

通用施肥模型及其应用

侯彦林

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:基于生态平衡施肥理论和多年实践,建立了通用施肥模型及其若干应用模式。(1)不进行秸秆还田情况下,当 $W_j \geq W_i$ 时的通用施肥模型表达式为“肥料转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1”;当 $W_j < W_i$ 时的通用施肥模型表达式为“土壤-肥料转化率+土壤-肥料离土率=1”。(2)进行秸秆还田情况下,当 $W_j \geq W_i$ 时的通用施肥模型表达式为“肥料经济产量转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1”;当 $W_j < W_i$ 时的通用施肥模型表达式为“土壤-肥料经济产量转化率+土壤-肥料离土率=1”。基于以上理论和方法,分别对肥料长期定位试验、示踪试验、普通肥料田间试验、轮作栽培模式情况下的通用施肥模型进行了讨论;并介绍了参数计算过程。根据实际工作需要,对通用施肥模型进行了简化,分别定义了土壤-化肥养分生物产量转化率、土壤-化肥养分籽粒产量转化率两个参数和相应的施肥模型。最后简介了通用施肥模型多年实践情况。

关键词:通用施肥模型;应用;肥料转化率;肥料经济产量转化率;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)10-1917-08

Universal Fertilization Model and Its Application

HOU Yan-lin

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

Abstract: Universal model and its application modes were established based on the ecological balanced fertilization theory and many practices. (1) When $W_j \geq W_i$, the universal model is “fertilizer yield+fertilizer leave rate+fertilization rate=1” under no straw returning; when $W_j < W_i$, the universal fertilization model is “soil-fertilizer yield+soil-fertilizer leave rate=1” under no straw returning. (2) When $W_j \geq W_i$, the universal model is “fertilizer yield of economic yield +fertilizer leave rate+fertilization rate=1” under straw returning; when $W_j < W_i$, the universal fertilization model is “soil-fertilizer yield of economic yield +soil-fertilizer leave rate=1” under straw returning. Based on the theories and methods, universal fertilization models in long-term fertilizer experiment, tracing experiment, common fertilizer experiment and rotation cultivation pattern were discussed; parameter calculation process was introduced. In order to make it practical, universal model was simplified, the parameter of soil-chemical nutrient biomass conversion rate, soil-chemical nutrient seed yield conversion rate and corresponding fertilization model were defined. Universal fertilization model in many years' practice situations were introduced finally.

Keywords: universal fertilization model; application; fertilizer yield; fertilizer yield of economic production; ecological balance fertilization

施肥模型即算法是合理施肥的理论基础和方法基础,目前各类施肥模型的理论和方法都有其弊端^[1-13]。因此,通用施肥模型的建立是施肥理论和方法

的重大创新,对土壤肥料学科的发展和实践具有不可估量的重大意义和应用价值。

1 通用施肥模型的建立

借鉴我们以往的研究成果^[2,8,10,14],以耕层土壤为基础,以作物为核心,以肥料为载体,以环境为背景,根据土壤-作物-肥料-环境间养分转化和循环关系,列出图1养分转移矩阵。其中, W_i 为单位面积季前耕层土壤某养分总量; $W_{inorganic}$ 为单位面积一季化肥提供

收稿日期:2011-09-14

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: ylhoul@263.net

的该养分量; W_{organic} 为当季有机肥提供的该养分量; $W_{i(\text{straw})}$ 为季前多季秸秆还田在当季提供的该养分量; W_{other} 为单位面积一季其他来源的该养分量 (包括干湿沉降、灌溉、雨水、种子、生物固氮等, 也包含一季内来自于耕下层养分和从耕层交换到耕下层养分之差, 之差为正表示耕下层有净养分来源, 为零表示平衡, 为负表示耕层有净养分转移到耕下层); 设 $W_{\text{in}} = W_{\text{inorganic}} + W_{\text{organic}} + W_{\text{other}}$; $W_{i(\text{straw})}$ 虽可作为肥料养分看待, 但由于其数量不可忽视, 并且难以准确测定, 因此为了模型推导中能够剔除该变量, 故单独列出。 W_j 为单位面积季后耕层土壤该养分总量; W_{output} 为一季作物单位面积带走的该养分量, 包括子粒 $W_{j(\text{grain})}$ 和秸秆 $W'_{j(\text{straw})}$ 的养分量, 这里再将秸秆的养分 $W'_{j(\text{straw})}$ 分成两部分 $W'_{j(\text{straw})-A}$ 和 $W'_{j(\text{straw})-B}$, 设 $W'_{j(\text{straw})-A}$ 在数量上与 $W_{i(\text{straw})}$ 相等; W_{leave} 为单位面积一季土壤养分和肥料养分合计离开耕层土壤的该养分量 (这里扣除从耕层交换到耕下层的养分量, 因其已含在 W_{other} 中), 设 $W'_{\text{leave}} = W_{\text{leave}} + W'_{j(\text{straw})-B}$ 。 $W_{i \rightarrow j}$ 代表在一个季节里由 W_i 转化为 W_j 的养分量, 其他变量转化情况余此类推。提示: $W_{\text{inorganic}}$ 、 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{i(\text{straw})}$ 中有效态养分与无效态养分比例影响养分利用率, 即养分利用率将反映肥料品种和养分形态等肥料特性, 因此, 为简化模型构建和参数确定, 不再区分 $W_{\text{inorganic}}$ 、 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{i(\text{straw})}$ 中养分的形态, 统一按全量考虑。

