

◆ 论 坛 ◆

# 试论“增值肥料”的内涵及其评价 “中国粮食高产我们可以做什么”报告之二

许秀成

(郑州大学, 河南 郑州 450001)

[摘要] 提出增值肥料的概念, 探讨了增值肥料的内涵及其评价方法。全面认识肥料的价值才能使肥料更科学地为农业服务, 确保粮食安全。

[关键词] 增值肥料; 肥料效益; 肥料与环境; 熵; 资源可持续利用

[中图分类号] TQ44 [文献标识码] A [文章编号] 1007-6220(2010)01-0001-05

## Discussion on the connotation of “Value-added Fertilizer” and its evaluation —Report “What should we do for high grain yield in China”

XU Xiu-cheng

(Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** The concept of Value-added Fertilizer is proposed, its connotation and evaluation are also discussed. The comprehensive understanding on the fertilizer value can make the fertilizer more scientific application on agriculture, ensuring grain security.

**Key words:** Value-added Fertilizer; fertilizer benefit; fertilizer and the environment; entropy; sustainable utilization of resources

肥料是粮食的粮食。由国际肥料工业协会主编的《世界肥料使用手册》指出: 肥料是提供植物养分或改善土壤肥力的物质。它是增加作物产量和改善食物和饲料品质的最有效的方法。由于有了肥料, 地球才能够支撑不断增长的人口对食物的需求。以最新的专业技术进行施肥是农民的财富之源, 是人类食物和健康之源, 是“健康的促进者”<sup>[1]</sup>。

施肥不能单纯地追求增加产量, 改善品质有利于人类健康; 肥料的生产与施用还应有利于环境保护, 有利于资源合理利用, 有利于社会经济可持续发展。据此, 提出增值肥料的概念, 探讨增值肥料的内涵及其评价。期望引起社会各界对肥料价值的全面认识, 使肥料、特别是化学肥料更科学地为农业服务, 确保粮食安全。

### 1 增值肥料的提出

2000年11月应林葆理事长之约, 笔者在中国植物营养与肥料学会召开的全国复混肥料高新技术产业研讨会(昆明)上, 介绍“世界控制释放肥料发展现状”。介绍了《Fertilizer International》2000

年 March/April 的两篇文章<sup>[2-3]</sup>。其一: 控制释放和增值肥料——寻找理想中的幸福之地; 其二: 在增值肥料栏目中, 发表了满足好收成与提高肥效的双重需求。这两篇文章均以介绍缓释和控制释放、掺有硝化抑制剂及尿酶抑制剂的稳定肥料、叶面肥为主。这些能提高利用率的肥料, 在我国被称为“新型肥料”, 而《Fertilizer International》将其归属于“增值肥料”。

● 化学合成缓释肥料的先驱产品脲甲醛, 1924年作为化学品取得专利。1995年美国开始脲甲醛(UF)生产<sup>[4]</sup>。而聚合物包膜肥料、包硫尿素、以肥料包裹肥料的包裹型缓释肥料, 分别于20世纪60年代、70年代、80年代开始生产<sup>[5]</sup>。

● 早在1940年, 就确立了尿酶抑制剂可延缓尿素在土中的水解。在我国, 20世纪80年代末由沈阳应用生态研究所研制成功“缓释(长效)尿

[收稿日期] 2009-09-28

[作者简介] 许秀成(1936-), 男, 安徽歙县人, 教授, 磷肥与复肥杂志主编, 国家钙镁磷复合肥技术研究推广中心主任。  
E-mail: pxusun@126.com

素”，并应用于农业生产<sup>[6]</sup>。

● 前苏联和美国于20世纪20年代，就开始研究和应用叶面肥料；日本、西欧于20世纪60年代，我国于80年代相继出现商品叶面肥<sup>[7]</sup>。

这些新型肥料已有50~90年的研究史，20~50年生产历史。从时间概念上说，不能称之为“新肥料”。但这些肥料能比现有肥料有更高的肥料利用率，施等量的营养元素，能产生更多的效益，称为“增值肥料”也许更为确切。

## 2 对增值肥料认识的发展

2001年国家钙镁磷复合肥技术研究推广中心筹划以生态工艺代替传统工艺作为中心主攻方向。

生态学是研究生物与环境相互关系的一门科学，它正在成为人类合理利用资源，改善和保护环境质量的理论基础。人们从不同角度研究生态学，从工艺学角度来研究这种相互关系称为生态工艺学，它是研究以什么样的生产工艺能有利于生物与环境的协调。“生态肥料工艺”特征为：

