

doi: 10.12029/gc20231017001

张呐, 施泽明, 邹承杰, 朱英海, 赵锴, 周兆雨. 2025. 矿物质肥料特点、应用研究现状与发展展望[J]. 中国地质, 52(4): 1313–1324.

Zhang Na, Shi Zeming, Zou Chengjie, Zhu Yinghai, Zhao Kai, Zhou Zhaoyu. 2025. Characteristics, current research status, and development prospects of mineral fertilizers[J]. Geology in China, 52(4): 1313–1324(in Chinese with English abstract).

矿物质肥料特点、应用研究现状与发展展望

张呐¹, 施泽明^{1,2}, 邹承杰¹, 朱英海¹, 赵锴¹, 周兆雨¹

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 地学核技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:【研究目的】矿物肥料的发现及其应用在许多方面做出了巨大贡献, 能够为土壤施用养分以提高产量, 满足日益增长的粮食需求。【研究方法】本文系统搜集整理矿物肥料的研究成果, 针对矿物肥料特点、应用研究现状与发展展望进行了论述, 结合国内外矿物肥料的分类及土壤改良修复、农业产品生产方面的应用, 探讨矿物肥料对环境的影响以及展望环境可持续性。【研究结果】本综述主要有以下认识: (1) 列举矿物肥料的分类, 以提供有关其成分的最新知识; (2) 列举矿物肥料的研究现状, 以了解他们的重要性以及不足; (3) 减少矿物肥料对环境的影响以及展望环境可持续性而改进的施肥技术。【结论】过度施用矿物肥料会产生大量影响环境可持续性的污染物, 故在使用矿物肥料时要遵循科学施肥原则, 实施精准施肥。

关键词: 矿物肥料; 氮磷钾; 土壤改良; 农业生产; 农业地质调查工程

创 新 点: 本文系统构建了矿物肥料环境可持续性管理的多目标协同框架, 在全链条视角下评估了改进技术组合的多维效益与权衡并指明最优路径, 并前瞻性地识别并阐述了矿物肥料领域面向可持续发展的关键转型挑战与机遇。包括新型肥料开发、养分精准管理体系与循环经济模式的深度整合、以及区域尺度的养分平衡管理策略, 为未来研究方向与产业升级提供了清晰路线图。

中图分类号: S143 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1313-12

Characteristics, current research status, and development prospects of mineral fertilizers

ZHANG Na¹, SHI Zeming^{1,2}, ZOU Chengjie¹, ZHU Yinghai¹, ZHAO Kai¹, ZHOU Zhaoyu¹

(1. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Nuclear Technology in Geosciences, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of agricultural geological survey engineering.

[Objective] The discovery and application of mineral fertilizers have made significant contributions in many aspects, such as providing nutrients to the soil to improve yields and meet the increasing demand for food. **[Methods]** This paper systematically collects and organizes research findings on mineral fertilizers, discussing their characteristics, current research status, and future development prospects. By combining the classification of mineral fertilizers both domestically and internationally, as well as their applications in soil improvement and agricultural production, this paper explores the environmental impact of mineral fertilizers and proposes improved fertilization techniques for environmental sustainability. **[Results]** This review primarily entails the following

收稿日期: 2023-10-17; 改回日期: 2024-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373120)资助。

作者简介: 张呐, 女, 1992 年生, 博士, 主要从事矿山环境地球化学以及环境矿物学方面研究; E-mail: zhangna9215@126.com。

understandings: (1) Listing the classification of mineral fertilizers to provide the latest knowledge on their composition; (2) Describing the current research status of mineral fertilizers to understand their importance and limitations; (3) Reducing the environmental impact of mineral fertilizers and proposing improved fertilization techniques for environmental sustainability.

[Conclusions] Excessive use of mineral fertilizers can result in the production of pollutants that negatively impact environmental sustainability. Therefore, when using mineral fertilizers, it is important to follow the principles of scientific fertilization and implement precision fertilization.

Key words: mineral fertilizers; nitrogen, phosphorus, and potassium; soil improvement; agricultural production; agricultural geological survey engineering

Highlights: The core innovation of this review lies in systematically establishing a multi-objective synergy framework for the environmentally sustainable management of mineral fertilizers. Assessing the multi-dimensional benefits and trade-offs of improved technology portfolios from a whole-chain perspective, and identifying optimal pathways. Prospectively identifying and elucidating key transformative challenges and opportunities for sustainable development within the mineral fertilizer domain. These include the development of emerging fertilizer materials, the deep integration of precision nutrient management systems with circular economy models, and Nutrient balance management strategies at global/regional scales, providing a clear roadmap for future research directions and industrial upgrading.

About the first author: ZHANG Na, female, born in 1992, Ph.D., mainly engaged in mine environmental geochemistry and mineralogical process tracking in contaminated environments; E-mail: zhangna9215@126.com.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41373120).