图 1 中, 每一行之和等于对应的来源; 每一列之和等于去向。根据养分输入、输出和质量守恒定律, 以耕层土壤为系统的通用施肥模型为式(1), 它适合于

任何情况和任何养分, 故为通用施肥模型的平衡式。

通用施肥模型平衡式为: 耕层季前土壤全量养分 (W_i) + 当季化肥提供的养分量 ($W_{\text{inorganic}}$) + 当季有机肥提供的养分量 (W_{organic}) + 当季外源提供的养分量 (W_{other}) + 季前总的秸秆还田在当季提供的养分量 ($W_{i(\text{straw})}$) = 耕层季后土壤全量养分 (W_j) + 当季作物带走的养分量 (W_{output}) + 当季土壤养分和肥料养分合计离开耕层的养分量 (W_{leave}) = W_j + 当季作物子粒带走的养分量 ($W_{j(\text{grain})}$) + 当季作物秸秆带走的养分量 ($W'_{j(\text{straw})}$) + $W_{\text{leave}} = W_j + W_{j(\text{grain})} + W'_{j(\text{straw})}$ 数值相等的那部分新鲜秸秆中的养分量 ($W'_{j(\text{straw})-A}$) + W'_{leave} ($W'_{\text{leave}} = W_{\text{leave}} + W'_{j(\text{straw})-B}$)。

$$W_i + W_{\text{inorganic}} + W_{\text{organic}} + W_{\text{other}} + W_{i(\text{straw})} = W_i + W_{\text{in}} + W_{i(\text{straw})} = W_j + W_{\text{output}} + W_{\text{leave}} = W_j + W_{j(\text{grain})} + W'_{j(\text{straw})} + W_{\text{leave}} = W_j + W_{j(\text{grain})} + W'_{j(\text{straw})-A} + W'_{j(\text{straw})-B} + W_{\text{leave}} = W_j + W_{j(\text{grain})} + W'_{j(\text{straw})-A} + W'_{\text{leave}} \quad (1)$$

如果是多年情况, 可表达如下:

$$W_i + \sum W_{\text{inorganic}} + \sum W_{\text{organic}} + \sum W_{\text{other}} + \sum W_{i(\text{straw})} = W_i + \sum W_{\text{in}} + \sum W_{i(\text{straw})} = W_j + \sum W_{\text{output}} + \sum W_{\text{leave}} = W_j + \sum W_{j(\text{grain})} + \sum W'_{j(\text{straw})} + \sum W_{\text{leave}} = W_j + \sum W_{j(\text{grain})} + \sum W'_{j(\text{straw})-A} + \sum W'_{j(\text{straw})-B} + \sum W_{\text{leave}} = W_j + \sum W_{j(\text{grain})} + \sum W'_{j(\text{straw})-A} + \sum W'_{\text{leave}} \quad (2)$$

本文仅对一季情况讨论通用施肥模型的若干表达形式, 多年情况下请读者参照前文自行推导^[14-15]。

2 通用施肥模型的若干应用模式

通用施肥模型可根据是否施用有机肥和秸秆还田划分为 4 种基本施肥模式, 还可根据常见的肥料田间试验的特点分为长期定位试验、示踪试验、普通肥

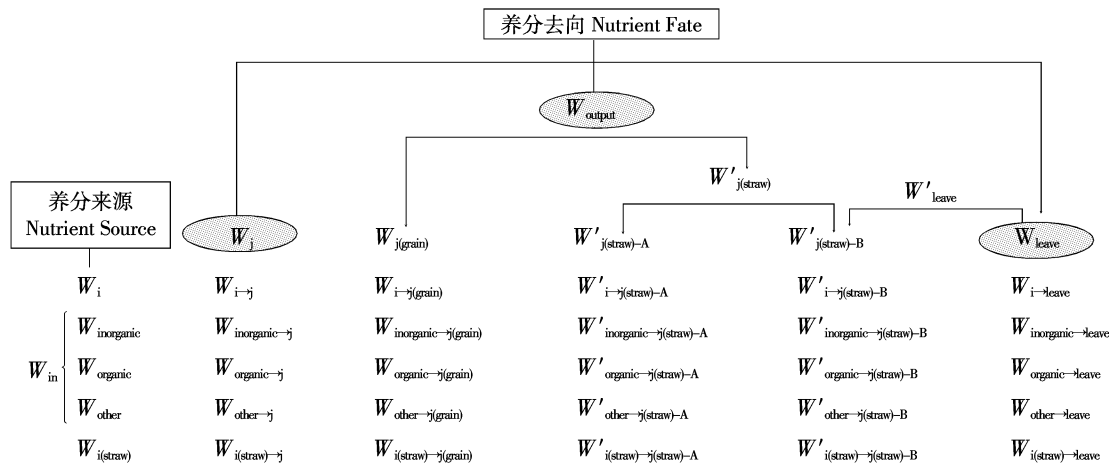


图 1 土壤—作物—肥料—环境间养分转移矩阵

Figure 1 Nutrient transition matrix among soil, crop, fertilizer and environment

料田间试验和轮作栽培模式等情况。

2.1 四种基本施肥模式下

2.1.1 不进行秸秆还田、不施用有机肥情况下

当 $W_{i(\text{straw})}=0$, $W_{\text{organic}}=0$, 确定每季 W_{other} 的估测值, 此时 $W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{other}}$ 情况下, 将式(1)转化为式(3)~(5)。

$$W_{\text{in}}=W_{\text{output}}+W_{\text{leave}}+(W_j-W_i) \quad (3)$$

$$W_{\text{output}}/W_{\text{in}}+W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}+(W_j-W_i)/W_{\text{in}}=1 \quad (4)$$

$$W_{\text{output}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]+W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]=1 \quad (5)$$