- 利用低品位及目前工艺难以利用的矿物为原料；
- 生产过程中不消耗或少消耗能源；
- 生产过程对环境排放量少或零排放；
- 从原料加工为产品，系统的熵增小，对生态环境影响小。

开展生态肥料工艺研究，拓展了我们对增值肥料内涵的认识，导致开发了一系列利用生态肥料工艺生产的新型肥料及新型生产工艺。例如：

- 比缓释、控释肥料有更高利用率的根际肥料及以非水溶性营养源为主的灌溉施肥方法；
- 以磷矿直接部分酸化制包裹型复合肥料及尿基过磷酸钙，可实现氟的低排放及低能耗；
- 利用更低品位磷矿及难溶性钾矿生产熔融磷钾肥(6818)；
- 具有诱根下行，促根生长，提高抗倒伏、防病害的根系生态调控肥料。

2008年7月在全国化工硫磷设计技术中心第12次年会上，笔者作了“肥料生产生态工艺与增值肥料”的学术报告<sup>[8]</sup>。在会上呼吁，应开展增值肥料的研究：

- 研究农民施用什么肥料是增值的，什么是减值的？使肥料能发挥更佳效益；
- 研究开发部门应开发具有增值效果的肥料；
- 生产单位应生产增值肥料；
- 有必要建立增值肥料的评价机构。

从2000年介绍增值肥料，2001年后开展生态肥料工艺研究，特别是2001~2005年参加国家“十五”863计划“环境友好型肥料研究与产业化”课题及2006至今参加“十一五”国家科技支撑计划“复合(混)肥养分高效优化技术研究”课题。8年多来，笔者与中国农业大学、中国农科院土肥所、华南农业大学、北京农林科学院以及中阿肥料公司、吉林农业大学、西南农业大学、西北农林科技大学、山东省土肥站、湖南省土肥站的农学专家，切磋工艺与农艺结合之道，交流彼此开发的新型肥料。在诸多农学家的支持帮助下，我们完成了一些增值肥料的农化试验。在无拘束的小型研讨会上，相互启发，也加深了我们对增值肥料的认识。

## 3 增值肥料的内涵

增值肥料(Value-added Fertilizer, VAF)，通常是指那些能提高肥料利用率的肥料。

高的肥料利用率，不仅与肥料本体而且与施肥方法密切相关。增值肥料的内涵包括肥料本体、施肥方法，甚至包括施肥机械。因此，仅考虑肥料本体的新型肥料不能发挥最大增值效果，也不能称为增值肥料。日本聚合物包膜控释肥料在水稻田大面积推行是与“不耕起移植栽培的育苗箱全量施肥技术”及“侧条施肥田植机”的使用分不开的。而中科院石家庄现代化研究所闫宗彪研究员开发的涂层一次性施缓释BB肥，也是在与之配套的施肥机械完成施肥下，而取得了良好的效果。

当前，缓控释肥料的理念已广泛为人们所接受，但实质上缓释、控释是两大类肥料；增值肥料也是一种理念，它是多种高利用率肥料的统称。

作为增值肥料的缓释肥料，作为增值肥料的控释肥料，均应以肥料本体、施肥方法、施肥机械整体提供给用户，才能达到最大增值效果。而不是以“缓控释肥”作为概念进行商业炒作。同样，“增值肥料”也不应作为一种概念进行炒作。

