丽敏,廖树华,等.北京郊区不同水氮管理模式对冬小麦产量及水分和养分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2005,25(2):51-56.
- LI Yong-bin, ZHENG Li-min, LIAO Shu-hua, et al. Effects of different patterns of irrigation and N application on grain yield and utilization ratio of water and nutrient of winter wheat in Beijing suburb[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005,25(2):51-56.
- [44] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学出版社,1992:213-249.
- [45] 鲁如坤,时正元,顾益初.土壤积累态磷研究 I. 磷肥的表现积累利用率[J].土壤,1996,27(6):286-289.
- [46] 田孝忠,曹季红.磷肥残效研究[J].土壤,1997,5:251-253.
- [47] 陈伦寿.应正确看待化肥利用率[J].磷肥与复肥,1996(4):4-7.

致谢:感谢天津市土壤肥料工作站提供资料。