当 $W_j \geq W_i$ 情况下, $W_{i \rightarrow \text{output}}$ 和 $W_{i \rightarrow \text{leave}}$ 表观上都为 0。 $W_j=W_{i \rightarrow j}+W_{\text{in} \rightarrow j}=W_i+W_{\text{in} \rightarrow j}$ (此时 $W_{i \rightarrow j}=W_i$), 定义 $(W_j-W_i)/W_{\text{in}}$ 为肥料培肥率; $W_{\text{output}}=W_{\text{in} \rightarrow \text{output}}$, 定义 $W_{\text{output}}/W_{\text{in}}$ 为肥料转化率, 这里土壤表观上未提供给作物养分 ($W_{i \rightarrow \text{output}}=0$); $W_{\text{leave}}=W_{\text{in} \rightarrow \text{leave}}$, 定义 $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 为肥料离土率 (不包含一季内从耕层交换到耕下层的养分, 因其已含在 W_{other} 中), 这里土壤表观上未提供养分用于离开耕层 ($W_{i \rightarrow \text{leave}}=0$)。

当 $W_j < W_i$ 时, 土壤养分实际上处于消耗阶段, $W_{\text{output}}=W_{i \rightarrow \text{output}}+W_{\text{in} \rightarrow \text{output}}$, 定义 $W_{\text{output}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 为土壤-肥料转化率, 这里作物吸收的养分来自土壤和肥料两部分; $W_{\text{leave}}=W_{i \rightarrow \text{leave}}+W_{\text{in} \rightarrow \text{leave}}$, 定义 $W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]$ 为土壤-肥料离土率 (不包含一季内从耕层交换到耕下层的养分, 因其已含在 W_{other} 中)。

2.1.2 不进行秸秆还田、施用有机肥情况下

当 $W_{i(\text{straw})}=0$, 确定每季 W_{other} 的估测值, 同时需要估测出有机肥在当季能提供的养分量, 此时 $W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{organic}}+W_{\text{other}}$, 除多了有机肥养分外, 其他均与 2.1.1 相同。

2.1.3 进行秸秆还田、不施用有机肥情况下

当 $W_{i(\text{straw})} \neq 0$, 确定每季 W_{other} 的估测值, 此时 $W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{other}}$ 情况下, 将式(1)转化为式(6)。

$$W_{\text{in}}=W_{j(\text{grain})}+[W'_{j(\text{straw})-A}-W_{i(\text{straw})}]+W'_{\text{leave}}+(W_j-W_i) \quad (6)$$

特别提示: W'_{leave} 也包含子粒中如玉米芯或小麦壳等最后离开农田的养分, 这样整个养分在以土壤为基础的系统内是平衡的。现在只要证明可以设 $W'_{j(\text{straw})-A}=W_{i(\text{straw})}$ 或证明在数量上 $W'_{j(\text{straw})} \geq W_{i(\text{straw})}$, 则可将式(6)简化。根据上文, 强调指出 $W_{i(\text{straw})}$ 为秸秆转化后的大部分无机态的养分量; $W'_{j(\text{straw})}$ 为新鲜秸秆含的养分量, 大部分为有机态的养分。 $W_{i(\text{straw})}$ 在本季中提供的养分是过去几季秸秆还田在当季累计能提供的养分量, 这里假设是过去 3 季或 3 年的秸秆还田分解后在当季累计能提供的养分量, 表述为: 第 i 年秸秆提供的养分是过去 3 季或 3 年新鲜秸秆分解而来的, 即由第 $i-1$ 、

第 $i-2$ 、第 $i-3$ 年或季分别提供的, 即:

$$W_{i(\text{straw})}=W_{i-1(\text{straw})}+W_{i-2(\text{straw})}+W_{i-3(\text{straw})} \quad (7)$$

同理,

$$W_{i-1(\text{straw})}=W_{i-2(\text{straw})}+W_{i-3(\text{straw})}+W_{i-4(\text{straw})} \quad (8)$$

$$W_{i-2(\text{straw})}=W_{i-3(\text{straw})}+W_{i-4(\text{straw})}+W_{i-5(\text{straw})} \quad (9)$$

$$W_{i-3(\text{straw})}=W_{i-4(\text{straw})}+W_{i-5(\text{straw})}+W_{i-6(\text{straw})} \quad (10)$$

$W'_{j(\text{straw})}$ 是与第 i 季或第 i 年相临之后的第 j 季或第 j 年产生的新鲜秸秆里的养分量, 它假设也在未来 3 季或 3 年内全部分解转化, 即:

$$W'_{j(\text{straw})}=W'_{j(\text{straw})-A}+W'_{j(\text{straw})-B}=W_{j+1(\text{straw})}+W_{j+2(\text{straw})}+W_{j+3(\text{straw})}+\Delta W_{j+1(\text{straw})}+\Delta W_{j+2(\text{straw})}+\Delta W_{j+3(\text{straw})}=W_{j+1(\text{straw})}+W_{j+2(\text{straw})}+W_{j+3(\text{straw})}+\Delta W_{p(\text{straw})} \quad (11)$$

其中, $\Delta W_{j+1(\text{straw})}$ 、 $\Delta W_{j+2(\text{straw})}$ 、 $\Delta W_{j+3(\text{straw})}$ 分别为第 $j+1$ 、第 $j+2$ 、第 $j+3$ 年或季秸秆分解后不包含在 A 中的养分, 合计为 $\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})}$ ($p=j+1, j+2, j+3$), 于是可以设 $W'_{j(\text{straw})-A}=W'_{j+1(\text{straw})}+W_{j+2(\text{straw})}+W_{j+3(\text{straw})}$, $W'_{j(\text{straw})-B}=\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})}$ 。