为区别所开发的肥料是从什么角度达到增值目的，我们提出了广义的增值肥料概念。

## 4 广义的增值肥料

1) 定义：能增加农民收益，改善环境，节约资源(能源)，有利于恢复生态平衡的肥料。

2) 分类：第一类 能提高养分元素利用率的肥料，即通常意义的增值肥料。

第二类 具有附加功能的增值肥料，这包括：

- 具有抗倒伏功能的肥料，抗倒伏则能保证作物高产，而使农民增收；

- 具有抗病害功能的肥料，它能减少农药的使用量，使食品更安全；

- 具有能提高作物品质或增加作物中有益于人、畜健康及土壤微生物多样性的增值肥料；

- 具有改善水利用率，节约水资源消耗量的增值肥料。

第三类 能合理利用资源的增值肥料，它包括可直接利用低品位磷矿、难溶性钾矿、超低品位磷钾矿生产含磷、钾及中、微量元素的肥料。

3) 广义增值肥料产生的效益：不同类型增值肥料产生的效益不同，受益对象各异。

第一类增值肥料的效益体现在农民增加收益，且同时减轻过量施肥对环境的污染。

- 能增加农民收入，又能减轻环境污染的某些缓释、控释、缓效增值肥料，市场前景好。

- 由于生产成本低，农民增产不增收，但能减轻环境污染，这种增值带来的环境效益使全民受益。国家可从全民税收中予以财政补贴。

- 单纯增加种植者收益，而加重对环境污染的肥料及施肥方法，如大田作物过量施肥，大棚蔬菜的冲施肥，不属于增值肥料。国家应出台政策加以限制或加征污染费。

第二类功能性增值肥料的效益，因生产方法不同，受益对象不同。

- 通过添加某些营养元素能增加植物细胞壁强度，以达到抗倒伏功能；促进作物健壮，以提高作物免疫能力的抗病害肥料；促使作物根系发达，向纵深发展，使其能利用下层土壤水分、养分的肥料。这类增值肥料生产成本低，单位养分的农学效率高，农民受益，工厂增收。健康的作物有益于全民健康。

- 通过添加植物生长调节剂达到抗倒伏，添加农药（除草剂）达到抗病（除杂草），以保水剂达到改善水利用率的功能性肥料。由于植物生长调节剂、农药、保水剂成本高，农民不一定增收，应视具体情况确定是否属于增值肥料。

第三类资源节约型增值肥料，有利于资源的可持续利用，社会可持续发展。这种增值所带来的社会效益，应由国家出台优惠政策或进行财政资助，鼓励这类增值肥料的发展。

## 5 增值肥料的评价

不同类型增值肥料的评价方法不同：

- ◆ 对农民带来经济效益的肥料，以肥料投入（肥料成本与施肥成本）及农民增收给予评价。

中国农业大学资源与环境学院赵荣芳等人，研究了不施肥、传统氮素管理方式、优化氮素管理方式、一次性基施包裹型缓/控释肥对冬小麦产量、土壤无机氮和氮肥利用率的影响<sup>[9]</sup>。优化氮素管理与传统氮素管理相比，氮素用量减少78%，产量仅下降1%，大大减轻了对环境的污染，虽然氮素实时监控多花费400元，每公顷纯收入仍增加222元；包裹肥一次基施，氮素投入减少67%，且省工省力，虽然产量下降3%，但每公顷纯收入比传统氮素管理增加411元。不同处理方法的氮肥利用率，经测定，传统氮素管理19.1%，包裹型肥料Luxecote 61.1%，优化氮素管理72.6%，通过氮素实时监控技术，即使施用传统的尿素，也可达到很高的氮肥利用率<sup>[9]</sup>。从增加农民收益、减少用工量及减轻过量施氮对环境污染多方面比较，包裹型缓/控释肥（Luxecote）均属值得推广的增值肥料。

- ◆ 对环境带来效益的增值肥料，通过化肥施用的环境成本或修复环境所需的成本计算环境效益。

德国氮肥施用量远高于欧盟平均值。1985年德国氮肥施用量是美国的5倍多。慕尼黑工业大学胡云才教授等介绍了德国农业氮投入对环境造成的经济损失。据估算，治理每吨N<sub>2</sub>O对环境所造成的危害需1.13万欧元，治理释放的NH<sub>3</sub>每吨需花256欧元。以1995年为例：NH<sub>3</sub>挥发造成的经济损失1.5亿欧元，N<sub>2</sub>O的释放造成的经济损失9亿欧元，NO<sub>3</sub>超标的地下水净化所需费用4.14亿~5.6亿欧元，3项总和约16亿欧元<sup>[10]</sup>。1995/96年度德国氮肥消费量177万吨，为修复每吨氮对环境造成的污染需900欧元之多！德国政府充分认识到修复过量施肥对环境的影响耗资巨大，而加大了限制过量施肥的力度。

