

肥效评价的生态平衡施肥指标体系的应用

侯彦林

(农业部环境保护科研监测所 天津 300191)

摘要 本文以肥效评价的生态平衡施肥理论体系为基础,对生态平衡施肥指标体系进行了研究。(1)以肥料转化率为基础建立了全量养分通用施肥模型和参数体系:在 $W_j=W_i$ 状态下,模型为 $W_{in}=W_{yield}/K_{yield}$,参数为产量和肥料转化率;在 $W_j>W_i$ 状态下,模型为 $W_{in}=W_{yield}/K_{yield}$,参数为产量和肥料转化率;在 $W_j<W_i$ 状态下,模型为 $W_{in}=W_{yield}/K_{s-yield}+(W_j-W_i)$,参数为产量、肥料转化率和 (W_j-W_i) 。(2)以肥料离土率为基础建立了肥料离土估算模型和参数体系:在 $W_j=W_i$ 状态下,全量养分通用离土模型为 $W_{leave}=W_{in}\times K_{leave}$ 或 $K_{leave}=1-K_{yield}$,参数为产量和肥料转化率;在 $W_j>W_i$ 状态下,模型为 $W_{leave}=K_{leave}\times W_{in}$ 或 $K_{leave}=1-K_{yield}-K_{fertilization}$,参数为产量、肥料转化率和 (W_j-W_i) 或 $K_{fertilization}$ 。(3)以肥料培肥率为基础建立了土壤培肥模型和参数体系:在 $W_j>W_i$ 时,肥料培肥率模型为 $K_{fertilization}=(W_j-W_i)/W_{in}$,参数为产量和肥料培肥率。(4)以中长期定位试验为例说明了以上模型的应用方法和过程。

关键词 肥料转化率 肥料离土率 肥料培肥率 生态平衡施肥

中图分类号 S147.21 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2011)08-1477-05

Application of Index System of Ecological Balanced Fertilization for Fertilizer Efficiency Evaluation

HOU Yan-lin

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

Abstract: This paper was based on the theory system of Ecological Balanced Fertilization for fertilizer efficiency evaluation and investigate the index system of Ecological Balanced Fertilization: (1) universal fertilization model and parameter system of total nutrient were established based on Fertilizer Yield: model was $W_{in}=W_{yield}/K_{yield}$ when $W_j=W_i$, parameters were yield and fertilizer yield; model was $W_{in}=W_{yield}/K_{yield}$ when $W_j>W_i$, parameters were yield and fertilizer yield; model was $W_{in}=W_{yield}/K_{s-yield}+(W_j-W_i)$ when $W_j<W_i$, parameters were yield, fertilizer yield and (W_j-W_i) ; (2) estimation model and parameter system of fertilizer leave were established based on Fertilizer Leave Rate: universal fertilization leave model of total nutrient was $W_{leave}=W_{in}\times K_{leave}$ or $K_{leave}=1-K_{yield}$ when $W_j=W_i$, parameters were yield and fertilizer yield; model was $W_{leave}=K_{leave}\times W_{in}$ or $K_{leave}=1-K_{yield}-K_{fertilization}$ when $W_j>W_i$, parameters were yield, fertilizer yield and (W_j-W_i) or $K_{fertilization}$; (3) soil fertilization model and parameter system were established based on Fertilization Rate: soil fertilization rate model was $K_{fertilization}=(W_j-W_i)/W_{in}$ when $W_j>W_i$, parameters were yield and fertilization rate; (4) application method and process were illustrated by mid-long term experiments.