同理,

$$W'_{j+1(\text{straw})}=W_{j+2(\text{straw})}+W_{j+3(\text{straw})}+W_{j+4(\text{straw})}+\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})} \quad (p=j+2, j+3, j+4) \quad (12)$$

$$W'_{j+2(\text{straw})}=W_{j+3(\text{straw})}+W_{j+4(\text{straw})}+W_{j+5(\text{straw})}+\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})} \quad (p=j+3, j+4, j+5) \quad (13)$$

$$W'_{j+3(\text{straw})}=W_{j+4(\text{straw})}+W_{j+5(\text{straw})}+W_{j+6(\text{straw})}+\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})} \quad (p=j+4, j+5, j+6) \quad (14)$$

如果一个耕作模式下, 每季或每年都实施秸秆还田, 且数量基本相等; 虽然每季或每年秸秆的矿物系数不同, 但是一定气候和土壤条件下大致为一个波动范围不大的参数。因此, $W_{i(\text{straw})}$ 中的 $W_{i-1(\text{straw})}$ 、 $W_{i-2(\text{straw})}$ 、 $W_{i-3(\text{straw})}$ 分别与 $W'_{j(\text{straw})}$ 中的 $W_{j+1(\text{straw})}$ 、 $W_{j+2(\text{straw})}$ 、 $W_{j+3(\text{straw})}$ 在数量上近似相等, 而 $\Sigma \Delta W_{p(\text{straw})}$ 在数量上等于 $W'_{j(\text{straw})-B}$ 。因此, $W'_{j(\text{straw})} \geq W_{i(\text{straw})}$, 由此可以设 $W'_{j(\text{straw})-A}=W_{i(\text{straw})}$, 这部分养分在耕层实现内循环。

通过以上证明, 可以简化式(6)为式(15)~(17), 得:

$$W_{\text{in}}=W_{j(\text{grain})}+W'_{\text{leave}}+(W_j-W_i) \quad (15)$$

$$W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}}+W'_{\text{leave}}/W_{\text{in}}+(W_j-W_i)/W_{\text{in}}=1 \quad (16)$$

$$W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]+W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}}+(W_i-W_j)]=1 \quad (17)$$

在合理施肥情况下, 多年或多季后如果 $W_j \geq W_i$, 则式(16)可定义为:

肥料经济产量转化率+肥料离土率+肥料培肥率=1 (18)

式(16)中, $W_{j(\text{grain})}$ 和 W_{in} 容易获得, W_j-W_i 可测定, W'_{leave} 通过差减法可以获得。

在评价肥效时,可以这样描述:秸秆还田能提高化肥肥效,由于秸秆还田部分的养分实现了内循环,这样推导出来的通用施肥模型中可以不测定秸秆还田所提供的养分量,减少工作量和测定误差。于是,可将 $W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}}$ 作为施肥参数来指导施肥,而评价肥效时仍然可使用肥料转化率即 $W_{\text{output}}/W_{\text{in}}$ (提示:此时化肥转化率是在秸秆还田情况下的转化率,也可将秸秆养分计算在内,计算化肥和秸秆养分的共同转化率)。

当 $W_j < W_i$ 时, $W_{j(\text{grain})} = W_{i \rightarrow j(\text{grain})} + W_{\text{in} \rightarrow j(\text{grain})} + W_{i(\text{straw}) \rightarrow j(\text{grain})}$, 定义 $W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料经济产量转化率; $W'_{\text{leave}} = W'_{\text{in} \rightarrow j(\text{straw})-B} + W_{\text{in} \rightarrow \text{leave}}$, 定义 $W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料离土率; 定义 $W'_{j(\text{straw})-A}$ 或 $W_{i(\text{straw})}$ 为秸秆还田养分的内循环数量。

2.1.4 进行秸秆还田、施用有机肥情况下

当 $W_{i(\text{straw})} \neq 0$, 确定每季 W_{other} 的估测值, 同时需要估测出有机肥在当季能提供的养分量, 此时 $W_{\text{in}} = W_{\text{inorganic}} + W_{\text{organic}} + W_{\text{other}}$, 除多了有机肥养分外, 其他均与

2.1.3 相同。

2.2 肥料长期定位试验情况下

由肥料长期定位试验所获得的参数代表了不同气候年的平均, 参数稳定, 评价肥效科学, 指导施肥符合实际。肥料长期定位试验根据是否进行长期秸秆还田和是否长期施用有机肥而分成 4 种基本施肥模式; 其他模式如间隔秸秆还田和间隔施用有机肥情况, 读者可自行推导, 注意首先分清养分来源和去向, 尽量剔除内循环养分部分, 以选择适当的指标作为施肥参数和评价肥效的参数, 两套参数可以相同或不同。现将肥料长期定位试验的 4 种基本施肥模型、参数和说明列入表 1。

2.3 示踪试验情况下

示踪试验一般是对化肥养分进行同位素标记, 可以追踪肥料在土壤—作物—环境中的转化关系, 以验证其他试验条件下参数的科学性。示踪试验根据是否进行长期秸秆还田和是否长期施用有机肥而分成 4 种基本施肥模式。在图 1 中, 理论上可以测定出