南京大学地理与海洋科学学院赖力博士、黄贤金教授等对中国化肥施用的环境成本进行了估算，他们以分析化肥施用产生的污染剂量为基础，借助能值分析理论和伤残调整生命年评估手段，估算了1990~2005年全国化肥施用环境影响的能值成本和宏观经济价值<sup>[11]</sup>。2005年的计算结果如表1所示。由表1可知，2005年全国化肥施用环境成本总计188亿元，其中：大气污染37.8亿元，占总成本的20%；土壤污染51.4亿元，占27.3%；水污染99.1亿元，占52.7%。减少化肥对水污染是治理化肥污染的主要方面。化肥对健康的损害，总伤残调整年为50.2万年，其中：水体污染中硝酸盐22.3万年，大气污染中氨气7.51万年，土壤污

表1 2005年全国化肥施用环境影响估算

分类账户	污染类型	影响 剂量/ 万t	伤残 调整年/ 万年	宏观经 济价值/ 亿元
大气影响				37.8
NH <sub>3</sub>	酸雨、呼吸系统	147	7.51	28.8
N <sub>2</sub> O	温室效应、臭氧层破坏	25.5	0.102	0.391
NO <sub>x</sub>	臭氧层破坏、呼吸系统	32.9	2.23	8.56
土壤影响				51.4
硝酸盐	地下水污染、盐渍化	377	5.53	21.3
硫酸盐	土壤破坏、土壤板结	17.9	1.26	0.482
镉(Cd)	重金属污染	0.005 6	7.72	29.6
水源影响				99.1
硝态氮	富营养化、致癌效应	731	22.3	85.6
铵态氮	富营养化	177	2.96	11.4
磷酸盐	富营养化	104	0.569	2.18
总计			50.2	188

染中镉 7.72 万年，3 项总计贡献了近 75% 的健康损害。

赖力等还对我国 31 个省市自治区化肥施用的环境成本总量进行了估算，最高依次是河南、山东、江苏及河北，每省年均超过 10 亿元。而化肥对环境的影响强度最高的依次为山东、上海、江苏、天津、河南 5 省市，每公顷耕地面积的环境成本负荷均在 200 元以上。

2005 年我国氮肥生产量 3 200 万 t，农业消费约 2 500 万 t，若按上述估算，2005 年我国每施 1 t 氮，平均施肥环境成本约 750 元。表征对健康损害的伤残调整为 7.3 d。

在评价对环境带来效益的增值肥料时，以少施用 1 t 氮按 750 元计算其增值效益。假如 1 t  $w(N)$  为 36% 的缓释尿素（包硫、包膜、脲甲醛）增产效果确实能等同于 1 t 普通尿素，则减少了 100 kg N 对环境的影响。农民使用 1 t 这种  $w(N)$  36% 的增值尿素，政府似乎应给予 75 元环境补贴。

◆ 资源节约型增值肥料的评价，笔者曾建议以熵值变化计算这类肥料的社会效益<sup>[12]</sup>。

在开展生态肥料工艺研究与开发过程中，我们曾提出熵增最小、能耗最低、对环境排放量最少的原则。“熵”为热力学函数。热力学中的熵被用于表征一个物理系统的无序程度。一切自发过程都伴随着熵增，当熵达最大值时，有效能量完全耗散，系统处于混乱度最大的状态。一些学者将“熵”的概念引申用于哲学、经济学、社会学，而获得许多新见解。美国学者里夫金的著作“熵”：一种新的世界观，以熵增观念抨击美国人的生活方式过多耗

用矿产资源；信息论创始人美国应用数学家香农（C.E.Shannon），引入熵的概念用于度量信息。事实上，当今任一种通讯设备——蜂窝电话、调制解调器、CD 播放器等的设计都离不开“香农熵”；原中国农业大学毛达如校长介绍了土壤系统熵的研究方法，并举实例说明如何利用熵值变化评价肥料投入对土壤肥力产生的效益<sup>[13-16]</sup>。

昆明理工大学国土资源工程学院唐敏博士在矿产资源管理研究中，利用熵理论，分析矿业的可持续发展。她认为：利用资源的过程是利用资源的扩散能力，过程实现了资源所蕴涵的潜在熵差能力。熵理论是对资源（特别是生态）耗用评价的重要手段。唐敏计算了云南某铜矿 1991 年至 2002 年选矿过程中累计熵增变化，并获得有益见解<sup>[17]</sup>。