Keywords: fertilizer yield; fertilizer leave rate; fertilization rate; ecological balanced fertilization

前文建立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^[1],本文在此基础上,主要讨论生态平衡施肥指标体系:(1)在土壤某全量养分保持平衡状况下($W_j=W_i$)、(2)积累状态下($W_j>W_i$)、(3)消耗状态下($W_j<W_i$)的肥料转化率或土壤-肥料转化率、肥料离土率或土壤-肥料离土率、肥料培肥率的模型建立方法、参数确定方法和模型应用过程。现将肥

料转化率、肥料离土率、肥料培肥率在不同土壤养分状态下的存在情况及其关系列入表1。

1 以肥料转化率为基础的施肥模型

1.1 $W_j=W_i$ 状态

1.1.1 模型建立

根据 $W_{yield}/W_{in}+W_{leave}/W_{in}+(W_j-W_i)/W_{in}=1$ ^[1],当 $W_j=W_i$ 时,肥料转化率+肥料离土率=1,肥料转化率的定义是 $K_{yield}=W_{yield}/W_{in}$ 。如果 K_{yield} 是通过中长期定位肥料田间试验获得的参数,那么它就是一个包含气候波动因素在内的多年的平均数,变幅不大,相对稳定。此时全量养分通用施肥模型由 $W_{in}=W_{yield}+W_{leave}$ 变为 $W_{in}=W_{yield}/K_{yield}$ 。

收稿日期 2011-07-18

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(2011-WN-8)

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林公主岭人,博士,研究员,博士生导师,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: ylhou@263.net

表1 不同土壤养分状态下的肥料转化率、肥料离土率、肥料培肥率及其关系

Table 1 Fertilizer yield, fertilizer leave rate and fertilization rate and their relationships under different soil nutrient conditions

指标 Index	土壤全量养分状态 State of soil total nutrient		
	$W_j=W_i$ 平衡 Balance	$W_j>W_i$ 积累 Accumulation	$W_j<W_i$ 消耗 Consumption
肥料转化率 Fertilizer yield	K_{yield}	K_{yield}	$K_{s\text{-yield}}$
肥料离土率 Fertilizer leave rate	K_{leave}	K_{leave}	$K_{s\text{-leave}}$
肥料培肥率 Fertilization rate	—	$K_{\text{fertilization}}$	—
关系 Relationship	$K_{\text{yield}}+K_{\text{leave}}=1$	$K_{\text{yield}}+K_{\text{leave}}+K_{\text{fertilization}}=1$	$K_{s\text{-yield}}+K_{s\text{-leave}}=1$

注: W_j 为后季或多年后土壤全量养分含量; W_i 为前季或多年前土壤全量养分含量; “—” 表示参数无意义; $K_{s\text{-yield}}$ 为土壤-肥料转化率; $K_{s\text{-leave}}$ 为土壤-肥料离土率。

如某试验在土壤全 N 保持相对平衡状态下获得 N 的 $K_{\text{yield}}=0.75$, 说明当年施入的 N 中 75.0% 转移到作物体内了, 如此时玉米产量为 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 则带走的 N 为 $W_{\text{yield}}=7\,500\div 100\times 1.8=135.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 推荐施 N 量为 $W_{\text{in}}=135.0\div 0.75=180.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.1.2 参数体系

在 $W_j=W_i$ 状态下的全量养分通用施肥模型参数体系包括 2 个参数: 一个是产量, 它表示土壤综合肥力即地力水平, 由此可以换算为 W_{yield} ; 另一个是肥料转化率, 它反映在土壤全量养分保持平衡状态下当季肥料平均转化到作物体内的效率。现假设可以获得土壤全量养分平衡状况下的多个中长期肥料田间试验的最佳产量和肥料转化率对应关系的原始试验数据, 则可将产量作为自变量, 将肥料转化率作为因变量, 通过统计方法建立产量与肥料转化率关系的函数, 即 $K_{\text{yield}}=f(\text{地力})=f(W_{\text{yield}})$, 则 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}/f(W_{\text{yield}})$ 。

