

File No. 84

化肥生产与环境

化肥是以矿物和天然气等为原材料，通过化学或物理加工而制成的肥料。化肥主要含有植物生长必需的氮、磷、钾三大元素以及其他中量元素和微量元素，其特点是成分稳定、容易调节所含的成分量、施用方便、见效快、成本低廉等。

然而，化肥的原料可能含有有害物质，在生产过程中亦会产生某些有害成分。这些有害物质会留存于化肥里，当化肥被施用到耕地里后，作物在吸收肥料成分的同时也会吸收这些有害物质，有可能阻碍作物生长，给收获物带来污染。日本有关肥料安全的法律法规明确地列出了对化肥中可能含有的硫氰酸化合物、氨基磺酸、缩二脲、亚硝酸盐、砷、镉、镍、铬、钛、汞和铅这 11 种有害物质的浓度不得超过限制值。

另一方面，在化肥的生产过程不可避免地会排放出二氧化碳等温室气体、尾矿、废渣以及废水，这些排放出来的废弃物都会对环境造成负面影响。随着化肥需求量和生产量的不断增长，如何最大限度地减少化肥生产中产生的废弃物的排放，减少对环境造成的不良影响亦是肥料厂家的重要责任。

以下阐述化肥生产过程中排放的有害物质及其对环境的负面影响。

1. 氮肥生产

所有的氮肥均以合成氨为原料制造而成的。合成氨的工业制法均以氮气和氢气为原料，采用哈伯-博世法在高温高压的条件下进行合成。

空气的约 78% 是氮气，只需将空气冷却至 -196°C ，将氮气液化后进行分离即可获得。然而，自然界中并不存在有单质的氢气，获取氢气主要有水的电解、天然气重整和煤炭气化这 3 种方法。

以天然气和煤炭等化石燃料为原料制取氢气的过程中会排放出大量的二氧化碳。理论上，使用天然气重整进行制氢的话，制取 1 公斤氢气需要消耗 2 公斤天然气和 31.5 兆焦耳的热能，排放出约 5.5 公斤二氧化碳。实际操作中，设备运转等也会消耗一定的能量，因此使用天然气制氢的话，每制取 1 公斤氢气会排放出约 11.4 公斤二氧化碳。

使用煤炭为原料气化制氢会排放出更多的二氧化碳。理论上，根据原煤的类型和热值，制取 1 公斤氢气需要消耗 3.5~5 公斤煤炭和 31.5 兆焦耳的能量，排放出 8~10 公斤二氧化碳。实际操作中，煤炭的气化反应还需要消耗相当多的热能，使用煤炭制氢的话，每制取 1 公斤氢气将会排放出约 23~26 公斤二氧化碳。

另外，冷冻空气来液化分离氮气和在合成氨的过程中还会消耗大量的能量并产生一定量的二氧化碳。除了在制氢过程中排放的二氧化碳外，每合成 1 公斤氨还会额外排放 400~500 克二氧化碳。

由于 1 公斤氢气可合成 5.66 公斤氨，因此，以天然气为原料时，合成 1 公斤氨大约会排放 1.9~2.1 公斤二氧化碳。而以煤炭为原料时，二氧化碳排放量更高，合成 1 公斤氨会排放

4~5 公斤二氧化碳。图 1 是在合成氨的过程中排放出二氧化碳的示意图。

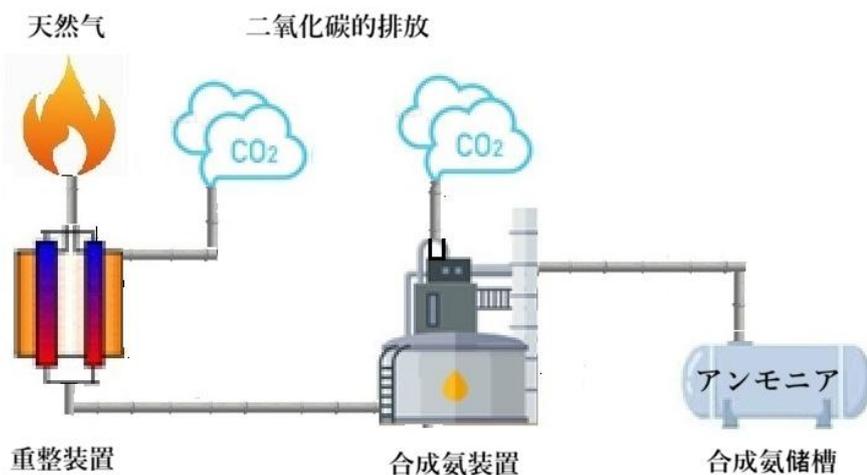


图 1. 合成氨的生产过程中排放二氧化碳的示意图

据统计，2024 年的全球合成氨产量达到了约 1.5 亿吨，由此会排放出约 4.5 亿吨包括二氧化碳在内的温室气体。其中四分之三以上的二氧化碳是在制氢过程中发生的，其余的二氧化碳则来自在冷冻空气来液化分离氮气和在氨的合成过程中为了维持高压高温所消耗的能量。