肥料领域的资源节约首推磷资源。2003 年 5 月笔者撰写了《更新观念，重新审议磷矿加工的合理性》。文中以“熵”概念及“生态工艺学观点”考察了磷矿加工的合理性。并以：①原矿  $w(P_2O_5)$  19.37% 的低品位磷矿，经浮选后获得  $w(P_2O_5)$  30.5% 的磷精矿；②用该精矿按二水法工艺生产  $w(P_2O_5)$  28% 的稀磷酸；③稀磷酸浓缩后，与氨中和生产磷酸一铵（11-52-0）；④磷铵、尿素、氯化钾加工成高浓度复合肥（15-15-15）；⑤复合肥施入土壤，肥料中  $P_2O_5$  的 25% 为当季作物利用，3% 被淋失，72% 残存于土壤中。上述 5 个过程，不仅耗用了大量热能、化学能及人力消耗，而且每吨原矿中所含的 193.7 kg  $P_2O_5$ ，仅有 31.5 kg  $P_2O_5$  被当季作物利用。如表 2 所示<sup>[18]</sup>。

表2 磷矿利用过程中  $P_2O_5$  的去向

磷矿利用过程	$P_2O_5$ 质量/kg	占总量比例/%
磷矿原矿	193.7	100
选矿过程残留尾矿中	56.3	29.1
残留磷石膏中	8.8	4.5
磷铵及复肥制造中损失	3.9	2
土壤中淋失	3.7	1.9
土壤中残留	89.5	46.2
当季作物利用	31.5	16.3

试考察上述过程的熵值变化。从低品位磷矿 [ $w(P_2O_5)$  19.37%] 加工成高浓度磷肥 [ $w(P_2O_5)$  52%] 是从一种混乱度高的状态转化为混乱度低的有序状态，从热力学观点，它是熵值降低的过程，需外加能量并伴随物流损失的非自发过程；而高浓度磷肥最终分散在耕作层中，这种分散过程的熵增很大。我国土壤  $w(P_{全})$  为 0.04% ~ 0.25% [折合  $w(P_2O_5)$  0.09% ~ 0.52%]。对磷资源而言，土壤中的磷

处于混乱度极高的状态，它完全丧失了作为资源的扩散能力。因此，现有磷矿加工工艺是不合理的，即使世界磷肥工业均走这种加工路线，也是不利于磷资源可持续利用。曾为美国 NASA（国际航空和航天管理局）工作的 David，根据他研究太空中磷的循环，惊呼在可持续发展中，地球上的磷资源将呈现危机<sup>[19]</sup>。

华南农业大学资环学院廖宗文、刘可星教授等人开发的磷矿粉促释技术，最符合磷矿加工过程熵增最小原理，开发的一系列活化磷肥属于资源节约型增值肥料<sup>[20]</sup>。

利用笔者发明的玻璃结构因子科学配料方法，可使湖北大峪口  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  13.5% 的低品位磷矿，云南安宁  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  22% 的中品位磷矿分别生产  $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  有效) 大于 12% 及 18% 的钙镁磷肥，并且将磷矿中的  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}$  转变为植物营养元素，均属资源节约型增值肥料。

利用熵值变化计算资源节约型增值肥料的社会效益，尚待有志于此的博士、硕士生开发。可参照唐敏博士的方法计算，也可开发更科学的方法。唐敏文中提及：能够定量地描述资源扩散能力的物理量是槌田提出的“潜熵”；因环境治理、生产效率的提高、废物回收利用等产生了“负熵”。由此可见，当“熵”用于诸多领域时，大多是引用了“熵”的概念，而不是热力学中严格的物理量。因此，不同的学者，为了说明该领域的特定问题，而引入了一些新的术语。

热力学第三定律普朗克的表述为<sup>[21]</sup>：纯固体或纯液体在绝对零度的熵（ $S$ ）趋于零（ $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$ ）。为评估磷资源的可持续利用，我们能否设想：纯磷矿仅含氟磷酸钙  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  [ $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  42.3%]，它是具有最大扩散能力的磷资源。若以  $S_p$  表示磷资源利用的“潜熵”，并以  $S_p = \ln N$  表示：当  $N$  为 1 时， $\ln 1 = 0$ ，可定义纯磷矿的潜熵为 0；当  $N$  趋于无限大时， $S_p$  达极值，即当磷资源中的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量趋于 0 时，资源毫无扩散能力。我们还可以人为定义这种毫无扩散能力的磷资源潜熵为 100（即  $N = e^{100} = 2.7 \times 10^{43}$ ，表示磷资源中  $\text{P}_2\text{O}_5$  按天文数字高度分散）。则所有的磷资源潜熵介于 0 ~ 100 之间。我们应力图使磷加工过程中成品的潜熵与原料的潜熵之间的差值最小，按这种熵增最小的加工工艺，才最有利于资源的可持续利用。