案例见 4.1~4.4。

1.2 $W_j>W_i$ 状态

1.2.1 模型建立

根据 $W_{\text{yield}}/W_{\text{in}}+W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}+(W_j-W_i)/W_{\text{in}}=1^{[1]}$, 当 $W_j>W_i$ 时, 肥料转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1。肥料转化率的定义是: $K_{\text{yield}}=W_{\text{yield}}/W_{\text{in}}$ 。如果 K_{yield} 是通过中长期定位肥料田间试验获得的参数, 那么它就是一个包含气候波动因素在内的多年的平均数, 变幅不大, 相对稳定。此时全量养分通用施肥模型由 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}+W_{\text{leave}}+(W_j-W_i)$ 变为 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}/K_{\text{yield}}$ 。

如某试验在土壤全 P 保持积累状态下获得 P_2O_5 的 $K_{\text{yield}}=0.80$, 说明当年施入的 P_2O_5 中有 80.0% 转移到作物体内了, 此时的 K_{yield} 是土壤全 P 养分积累状况下的 K_{yield} , 是一个变幅不大的数值, 它一般高于土壤全 P 保持平衡状态下的转化率; 此时施肥量可以不考虑土壤积累部分的需要量, 这样会使土壤养分保持平衡状态或略微积累状态。如此时玉米产量为 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 则带走的 P_2O_5 为 $W_{\text{yield}}=7\,500\div 100\times 0.8=$

$60.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 推荐施 P_2O_5 量为 $W_{\text{in}}=60.0\div 0.80=75.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.2.2 参数体系

在 $W_j>W_i$ 状态下的全量养分通用施肥模型参数体系包括 2 个参数: 一个是产量, 它表示土壤综合肥力即地力水平, 由此可以换算为 W_{yield} ; 另一个是肥料转化率, 它反映在土壤全量养分保持积累状态下当季肥料平均转化到作物体内的效率。现假设可以获得土壤全量养分保持积累状态下的多个中长期肥料田间试验的最佳产量和肥料转化率对应关系的原始试验数据, 则可将产量作为自变量, 将肥料转化率作为因变量, 通过统计方法建立产量与土壤养分保持积累状态下的肥料转化率关系的函数, 即 $K_{\text{yield}}=f(\text{地力})=f(W_{\text{yield}})$, 则 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}/f(W_{\text{yield}})$ 。

案例见 4.2~4.4。

1.3 $W_j<W_i$ 状态

1.3.1 模型建立

根据 $W_{\text{yield}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]+W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]=1^{[1]}$, 当 $W_j<W_i$ 时, 土壤-肥料养分转化率+土壤-肥料养分离土率=1。土壤-肥料(养分)转化率的定义是: $K_{s\text{-yield}}=W_{\text{yield}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 。如果 $K_{s\text{-yield}}$ 是通过中长期定位肥料田间试验获得的参数, 那么它就是一个包含气候波动因素在内的多年的平均数, 变幅不大, 相对稳定。此时全量养分通用施肥模型由 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}+W_{\text{leave}}+(W_j-W_i)$ (W_j-W_i 为土壤养分的贡献) 通过 $K_{s\text{-yield}}=W_{\text{yield}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 变为 $W_{\text{in}}=W_{\text{yield}}/K_{s\text{-yield}}+(W_j-W_i)$ 。

如某试验在土壤全 K 消耗状态下获得 K_2O 的 $K_{s\text{-yield}}=0.90$, 说明当年施 K_2O 量 (W_{in}) 和土壤提供的 K_2O 量 (W_i-W_j) 中有 90.0% 转移到作物体内了, 如此时的玉米产量为 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 则带走的 K_2O 为 $W_{\text{yield}}=7\,500\div 100\times 2.2=165.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 现假设每季在最佳施 K_2O 量下土壤提供的 K_2O 量为 $(W_i-W_j)=100.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 此时推荐施 K_2O 量为 $W_{\text{in}}=165.0\div 0.90+(W_j-W_i)=83.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3.2 参数体系