表 1 肥料长期定位试验情况下的通用施肥模型

Table 1 Universal fertilization model under long-term fertilizer experiment

施肥模式 Fertilization mode	$W_{i(\text{straw})}=0; W_{\text{organic}}=0; W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{other}}$
施肥模型和参数 Fertilization model and parameters	(1) 当 $W_j \geq W_i$ 条件下, $W_{i \rightarrow \text{output}}, W_{i \rightarrow \text{leave}}$ 表观上都为 0; $W_{\text{output}}/W_{\text{in}}$ 为肥料转化率; $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 为肥料离土率; $(W_j - W_i)/W_{\text{in}}$ 为肥料培肥率。 $W_{\text{output}}/W_{\text{in}} + W_{\text{leave}}/W_{\text{in}} + (W_j - W_i)/W_{\text{in}} = 1$ (2) 当 $W_j < W_i$ 条件下, $W_{\text{output}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料转化率; $W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料离土率。 $W_{\text{output}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] + W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] = 1$
说明 Note	要估测 W_{other}
施肥模式 Fertilization mode	$W_{i(\text{straw})}=0; W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{organic}}+W_{\text{other}}$
施肥模型和参数 Fertilization model and parameters	(1) 当 $W_j \geq W_i$ 条件下, $W_{i \rightarrow \text{output}}, W_{i \rightarrow \text{leave}}$ 表观上都为 0; $W_{\text{output}}/W_{\text{in}}$ 为肥料转化率; $W_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 为肥料离土率; $(W_j - W_i)/W_{\text{in}}$ 为肥料培肥率。 $W_{\text{output}}/W_{\text{in}} + W_{\text{leave}}/W_{\text{in}} + (W_j - W_i)/W_{\text{in}} = 1$ (2) 当 $W_j < W_i$ 条件下, $W_{\text{output}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料转化率; $W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料离土率。 $W_{\text{output}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] + W_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] = 1$
说明 Note	要估测 W_{other} 和 W_{organic}
施肥模式 Fertilization mode	$W_{i(\text{straw})} \neq 0; W_{\text{organic}}=0; W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{other}}$
施肥模型和参数 Fertilization model and parameters	(1) 当 $W_j \geq W_i$ 条件下, $W_{i \rightarrow \text{output}}, W_{i \rightarrow \text{leave}}$ 表观上都为 0; $W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}}$ 为肥料经济产量转化率; $W'_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 为肥料离土率; $(W_j - W_i)/W_{\text{in}}$ 为肥料培肥率。 $W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}} + W'_{\text{leave}}/W_{\text{in}} + (W_j - W_i)/W_{\text{in}} = 1$ (2) 当 $W_j < W_i$ 条件下, $W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料经济产量转化率; $W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料离土率。 $W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] + W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] = 1$
说明 Note	要估测 W_{other} ; $W_{i(\text{straw})}$ 为秸秆还田内循环养分, 不需要测定
施肥模式 Fertilization mode	$W_{i(\text{straw})} \neq 0; W_{\text{in}}=W_{\text{inorganic}}+W_{\text{organic}}+W_{\text{other}}$
施肥模型和参数 Fertilization model and parameters	(1) 当 $W_j \geq W_i$ 条件下, $W_{i \rightarrow \text{output}}, W_{i \rightarrow \text{leave}}$ 表观上都为 0; $W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}}$ 为肥料经济产量转化率; $W'_{\text{leave}}/W_{\text{in}}$ 为肥料离土率; $(W_j - W_i)/W_{\text{in}}$ 为肥料培肥率。 $W_{j(\text{grain})}/W_{\text{in}} + W'_{\text{leave}}/W_{\text{in}} + (W_j - W_i)/W_{\text{in}} = 1$ (2) 当 $W_j < W_i$ 条件下, $W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料经济产量转化率; $W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)]$ 为土壤-肥料离土率。 $W_{j(\text{grain})}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] + W'_{\text{leave}}/[W_{\text{in}} + (W_i - W_j)] = 1$
说明 Note	要估测 W_{other} 和 W_{organic} ; $W_{i(\text{straw})}$ 为秸秆还田内循环养分, 不需要测定

$W_{inorganic \rightarrow j}$ (土壤残留养分)、 W_{output} (作物吸收的养分)、 $W_{inorganic \rightarrow leave}$ (肥料离开耕层的养分,也可差减法求算)。示踪试验情况下的通用施肥模型也同表1。

特别提示:当 $W_j \geq W_i$ 条件下, W_{output} 在数量上等于 $W_{in \rightarrow output}$, 这是一种替代的做法,但是 W_{output} 中的养分一定有来自土壤的养分。所以,示踪试验需要具体情况具体分析,用示踪试验和非示踪试验结果相互验证,以寻求使用非示踪试验结果求算评价肥效的参数和指导施肥的参数。

2.4 普通肥料田间试验情况下

普通肥料田间试验一般是指1~3年内的定位或不定位的田间试验。它根据是否进行长期秸秆还田和是否长期施用有机肥而分成4种基本施肥模式,其特点是:时间短,求算 $W_j - W_i$ 之差误差较大,所求算的土壤—肥料转化率或肥料转化率只能是近似数值;如果以周边的长期定位试验结果矫正,则可获得比较准确的施肥参数。普通肥料田间试验情况下的通用施肥模型也同表1。

2.5 轮作栽培模式情况下

如果是长期固定的轮作模式如冬小麦—夏玉米,则养分输入和输出可以按一个轮作周期计算,轮作栽培模式根据是否进行长期秸秆还田和是否长期施用有机肥而分成4种基本施肥模式。轮作模式情况下的通用施肥模型也同表1。