目前使用两种方法来减少制氢过程中的二氧化碳排放量。一种是将制氢过程中排放出来的二氧化碳进行捕获并将其封存在地下的多孔地质结构中。另一种是使用最为古老的传统制氢方法，即是用水进行电解来获得氢气。

然而，目前的技术水准尚未能够完全捕获使用化石燃料在制氢和合成氨的过程中排放出来的全部二氧化碳。现有技术的二氧化碳捕获率最高只能达到约 70%。因此，即使是使用天然气生产蓝氨，每合成 1 公斤氨也大约会排放出 0.6~1.0 公斤二氧化碳。

虽然通过水的电解制氢不会排放出二氧化碳，但合成 1 公斤绿氨时仍会排放出 400~500 克二氧化碳，这是因为冷冻空气来液化分离氮气以及合成氨时需要消耗一定的能量。另外，在制造和安装太阳能电池板和风力发电机时亦需要消耗大量的能量。

目前利用太阳能和风能等可再生能源生产绿氨被认为是最环保的选择。然而，并非每天都是大晴天，亦不能保证有恒常的风力。太阳能发电和风力发电属于劣质电力，电压和电流的不规律性波动会降低电解槽的电解效率并容易造成电极等的损坏。因此，尚需要进行长期和大量的研究来解决可再生能源所固有的不稳定性等问题。

但是，生产尿素需要使用大量的二氧化碳作为原料。理论上，以合成氨为原料生产尿素时，需要使用 0.567 公斤合成氨和 0.733 公斤二氧化碳才能生产出 1 公斤尿素。尿素工厂需要回收和利用制氢过程中排放的二氧化碳。换句话说，以天然气为原料生产尿素几乎不会排放出二氧化碳。若使用可再生能源生产尿素时，必须从外部获取二氧化碳来保证生产。因此，绿氨的用途主要限定在需要标榜环保，减少二氧化碳排放量的火力发电厂和船舶等交通工具用的燃料，并不包括尿素在内。

2. 磷肥生产

磷肥的原料是磷矿石。通常采用露天开采的方式来获得磷矿石。露天开采需要在预先清除植被和开挖表土露出矿脉，会产生大量残土，对地表环境有很大的伤害。在磷矿石的选矿过程也会产生大量的尾矿。每生产一吨磷矿石，大约会产生 1~1.5 吨的残土和尾矿。据统计数据，2024 年全球的磷矿石采掘量高达 2.4 亿吨，所产生的残土和尾矿量超过了 3 亿吨。

此外，使用硫酸处理磷矿石来提取磷酸时，会产生大量的磷石膏副产物。根据磷矿石的品位，副产的磷石膏量是磷酸量的 4.5~5 倍。据统计，2024 年的全球磷酸产量（折合 P_2O_5 ）约为 5500 万吨，副产磷石膏的数量约达到 2 亿吨。图 2 是在磷矿石开采和选矿过程中产生残土和尾矿以及在提取磷酸过程中产生磷石膏的示意图。

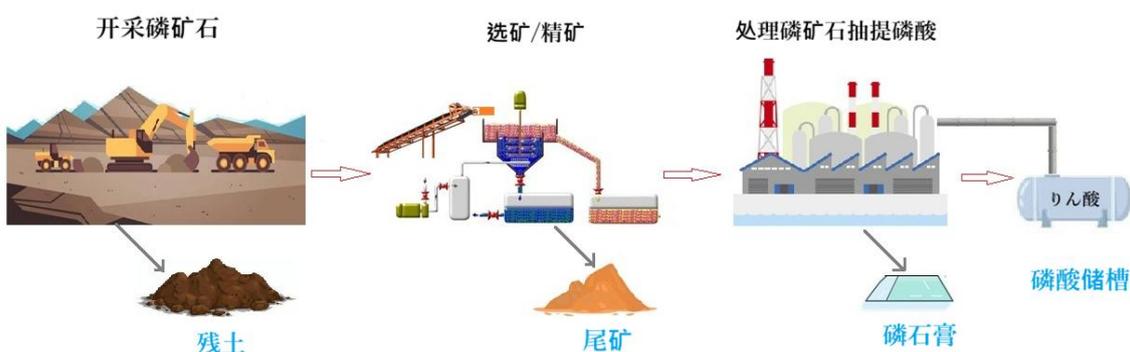


图 2. 在磷肥生产过程中产生残土、尾矿和磷石膏的示意图

采矿过程中产生的残土可以回填到矿区进行处理，但选矿后的尾矿由于含有大量水分和化学物质，处理起来则需要耗费大量人力物力。通常情况下，尾矿会被转运并堆放在尾矿坝中。当矿山关闭后或尾矿坝被填满后，需要进行生态系统修复，例如重新植树造林等方式来恢复自然。然而，从矿山开发到关闭需要数十年时间，在此期间，需要定期对尾矿坝进行巡逻检查和开展维护工作，以防尾矿泄漏等造成大规模的环境污染。