在 $W_j < W_i$ 状态下的全量养分通用施肥模型参数体系包括 3 个参数:第一个是产量,它表示土壤综合肥力即地力水平,由此可以换算为 W_{yield} ;第二个是肥料转化率,它反映在土壤养分处于消耗状态下当季肥料平均转化到作物体内的效率;第三个是 $(W_i - W_j)$,即在最佳施肥量下每季土壤提供的养分量。现假设可以获得土壤全量养分处于消耗状况下的多个中长期肥料田间试验的最佳产量和土壤-肥料转化率对应关系的原始试验数据,则可将产量作为自变量,将土壤-肥料转化率作为因变量,通过统计方法建立产量与土壤-肥料转化率关系的函数,即 $K_{s-\text{yield}} = f(\text{地力}) = f(W_{\text{yield}})$ 。通过试验可以获得每季最佳施肥量下土壤提供的养分量。于是 $W_{\text{in}} = W_{\text{yield}} / f(W_{\text{yield}}) + (W_j - W_i)$ 。

案例 4.2 是当 $W_j > W_i$ 时求算肥料转化率、肥料离土率和肥料培肥率的案例;当 $W_j < W_i$ 时,肥料转化率、肥料离土率和肥料培肥率的计算方法与此相同,限于篇幅,具体案例略。

2 以肥料离土率为基础的肥料离土模型

根据 $W_{\text{yield}} / [W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] + W_{\text{leave}} / [W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] = 1^{[1]}$, 当 $W_j < W_i$ 时,土壤-肥料养分转化率+土壤-肥料养分离土率=1。虽然可以定义 $K_{s-\text{leave}} = W_{\text{leave}} / [W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$, 它是土壤和肥料养分共同的离土率,但是由于此种情况下地力是消耗的,施肥还没有补充上土壤养分的消耗速率,施肥量还没有达到对环境产生负作用的程度,故以下只讨论 $W_j = W_i$ 和 $W_j > W_i$ 两种状态下的肥料离土率。

2.1 $W_j = W_i$ 状态

2.1.1 模型建立

根据 $W_{\text{yield}} / W_{\text{in}} + W_{\text{leave}} / W_{\text{in}} + (W_j - W_i) / W_{\text{in}} = 1^{[1]}$, 当 $W_j = W_i$ 时,肥料转化率+肥料离土率=1。肥料离土率的定义是 $K_{\text{leave}} = W_{\text{leave}} / W_{\text{in}}$ 。如果 K_{yield} 是通过中长期定位肥料田间试验获得的参数,那么它就是一个包含气候波动因素在内的多年的平均数,变幅不大,相对稳定。此时全量养分通用离土模型由 $W_{\text{leave}} = W_{\text{in}} - W_{\text{yield}}$ 变为 $W_{\text{leave}} = W_{\text{in}} \times K_{\text{leave}}$ 或 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}}$ 。

如某试验在土壤全量养分保持平衡状态下获得 N 的 $K_{\text{yield}} = 0.75$, 则 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}} = 0.25$, $W_{\text{leave}} = 0.25 \times W_{\text{in}}$ 。

2.1.2 参数体系

在 $W_j = W_i$ 状态下的全量养分通用离土模型参数体系包括 2 个参数:一个是产量,它表示土壤综合肥力即地力水平,由此可以换算为 W_{yield} ;另一个是肥料

转化率,它反映在土壤养分平衡状态下当季肥料平均转化到作物体内的效率;而通过 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}}$ 可求得 K_{leave} 。

案例见 4.2。

2.2 $W_j > W_i$ 状态

2.2.1 模型建立

根据 $W_{\text{yield}} / W_{\text{in}} + W_{\text{leave}} / W_{\text{in}} + (W_j - W_i) / W_{\text{in}} = 1^{[1]}$, 当 $W_j > W_i$ 时,肥料转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1。肥料离土率的定义是 $K_{\text{leave}} = W_{\text{leave}} / W_{\text{in}}$ 。如果 K_{yield} 是通过中长期定位肥料田间试验获得的参数,那么它就是一个包含气候波动因素在内的多年的平均数,变幅不大,相对稳定。肥料培肥率的定义是 $K_{\text{fertilization}} = (W_j - W_i) / W_{\text{in}}$ (可求算)。此时全量养分通用离土模型由 $W_{\text{leave}} = W_{\text{in}} - W_{\text{yield}} - (W_j - W_i)$ 变为 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}} - K_{\text{fertilization}}$ 和 $W_{\text{leave}} = K_{\text{leave}} \times W_{\text{in}}$ 。