3 通用施肥模型计算过程

前文应用很多案例验证了通用施肥模型的各种求算方法^[14-15],以下再就计算过程进行分类举例,非实际案例,读者可以根据所掌握的数据进行验证。

3.1 不进行秸秆还田、不施用有机肥情况下

以吉林省黑土区玉米合理施肥量为例:产量8250 kg·hm⁻²,百公斤子粒带走N量按1.80 kg估算,则带走N 148.5 kg·hm⁻²;合理施N量为195.0 kg·hm⁻²情况下,土壤N基本保持平衡;如果工业发达地区外源N按每年50 kg·hm⁻²计算^[14],如本文暂定按其一半25.0 kg·hm⁻²计算;则N转化率=148.5/(195.0+25.0)=67.5%。百公斤子粒带走P₂O₅量按0.80 kg估算,则带走P₂O₅ 66.0 kg·hm⁻²;合理施P₂O₅量为105.0 kg·hm⁻²情况下,土壤P₂O₅基本保持平衡或积累;如暂不考虑外源P₂O₅,则P₂O₅转化率=66.0/105.0=62.9%。百公斤子粒带走K₂O量按2.20 kg估算,带走K₂O 181.5 kg·hm⁻²;合理施K₂O量为90 kg·hm⁻²情况下,土壤K₂O处于消耗状态;如暂不考虑外源K₂O,则土壤—肥料

K₂O转化率=181.5/90.0=201.7%。此种情况下不能直接求算肥料K₂O的转化率,需用 $W_j - W_i$ 数据来推算(以下不再涉及土壤养分消耗情况下的案例)。

3.2 不进行秸秆还田、施用有机肥情况下

以3.1为例,假设有机肥当季提供30.0 kg·hm⁻² N,化肥N用量为150.0 kg·hm⁻²,土壤N保持平衡;此时,N转化率=148.5/(150.0+30.0+25.0)=72.4%。

3.3 进行秸秆还田、不施用有机肥情况下

仍以3.1为例,化肥N用量为150.0 kg·hm⁻²,土壤N保持平衡;带走N 148.5 kg·hm⁻²中按60%含在子粒中,则 $W_{j(\text{grain})}$ =89.1 kg·hm⁻²。则N经济产量转化率=89.1/(150.0+25.0)=50.9%;N转化率=148.5/(150.0+25.0)=84.9%,这其中没有考虑秸秆养分,如果秸秆养分按45.0 kg·hm⁻²计算,则N转化率=148.5/(150.0+25.0+45.0)=67.5%。即本季前秸秆转化后可被吸收的养分经过一个季节的循环又转移到作物新的秸秆中,这部分养分在数量上相等,但却实现了一次功能转换,促进了化肥养分的吸收和为作物吸收养分做出了贡献。

3.4 进行秸秆还田、施用有机肥情况下

仍以3.1为例,假设有机肥当季提供30.0 kg·hm⁻² N,化肥N用量为120.0 kg·hm⁻²,土壤N保持平衡;带走N 148.5 kg·hm⁻²按60%含在子粒中,则 $W_{j(\text{grain})}$ =89.1 kg·hm⁻²。则N经济产量转化率=89.1/(120.0+30.0+25.0)=50.9%;N转化率=148.5/(120.0+30.0+25.0)=84.9%,这其中没有考虑秸秆养分,如果秸秆养分按45.0 kg·hm⁻²计算,N转化率=148.5/(120.0+30.0+25.0+45.0)=67.5%。

3.5 肥料长期定位试验情况下

仍以3.1为例,化肥N用量为180.0 kg·hm⁻²,土壤养分保持平衡;带走N 148.5 kg·hm⁻²;N转化率=148.5/(180.0+25.0)=72.4%。如果 $W_j > W_i$ 可求算出肥料培肥率。

3.6 示踪试验情况下

一年或一季肥料田间示踪试验所获得的参数不足以反映中、长期肥料养分转化和土壤养分变化状态,但示踪试验可以提供当季肥料养分转化的客观情况,因此示踪试验是验证其他方法所获得参数的矫正方法。特别提示:本文所推导的各种方法建立在至少几年常规田间试验基础上,在土壤养分保持平衡或积累情况下,即可通过简单的试验方法求算出施肥参数,达到指导合理施肥的目的。这其中有一些为寻求简化求算方法而采取的替代或换算方法,不能不说是

一种长期实践和思考的结果,也是理论通用施肥模型转化为实用通用施肥模型的处理技巧。

3.7 普通肥料田间试验情况下

如不进行秸秆还田和不施用有机肥情况下,吉林省目前 $7\,500.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 玉米产量情况下,一般施 N 量为 $165.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,带走 N $135.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,土壤 N 基本保持平衡;如果外源 N 按 $25.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算,则 N 转化率= $135.0/(165.0+25.0)=71.1\%$ 。

3.8 轮作栽培模式情况下

以河南省冬小麦—夏玉米轮作为例:合计产量按 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算,冬小麦和夏玉米百公斤子粒带走的 N 量相近,统一按 1.80 kg 估算,则带走 N $270.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;合理施 N 量为 $375.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 情况下,土壤 N 基本保持平衡;如果外源 N 每年按 $25.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算;N 转化率= $270.0/(375.0+25.0)=67.5\%$ 。

4 固定施肥模式下通用施肥模型的简化

根据实际工作需要,有必要对固定施肥模式下的通用施肥模型进行简化,使其更适合于基层使用。

4.1 土壤化肥养分生物产量转化率的定义

所谓固定施肥模式是指:一块农田或一类农田或一个区域某地貌单元和土壤类型上的某作物按某种栽培模式种植,除了化肥用量外,有机肥、秸秆、外源养分和栽培模式等等条件基本是不变的或变化不大的,于是,产量与最佳施肥量之间就形成一定的对应关系。