磷肥生产中最为棘手的是磷石膏的处理。磷矿石含有氟和镉等有害元素和杂质，这些有害物质在提取磷酸的工序中会富集到磷石膏里。由于磷石膏含有较多的有害物质，在日本不允许用于生产建筑用石膏板，只能作为水泥缓凝剂等，若不能够进行妥善处理，就会造成环境污染。

例如，中国每年开采约 1.5 亿吨磷矿石，提取磷酸来生产约 3000 万吨磷铵肥料（DAP 和 MAP）。有资料说中国每年在提取磷酸后产生的磷石膏量约为 7500 万吨，其累年的堆积量已经超过了 6 亿吨。另有资料显示，全球磷石膏堆积量超过 60 亿吨，大部分处于中国。图 3 是中国的磷石膏堆积场的照片。

由于磷石膏堆积场泄漏出的污水和飞散的粉尘能够造成的严重环境污染，特别是水质污染，中国政府于 2020 年制定和颁布了《长江保护法》，要求搬迁或拆除位于长江及其主要支流两岸 1 公里范围内的包括磷肥厂在内的所有污染工厂。

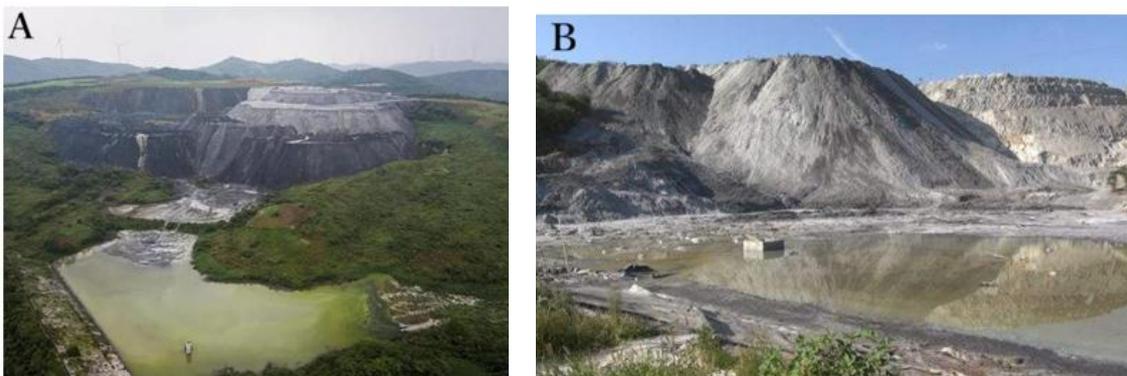


图 3. 中国的磷石膏堆积场 (A : 湖北省钟祥市、B : 贵州省)

为了减少磷石膏所造成的环境污染，有必要重新考虑生产和使用过磷酸钙、重过磷酸钙、钙镁磷肥等在生产过程中不产生或仅产生少量磷石膏的磷肥的可能性。

3. 钾肥生产

大部分钾肥是以可溶性含钾矿物（钾石盐、光卤石、无水钾镁矾等），少部分是以盐湖碱水为原料而制成的。可溶性含钾矿物需要从地下矿井开采，涉及到清除地表植被和改变地形，挖掘矿井隧道等还会产生大量残土。此外，在浮选和溶解再结晶的过程中亦会产生大量尾矿和矿渣，对环境造成不良影响。图 4 是钾肥生产过程中产生的各种废弃物的示意图。