现假设某试验在土壤全量养分积累状态下最佳施 N 量条件下 N 的 $K_{\text{yield}} = 0.75$, 测得 $K_{\text{fertilization}} = 0.01$, 则 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}} - K_{\text{fertilization}} = 0.24$ 和 $W_{\text{leave}} = 0.24 \times W_{\text{in}}$ 。

2.2.2 参数体系

在 $W_j > W_i$ 状态下的全量养分通用离土模型参数体系包括两个参数:一个是产量,它表示土壤综合肥力即地力水平,由此可以换算为 W_{yield} ;另一个是肥料转化率,它反映在土壤养分积累状态下当季肥料平均转化率,而 $K_{\text{fertilization}}$ 可以通过监测而求算,则 $K_{\text{leave}} = 1 - K_{\text{yield}} - K_{\text{fertilization}}$ 。这里当 $W_j > W_i$ 时,如果养分开始严重流失超过有关标准时,则将此时的施肥量定义为生态施肥量上限。特别注意全量养分积累状态下的 K_{yield} 与平衡状态下的 K_{yield} 是不同的,前者一般大于后者。

案例见 4.2。

3 以肥料培肥率为基础的土壤培肥模型

根据 $W_{\text{yield}} / W_{\text{in}} + W_{\text{leave}} / W_{\text{in}} + (W_j - W_i) / W_{\text{in}} = 1^{[1]}$, 当 $W_j \leq W_i$ 时,肥料表现上未对土壤培肥,故以下只讨论在 $W_j > W_i$ 状态下的土壤培肥模型,即:肥料转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1 中的肥料培肥率的计算方法。

3.1 模型建立

当 $W_j > W_i$ 时,定义肥料培肥率为 $K_{\text{fertilization}} = (W_j - W_i) / W_{\text{in}}$, 据此可根据中长期土壤全量养分监测结果计算出在一定施肥量和产量条件下的肥料培肥率。将当 W_j 刚好大于 W_i 时的施肥量定义为培肥施肥量下限。注意 W_j 和 W_i 的间隔年限,如果是求一年的培肥率则需要除以间隔年限。

3.2 参数体系

在 $W_j > W_i$ 状态下的全量养分通用培肥模型参数体系包括 2 个参数:一个是产量,它表示土壤综合肥力即地力水平,由此可以换算为 W_{yield} ;另一个是肥料培肥率,它反映在土壤养分保持积累状态下当季肥料平均培肥率。假设获得土壤全量养分积累状况下的多个试验的最佳产量和肥料培肥率对应关系的原始试验数据,则可将产量作为自变量,将肥料培肥率作为因变量,通过统计方法建立产量与肥料培肥率关系函数,即 $K_{\text{fertilization}} = f(W_{\text{yield}})$ 。

案例见 4.2。

4 案例

4.1 在缺少 W_j 情况下使用平均适宜施 N 量估算 N 转化率案例

宋永林等^[2]2001 年发表了 10 a(1991—2000)长期定位试验结果,其 NPK 处理区的纯养分用量为 150.0 N、75.0 P_2O_5 、37.5 K_2O $kg \cdot hm^{-2}$,虽然文中未给出 10 a 后土壤 N 的 W_j 数据,但是根据全国平均适宜施 N 量为 150~180 $kg \cdot hm^{-2}$ ^[3],可以认为此施 N 量基本是能够保持土壤全 N 平衡的施 N 量,据此可大致估算出 N 转化率。即 NPK 区玉米带走的 N 为 $4329.5 \div 100 \times 1.8 = 77.9$ $kg \cdot hm^{-2}$,CK 区玉米带走的 N 为 $2004.0 \div 100 \times 1.8 = 36.1$ $kg \cdot hm^{-2}$,则 N 转化率为 $77.9 \div 150.0 = 51.9\%$,利用率为 $(77.9 - 36.1) \div 150.0 = 27.9\%$ 。如果考虑外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则 N 转化率为 $77.9 \div 200.0 = 39.0\%$,N 利用率为 20.9%。