根据式(1)得式(19)~(22):

$$W_{\text{inorganic}} = W_{\text{output}} + (W_j - W_i) + (W_{\text{leave}} - W_{\text{organic}} - W_{\text{other}} - W_{\text{i(straw)}}) \quad (19)$$

设 $\Delta W_{i-j} = (W_j - W_i) + W_{\text{leave}} - W_{\text{organic}} - W_{\text{other}} - W_{\text{i(straw)}}$,它是固定施肥模式下的特征参数,则:

$$W_{\text{inorganic}} = W_{\text{output}} + \Delta W_{i-j} \quad (20)$$

$$W_{\text{output}}/W_{\text{inorganic}} + \Delta W_{i-j}/W_{\text{inorganic}} = K_{\text{yield-output}} + K_{\text{output}} = 1 \quad (21)$$

式(21)中, K_{output} 为对应生物产量的施肥模式特征参数变化率 A,则:

土壤—化肥养分生物产量转化率+施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 $A=1$ (22)

当 $W_j \geq W_i$ 情况下,定义: $K_{\text{yield-output}} = W_{\text{output}}/W_{\text{inorganic}}$ 为化肥养分生物产量转化率(即土壤表观上对作物养分没有贡献), $K_{\text{output}} = \Delta W_{i-j}/W_{\text{inorganic}}$ 为施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 A。

当 $W_j < W_i$ 时,土壤养分实际上处于消耗阶段,定

义: $K_{\text{yield-output}} = W_{\text{output}}/W_{\text{inorganic}}$ 为土壤—化肥养分生物产量(相对于化肥投入的)转化率(即土壤表观上对作物养分有贡献), $K_{\text{output}} = \Delta W_{i-j}/W_{\text{inorganic}}$ 为施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 A。

特殊说明:如果 $K_{\text{yield-output}} > 1$,说明作物吸收的养分 W_{output} 比 $W_{\text{inorganic}}$ 多,此种情况下 $K_{\text{yield-output}}$ 仍然可以作为相对参数指导施肥。因为 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{\text{i(straw)}}$ 这三部分养分和土壤养分对 W_{output} 都可能贡献,但这部分养分没有与 $W_{\text{inorganic}}$ 相加。正确的计算方法是: $W_{\text{output}}/[W_{\text{inorganic}} + W_{\text{organic}} + W_{\text{other}} + W_{\text{i(straw)}} + (W_j - W_i)]$,但是 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{\text{i(straw)}}$ 、 W_j 、 W_i 都比较难以测准。我们知道:施肥模型和参数优化就是寻求最简单的方法尽量通过普通肥料田间试验而获得参数去指导施肥和评价肥效。

4.2 土壤化肥养分子粒产量转化率的定义

根据式(1)得式(23)~(26):

$$W_{\text{inorganic}} = W_{\text{j(grain)}} + (W_j - W_i) + (W'_{\text{j(straw)}} + W_{\text{leave}} - W_{\text{organic}} - W_{\text{other}} - W_{\text{i(straw)}}) \quad (23)$$

设 $\Delta' W_{i-j} = (W_j - W_i) + W'_{\text{j(straw)}} + W_{\text{leave}} - W_{\text{organic}} - W_{\text{other}} - W_{\text{i(straw)}}$,它是固定施肥模式下的特征参数,则:

$$W_{\text{inorganic}} = W_{\text{j(grain)}} + \Delta' W_{i-j} \quad (24)$$

$$W_{\text{j(grain)}}/W_{\text{inorganic}} + \Delta' W_{i-j}/W_{\text{inorganic}} = K_{\text{yield-grain}} + K_{\text{grain}} = 1 \quad (25)$$

式(25)中, K_{grain} 为对应子粒产量的施肥模式特征参数变化率 B,则:

土壤—化肥养分子粒产量转化率+施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 $B=1$ (26)

当 $W_j \geq W_i$ 情况下,定义: $K_{\text{yield-grain}} = W_{\text{j(grain)}}/W_{\text{inorganic}}$ 为化肥养分子粒产量转化率(即土壤表观上对子粒养分没有贡献), $K_{\text{grain}} = \Delta' W_{i-j}/W_{\text{inorganic}}$ 为施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 B。

当 $W_j < W_i$ 时,土壤养分实际上处于消耗阶段,定义: $K_{\text{yield-grain}} = W_{\text{j(grain)}}/W_{\text{inorganic}}$ 为土壤—化肥养分子粒产量(相对于化肥投入的)转化率(即土壤表观上对子粒养分有贡献), $K_{\text{grain}} = \Delta' W_{i-j}/W_{\text{inorganic}}$ 为施肥模式特征参数(相对化肥养分的)变化率 B。

特殊说明:如果 $K_{\text{yield-grain}} > 1$,说明作物吸收的养分 $W_{\text{j(grain)}}$ 比 $W_{\text{inorganic}}$ 多,此种情况下 $K_{\text{yield-grain}}$ 仍然可以作为相对参数指导施肥。因为 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{\text{i(straw)}}$ 这三部分养分和土壤养分对 $W_{\text{j(grain)}}$ 都可能贡献,但这部分养分没有与 $W_{\text{inorganic}}$ 相加。正确的计算方法是: $W_{\text{j(grain)}}/[W_{\text{inorganic}} + W_{\text{organic}} + W_{\text{other}} + W_{\text{i(straw)}} + (W_j - W_i)]$,但是 W_{organic} 、 W_{other} 、 $W_{\text{i(straw)}}$ 、 W_j 、 W_i 都比较难以测准。我们知道:施肥