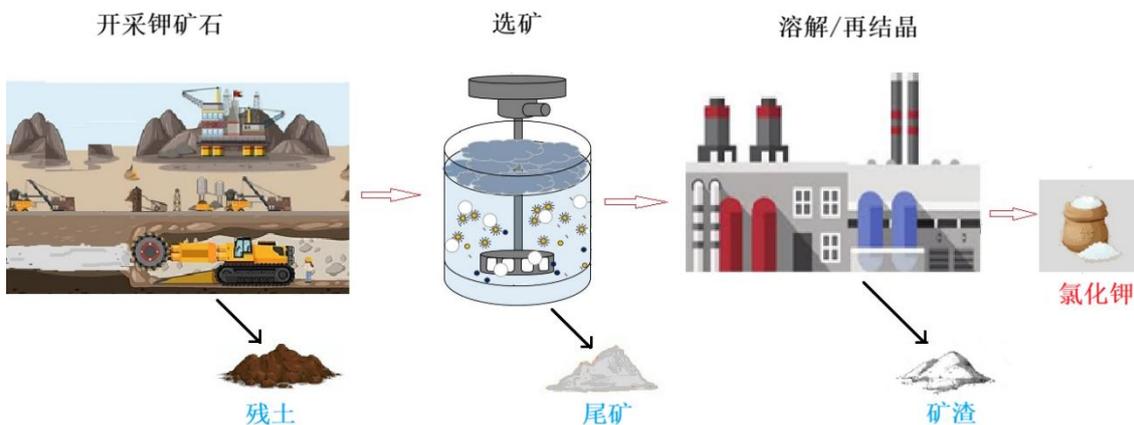


图 4. 钾肥生产过程中产生残土、尾矿、钾矿渣的示意图

每生产一吨氯化钾，大概会产生约三吨废弃物。这些废弃物通常被称为钾矿渣，含有大量的氯化钠和氯化镁等水溶性盐份。在俄罗斯、白俄罗斯、加拿大和德国等主要钾肥产区，已经堆积有数十亿吨钾矿渣，而且每年的新增量超过 1 亿吨。由于钾矿渣易溶于水，会通过渗透进入地下水，造成周围土地的盐碱化而形成环境污染。

例如，在德国的钾矿渣堆积场被称为蒙特卡利 (Monte Kali)，意思是「人造盐山」。位于

德国黑森州的赫林根（Heringen）有一座世界上最大的蒙特卡利。自 1976 年以来，有数百万吨钾肥生产过程中排放出来的氯化钠被堆积起来，形成了一座高度超过 200 米高的矿渣山。在黑森州的诺伊霍夫（Neuhof）以及下萨克森州的博克洛（Bokeloh）和弗里德里希沙尔（Friedrichshall）等地也存在有大型的钾矿渣堆积场（图 5）。

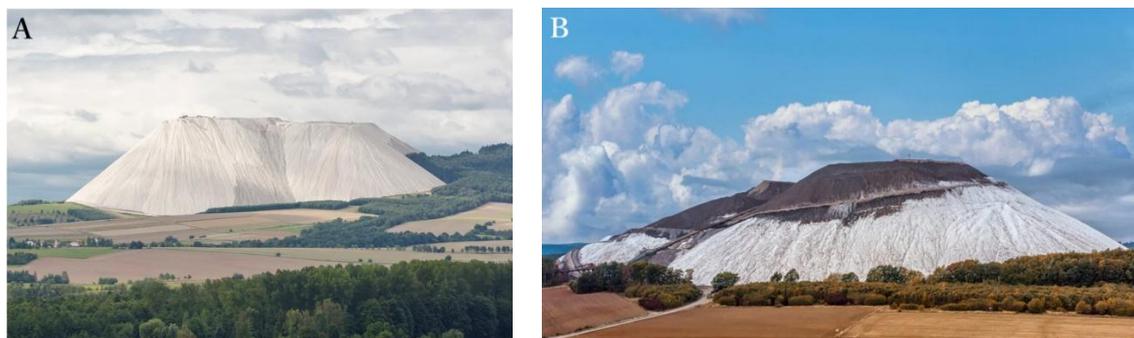


图 5. 德国的钾矿渣堆积场

（A：赫林根的蒙特卡利、B：诺伊霍夫的蒙特卡利）

钾肥生产过程中排放出来的残土、尾矿和矿渣会对环境造成严重的不良影响。解决措施主要是用建筑垃圾和土壤覆盖残土和尾矿，种植树木来减少尘土飞扬和流失。矿渣则通过回收其中的镁盐等有用物质来减少排放量。

例如，德国的 K+S 钾肥公司在下萨克森州的哈托夫（Hattorf）投资 5 亿欧元，建设了一座回收氯化镁的工厂。哈托夫的地下钾矿山已开采了一个多世纪。该工厂从光卤石提取氯化钾后留下的矿渣中回收氯化镁，从而可以减少 20% 的矿渣量排放量。在加拿大，萨斯喀彻温大学正在试验向废弃的钾尾矿池中添加聚合物水凝胶，以减少盐分的渗漏并促进植被的恢复。

此外，与传统的地下坑道开采法（即从地下挖出钾矿石送到地面上后进行选矿和溶解/再结晶）相比，地下溶解开采法（将水注入钾矿床以溶解钾和其他矿物，然后将饱和盐水抽送上地面后进行再结晶）可减少 80% 以上的废土和尾矿。

化肥是现代农业生产上最重要的农业资材。没有化肥就不能促进农作物的生长，达到高产稳产的目标。作为化肥生产商，不仅要保证化肥的供应，还需要最大限度地减少在化肥生产过程中产生的有害废弃物和妥善地处置这些废弃物，降低对环境的不良影响。