刘淑云等^[6]2007 年发表了 13 a(1991—2003)长期定位试验结果,其 NPK 处理区的纯 N 量为 150.0N $kg \cdot hm^{-2}$,虽然文中未给出 13 a 后土壤 N 的 W_j 数据,但是根据全国平均适宜施 N 量为 150~180 $kg \cdot hm^{-2}$ ^[3],可以认为此施 N 量基本是能够保持土壤全 N 平衡的施 N 量,据此可大致估算出 N 转化率。即 NPK 区玉米带走的 N 为 $5633.7 \div 100 \times 1.8 = 101.4$ $kg \cdot hm^{-2}$,CK 区玉米带走的 N 为 $1455.6 \div 100 \times 1.8 = 26.2$ $kg \cdot hm^{-2}$,则 N 转化率为 $101.4 \div 150.0 = 67.6\%$,利用率为 $(101.4 - 26.2) \div 150.0 = 50.1\%$ 。如果考虑外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则 N 转化率为 $101.4 \div 200.0 = 50.7\%$,N 利用率为 37.6%。

以上两文为同一试验,可见随着产量的增加,N 转化率和利用率都在增加,但转化率大于利用率。

4.2 在数据齐全情况下求算肥料转化率、肥料离土率和肥料培肥率案例

谢文等^[7]2005 年发表了 11 a(1992—2002)长期

定位试验结果,以其中的小麦-玉米种植模式的配方施肥为例进行说明。

施 N 量为 359.7 $kg \cdot hm^{-2}$,吸收 N 量为 178.8 $kg \cdot hm^{-2}$,根据文中提供的数据说明土壤全 N 量是增加的,则 N 转化率为 $178.8 \div 359.7 = 49.7\%$ 。如果考虑土壤 N 变化,则每年平均积累 135.0 $kg \cdot hm^{-2}$ $[(2.73 - 2.07) \times 2\ 250\ 000 \div 1\ 000 \div 11]$,外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则差减法求得 $W_{\text{leave}} = 95.9$ $kg \cdot hm^{-2}$,含外源 N 的离土率为 23.4%。用无肥区土壤 N 供应量估算 N 肥利用率为 $[(7\ 329.0 - 2\ 269.5) \div 100 \times 1.8] \div 359.7 = 25.3\%$ 。如果考虑外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则 N 转化率为 43.6%,N 利用率 22.2%,N 年培肥率 = $135.0 \div 409.7 = 33.0\%$ 或 $135.0 \div 359.7 = 37.5\%$ (无外源 N)。

施 P_2O_5 量为 128.9 $kg \cdot hm^{-2}$,吸收 P_2O_5 量为 118.1 $kg \cdot hm^{-2}$,根据文中提供的数据说明土壤速效 P 是基本平衡的,据此推断土壤全 P 至少不是消耗的,则 P 转化率为 $118.1 \div 128.9 = 91.6\%$,此时 P 的离土率为 8.4%。用无肥区土壤 P 供应量估算 P 肥利用率为 $[(7\ 329.0 - 2\ 269.5) \div 100 \times 0.8] \div 128.9 = 31.4\%$ 。

4.3 在土壤养分积累和平衡状况下求算肥料转化率案例

徐祖祥^[8]2009 年发表了 12 a(1996—2008)长期定位试验结果,以小麦和晚稻栽培模式为例,根据文中资料得知 NPK 处理区土壤 N、P 都是积累的。