## 6 结束语

肥料是粮食的粮食，供应什么样的肥料及如何

供应肥料对粮食生产至关重要。优化氮素管理，氮素用量减少 78%，产量仅下降 1%，使尿素的氮肥利用率达 72.6%。生产化肥需耗资源、能源，而施用化肥还要付出环境代价。因此，不计代价的增产、增收是不可取的。必须研究肥料对作物增产、环境影响、资源合理利用的综合价值。因此，“保证化肥供应，确保粮食安全”可能是错误的，应改为“合理供应化肥，确保粮食安全”。

## [参考文献]

- [1] [法]国际肥料工业协会.世界肥料使用手册[M].唐朝友,谢建昌,译.北京:中国农业出版社,1999:1-2.
- [2] Anon. Controlld-Release and Added-Value Fertilizer—Seeking the promised land[J].Fertilizer International,2000(375March/April):32-34.
- [3] Anon.Better Products—Improved Efficiency A Challenge To Be Met [J].Fertilizer International,2000(375 March/April):35-38.
- [4] 吕云峰.脲甲醛缓释肥[J].磷肥与复肥,2009,24(6):8-10.
- [5] 许秀成,李葭萍,王好斌.脲甲醛肥料在我国发展的可行性[C]//中国脲甲醛肥料技术(住商)高层论坛会议手册.青岛:中国化工信息中心、住商肥料(青岛)有限公司,2009:18-24.
- [6] 武志杰,陈利军.缓释/控释肥料原理[M].北京:科学出版社,2003.
- [7] 李燕婷,肖艳,李秀英,等.作物叶面施肥技术与应用[M].北京:科学技术出版社,2009:236.
- [8] 许秀成.肥料生产生态工艺与增值肥料[C]//全国化工硫磷设计技术中心第12次年会资料.黄山:全国化工硫磷设计技术中心,2008:119-124.
- [9] 赵荣芳,孟庆锋,陈新平等.包裹型缓/控释肥对冬小麦产量、土壤无机氮和氮肥利用效率的影响[J].磷肥与复肥,2009,24(5):77-80.
- [10] 胡云才,Reinhold G,Urs S.从德国农业投入来认识中国氮污染的严重性及应采取的对策[J].磷肥与复肥,2004,19(5):8-12.
- [11] 赖力,黄贤金,王辉,等.中国化肥施用的环境成本估算[J].土壤学报,2009(1):63-67.
- [12] 许秀成,李葭萍,王好斌.一种增值肥料——抗病害、抗倒伏肥料[C]//国家支撑计划复合(混)肥养分高效优化技术研究子课题抗病肥料研讨会.北京:[出版者不详],2008.
- [13] 杰里米·里夫金,特德·霍德华.熵:一种新的世界观[M].上海:上海译文出版社,1987.
- [14] 许秀成.21世纪化肥展望[J].磷肥与复肥,2002,17(5):1-5.
- [15] Jacob Bekenstein D.Information in the Holograph Universe[J].Scientific American,2003(8):49-55.
- [16] 毛达如.全国高等农业院校教材 植物营养研究方法[M].北京:北京农业大学出版社,1994:123-125.
- [17] 唐敏.利用熵理论来分析矿业的可持续发展[J].矿产保护与利用,2008(4):1-5.
- [18] 许秀成.更新观念——重新审议磷矿加工的合理性[J].云南化工,2003,30(3):5-9.
- [19] David Vaccari A. Phosphorus:A Looming Crisis[J].Scientific American,2009(7):42-47.
- [20] 刘可星,张俊涛,谷丽萍,等.广东省有机无机复合肥的促释和抗病功能肥料的开发与应用[J].磷肥与复肥,2008,23(5):55-57.
- [21] [美]克洛兹 I M,罗森伯格 R M.化学热力学[M].鲍银堂,苏企华,译.北京:人民教育出版社,1981:206.