参数如果在基层容易获得并且比较稳定,那么即使它是相对参数,也能大体评价肥效和具体指导施肥,即其实践意义重大。

5 通用施肥模型应用简介

我们从1998年提出生态平衡施肥理论和方法,已经实践并完善十四年^[1-15],据此所研制的测土配方施肥专家系统系列软件(包括省级管理软件、示范县网络和单机软件、网络售肥软件、触屏软件、手机软件)至今已有十余省、区、市(吉林、辽宁、黑龙江、内蒙古、天津、山东、河南、甘肃、青海、四川、浙江、广西、广东、重庆等)推广使用^[16],其中吉林省从2005年使用至今,与常规施肥相比增产10%以上。

前文按通用施肥模型理论和方法计算的结果^[14-15],与常规肥料利用率算法相比,肥料利用率可提高20%~40%以上。以我国每年实际肥料折纯量5460万t为基数,每吨纯养分按4000元计算,N、P、K肥料利用率统一按提高20%计算,每年增加效益为436.8亿元,这部分效益以前被错误的计算方法掩盖了,同时肥料污染环境的负荷也相应地减少了。

特别提示:本文和前文^[14-15]所构建的以生态平衡施肥理论为基础的通用施肥模型,主要适合于大田作物也包括蔬菜和果树的施肥参数求算和指导施肥,温室和大棚情况下的施肥模型不在本研究范畴内。

6 结论

由本系列论文研究结果得出^[14-15]:(1)生态平衡施肥是今后施肥的主要发展方向,是关系到国家粮食安全生产、环境保护和农民收入等的重要理论、方法和技术;(2)通用施肥模型是生态平衡施肥的核心内容;(3)通用施肥模型既是理论模型,又是实践模型(可根据实际情况获得简化模型);(4)不同施肥模式下通用施肥模型表达方式不同,参数体系也不同;(5)生态平衡施肥理论和方法是今后测土配方施肥工作的科学基础和方法基础;(6)所建立的通用施肥模型不能穷尽所有施肥模式,读者可根据实际情况确定适合当地施肥模式的施肥模型、指标体系和评价体系。

7 展望

始于2005年的全国测土配方施肥工作,到2011年已经是第七个年头了,目前积累了大量的土壤测试数据、肥料田间试验数据和其他数据。但是,如何科学

地使用好这些数据是目前和今后测土配方施肥工作的重点和难点。由于以肥料利用率为代表的传统施肥理论已经不能很好地服务于实践^[1-15]。因此,全国测土配方施肥工作已经承受着巨大的舆论压力,处于迫切需要突破理论和技术瓶颈的阶段,如理论和技术无法实现创新性的突破,则全国测土配方施肥工作只能是建立在传统施肥理论之上的空中楼阁,是经不起实践和时间检验的。

测土配方施肥科学基础应该以生态平衡施肥理论和方法为基础,测土配方施肥不应该以测土为主,而应该以中、长期肥料田间试验为主,通过长期监测地力可以确定土壤养分是处于哪个阶段(平衡或提高或消耗),使施肥建立在以土壤养分平衡或提高为核心的基础上。因此,建议国家有关部门对生态平衡施肥理论和方法进行深入研究,使测土配方施肥工作建立在科学的理论和方法基础之上,从而建立我国粮食安全生产的土壤肥料科学理论体系、方法体系和推广体系。

参考文献:

- [1] 侯彦林. 可持续发展呼唤“生态肥料”[N]. 科学时报, 1998年11月18日.
- [2] 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 Ecologica Sinica*, 2000, 20(4):653-658.
- [3] 侯彦林, 任 军, 郭 喆. 生态平衡施肥专家系统的建立及其应用(I)[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 54-56.
HOU Yan-lin, REN Jun, GUO Zhe. Establishment and application of expert system of ecological balanced fertilization(I)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1):54-56.
- [4] 侯彦林, 郭 喆, 任 军. 生态平衡施肥专家系统建立及其应用(II)[J]. 土壤通报, 2002, 33(2):133-136.
HOU Yan-lin, GUO Zhe, REN Jun. Establishment and application of expert system of ecological balanced fertilization(II)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2):133-136.
- [5] 侯彦林, 郭 喆, 任 军. 不测土条件下半定量施肥原理和模型评述[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 31-35.
HOU Yan-lin, GUO Zhe, REN Jun. Summarization of principles and models for semi-quantitative fertilization without soil testing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4):31-35.
- [6] 侯彦林, 闫晓燕, 任 军, 王新民. 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.
- [7] 侯彦林, 任 军. 生态平衡施肥技术产业化模式和机制研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(3):191-194.

- HOU Yan-lin, REN Jun. Studies on industrialization mode and mechanism of ecological balanced fertilization technique[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3):191-194.
- [8] 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.
- [9] 侯彦林, 陈守伦. 复混(合)肥配方软件设计原理和方法[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(5):51-53.
- HOU Yan-lin, CHEN Shou-lun. Principle and method of software-designing of compound fertilizer formulation[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(5):51-53.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 侯彦林. 肥效评价的生态平衡施肥指标体系的应用[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1477-1481.
- HOU Yan-lin. Application of index system of ecological balanced fertilization for fertilizer efficiency evaluation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1477-1481.
- [16] 北京优雅施土肥技术咨询服务中心. 测土配方施肥系列软件[EB/OL], [2011-09-10]. <http://www.bjyours.com>.