NPK 区带走的 N 为 $(3\ 234 + 7\ 100) \div 100 \times 1.8 = 186.0$ $kg \cdot hm^{-2}$,CK 区带走的 N 为 $(843 + 2\ 400) \div 100 \times 1.8 = 58.4$ $kg \cdot hm^{-2}$,N 转化率为 $186.0 \div 270.0 = 68.9\%$,N 利用率为 $(186.0 - 58.4) \div 270.0 = 47.3\%$ 。如果考虑外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则 N 转化率为 $186.0 \div 320.0 = 58.1\%$,N 利用率为 39.9%。

NPK 区带走的 P_2O_5 ($kg \cdot hm^{-2}$)为 $(3\ 234 + 7\ 100) \div 100 \times 0.8 = 82.7$,CK 区带走的 P_2O_5 ($kg \cdot hm^{-2}$)为 $(843 + 2\ 400) \div 100 \times 0.8 = 25.9$ $kg \cdot hm^{-2}$,P 转化率为 $82.7 \div 90.0 = 91.9\%$,P 利用率为 $(82.7 - 25.9) \div 90.0 = 63.1\%$ 。

4.4 中期定位试验情况下求算肥料转化率案例

任春梅等^[9]2005 年发表了 4 a(1994—1998)中期定位试验结果,NPK 区施肥量为 150.0 N、75.0 P_2O_5 、75.0 K_2O $kg \cdot hm^{-2}$,根据文中提供的资料得知土壤 N 处于平衡状态,土壤 P 处于略微积累状态。

NPK 区带走的 N ($kg \cdot hm^{-2}$) 为 $7917 \div 100 \times 1.8 = 142.5$,带走的 P_2O_5 ($kg \cdot hm^{-2}$)为 $7\ 917 \div 100 \times 0.8 = 63.3$ 。N 转化率为 $142.5 \div 150.0 = 95.0\%$,如果考虑外源 N 按 50.0 $kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5],则 N 转化率为 71.3%。P 转化率

为 $63.3 \div 75.0 = 84.4\%$ 。CK 区带走的 $N(kg \cdot hm^{-2})$ 为 $3\ 612 \div 100 \times 1.8 = 65.0$ ，带走的 $P_2O_5(kg \cdot hm^{-2})$ 为 $3\ 612 \div 100 \times 0.8 = 28.9$ ，则 N 利用率为 43.3%，如果考虑外源 N 按 $50.0\ kg \cdot hm^{-2}$ 计算^[4-5]，则 N 利用率为 32.5%，P 利用率为 38.5%。可见，肥料转化率很高，而肥料利用率却很低。

5 讨论

5.1 关于外源养分

现代农田除施肥外，每年或每季也接收一定数量的外源养分，本文中关于外源 N 的数量一律采取文献中的参数，虽然不甚科学，但是至少可以看出加上外源 N 在内的肥料转化率仍然很高，均高于对应的肥料利用率，说明使用肥料转化率评价肥效和指导施肥可以节省肥料和客观地评价肥料的负作用。常识告诉我们，现代农田特别是水田的外源 PK 是不可忽视的数量，但是由于尚未获得有关外源 P 和 K 的权威研究成果，故本文只在计算 N 时使用了外源 N 的参考数量。

5.2 关于百公斤子粒养分带走量

一般地，多数作物的百公斤子粒养分带走量或需要量，是随产量增加而增加的。对于禾本科作物玉米、水稻、小麦而言，N、 P_2O_5 、 K_2O 百公斤子粒养分带走量或需要量大致范围为：1.5~2.2、0.7~1.2、1.8~2.4 $kg \cdot 100\ kg^{-1}$ ，为进行对比研究，本文统一按 1.8、0.8、2.2 $kg \cdot 100\ kg^{-1}$ 计算。

6 结论

6.1 不同土壤养分状态下的指标体系

现将以上讨论结果归纳为表 2，可以看出指标体系包括 5 个参数：产量、 K_{yield} 、 $K_{s-yield}$ 、 $K_{fertilization}$ 、 $(W_j - W_i)$ 。肥料转化率（土壤-肥料转化率）在 3 种情况下都存在，肥料离土率在土壤养分消耗状态下意义不大，肥料培肥率只在土壤养分积累状态下存在。

6.2 生态平衡施肥指标体系的科学性和实用性

通过本研究可以得出两点基本结论：(1) 生态平

衡施肥指标体系中的肥料转化率可以客观地评价肥料效果并可科学地指导施肥，肥料离土率可以反映肥料的离土情况，肥料培肥率可以反映肥料对土壤的培肥作用。(2) 本文案例和上文案例^[1]均说明这一指标体系理论严谨、求算方法可操作、试验数据容易获得、求算的参数实用、模型和参数体系便于推广、并可使用以往试验数据求算参数体系。

参考文献：

[1] 侯彦林. 肥效评价的生态平衡施肥理论体系、指标体系及其实证[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7):1257-1266.
 HOU Yan-lin. Theory system, index system of ecological balanced fertilization and demonstration for fertilizer efficiency evaluation[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(7):1257-1266.
 [2] 宋永林, 姚造华, 袁锋明, 等. 北京褐潮土长期施肥对夏玉米产量及产量变化趋势影响的定位研究[J]. 北京农业科学, 2001(6):14-17.
 [3] 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.
 [4] Annett Weigel, Rolf Russow and 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.
 [5] Goulding K W T. Nitrogen deposition to land from the atmosphere [J]. *Soil Use and Management*, 1990, 6:61-63.
 [6] 刘淑云, 董树亭, 赵秉强, 等. 不同施肥制度对夏玉米产量特性的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2):176-171.
 LIU Shu-yun, DONG Shu-ting, ZHAO Bing-qiang, et al. Effects of different long-term fertilization systems on yield characters of summer maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(2):176-171.
 [7] 谢文, 胡辉, 翟均平, 等. 长期定位施肥对不同种植模式作物产量和土壤肥料的影响[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(9):1605-1608.
 XIE Wen, HU Hui, DI Jun-ping et al. Effect of different planting patterns of regular localized fertilization on crop output and soil fertility[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005, 33(9):1605-1608.
 [8] 徐祖祥. 长期定位施肥对水稻、小麦产量和土壤养分的影响[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(5):485-489.
 XU Zu-xiang. Effect of long-term located fertilization on the yields of rice and wheat and soil nutrient[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2009, 21(5):485-489.
 [9] 任春梅, 胡续丽, 谢家义, 等. 长期定位施肥对土壤养分及水稻产量的影响[J]. 垦殖与稻作(土壤肥料), 2005, 40(4):37-38, 40.
 REN Chun-mei, HU Xu-li, XIE Jia-yi, et al. Fertilizer in the location long time had the effect on soil nutrient and rice yield[J]. *Reclaiming and Rice Cultivation*, 2005, 40(4):37-38, 40.

表 2 不同土壤养分状态下的指标体系

Table 2 Index system under different soil nutrient conditions

土壤养分状态 State of soil total nutrient	施肥模型与参数 Fertilization model and parameters	离土模型与参数 Fertilizer leave model and parameters	培肥模型与参数 Soil fertilization model and parameters
$W_i = W_j$ 平衡 Balance	$W_{in} = W_{yield} / K_{yield}$, 产量、 K_{yield}	$K_{leave} = 1 - K_{yield}$, 产量、 K_{yield}	
$W_j > W_i$ 积累 Accumulate	$W_{in} = W_{yield} / K_{yield}$, 产量、 K_{yield}	$K_{leave} = 1 - K_{yield} - K_{fertilization}$, 产量、 K_{yield} 、 $(W_j - W_i)$	$K_{fertilization} = (W_j - W_i) / W_{in}$, 产量、 $K_{fertilization}$
$W_j < W_i$ 消耗 Consumption	$W_{in} = W_{yield} / (K_{s-yield} + (W_j - W_i))$, 产量、 $K_{s-yield}$ 、 $(W_j - W_i)$		