1 引言

农业土壤,作为生命系统,与粮食安全、能源、水供应、碳平衡和气候变化密切相关,在全球大陆的社会经济发展中发挥着重要作用(Shuliko et al., 2022; Costantini and Mocali, 2022)。不断增长的世界人口和粮食需求,在生产性耕地减少的情况下必须提高单位面积的作物生产力。矿物肥料是指从矿物资源中提取出来的含有一定营养元素的肥料,主要由天然矿物、化学合成矿物和工业废料等组成,供给植物的主要有氮(N)、磷(P)、钾(K)三种营养物质,其他营养物质是锌(Zn)、硼(B)、铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)和钼(Mo)等化学物质(Ferreira et al., 2023)(图 1)。矿物肥料具有营养成分稳定、作用持久、不易挥发、不易流失等优点,是现代农业生产中不可或缺的重要肥料,且原料种类繁多,多为富钾长石或其他矿物,包括沸石(浊沸石和硅酸钙)、蒙脱石、钙长石、硅铝石榴子石和硅酸钙粉等以及多种元素矿物的混合物等。

本文主要总结矿物肥料的国内外研究现状,概述其分类特征,即 N、P、K 以及其他微量元素矿物肥料的研究热点及其应用,以了解如何有效地利用矿物肥料,在增产增量,解决粮食短缺的同时,也能

保护环境持续性。

2 矿物肥料的发展历史

在 17 世纪的欧洲,农业科学家发现了硝石(硝酸盐)对植物生长的积极影响。硝石成为了早期矿物肥料的重要组成部分。19 世纪工业革命和化学知识的进步,催生了现代化学肥料工业的发展。1842 年,德国化学家李比希发现了硝酸铵,成为了一种重要的氮肥(许经勇, 1983)。在 19 世纪,磷材料取代有机物质的使用,20 世纪磷矿物肥大量使用(Cordell et al., 2009)。19 世纪初合成肥料的发明无疑在改变全球粮食产量方面发挥了关键作用,1950 年以后,世界开始向农业土壤中大量添加矿物肥料。20 世纪 60 年代中期,日本首先把天然沸石应用于畜牧业,作为畜牧场的除臭剂,到 80 年代日本用于饲料的沸石粉量达 6000 t(翟永功, 1996)。随着农业科技的进步和对植物营养需求的深入研究,矿质肥料得到了更多的注意和应用。人们开始发展和研制多种矿质肥料产品,例如硫酸锌、硫酸铁、硅酸钾等。同时,对于矿质肥料的生产 and 应用也进行了改进和优化。随着对农业可持续性关注和环境保护要求,矿质肥料也得到了更多的推广和应用。人们开始研发和使用有机矿物肥料,将有机

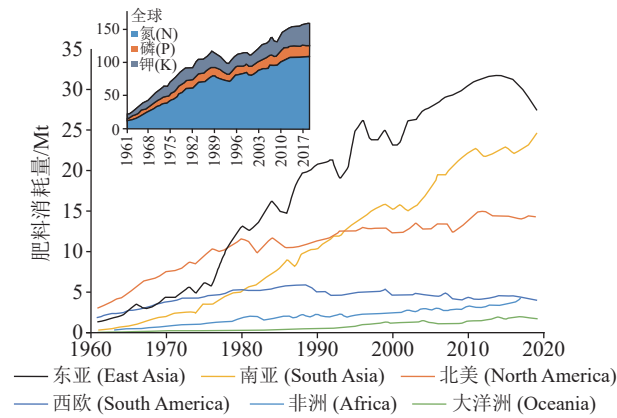


图 1 1961—2019 年全球化肥氮、磷、钾使用量 (Bijay and Sapkota, 2023)
Fig.1 The global usage of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers from 1961 to 2019 (Bijay and Sapkota, 2023)

物和矿物质结合起来,既提供养分,又改善土壤质地和土壤生物活性。

早在公元前 2000 年,中国就开始使用含有大量磷酸盐的磷矿石和含有钾盐的石灰石作为肥料来促进作物生长。20 世纪 60 年代后期国内学者开展大量相关研究,矿石作为磷矿物肥料和钾矿物肥料的基本原料,在有色冶金工业和矿物肥料的生产中起着重要的作用,如利用钾长石和磷矿热法或者酸法分解生产磷钾矿物肥料(徐瑞薇, 1965)。80 年代后期,刘振兴(1989)研究土壤矿物层间钾释放的动力学;刘更另等(1989)研究长期施用硫酸盐矿物肥料对土壤性质和水稻生育的影响,发现矿物肥料能活化黏土矿物晶格中所固结的钾素,改善土壤钾素供应状况。90 年代初期,矿物肥料的研究快速发展,某些矿物可直接或间接作为矿物肥料。徐灿校(1991)综述国外吸附性矿物的相关研究,认为吸附性矿物具有离子交换能力、多孔性,可间接作

为土壤改良剂。21 世纪以后,张信宝等(2010)认为喀斯特坡地土壤营养成分含量低,农业生产落后,施用矿质肥料,才能建设高生产力植被群落和提高农田植物产量。Sun et al. (2019) 将钾岩和有机废弃物结合制成的矿物肥料,有利于岩溶地区的植物生长及产量的提高。Chen and Shi (2016) 将多种矿物肥料原料混合,煅烧而成的一种碱性土壤调理剂—多元素矿物调理剂(MMC),吸附土壤重金属。现今,国内的矿物肥料的合成不再局限于常规的矿物(Chao et al., 2022)。以铝土矿渣为原料制备的硅钾复合肥,不仅为土壤补充了 Si、Ca、K、Mg、Fe 等多种营养元素,还可以解决尾矿残渣带来的环境危害。

矿物肥料从天然到人为的合成,从单一种类的施用到按比例复合应用到农业,从宏观的表生矿物再到微观纳米矿物肥料,文明的到来使人类依赖植物获取食物和药品,导致农业生产的集约化,矿物肥料的发展也随着科技的进步而越来越多种多样。

3 矿物肥料的分类

矿物肥料按化学成分可分成, N、P、K 矿物肥料及其他元素矿物肥料,也可以分成碳酸盐肥、硝酸盐肥、磷酸盐肥、钠肥、钾肥、矿物复合肥等。常见的传统矿物肥料有磷矿岩、钾盐等;非传统的农用矿物肥料常用的有石灰石、泥炭、蓝铁矿、沸石、海绿石、钾长岩等。矿物肥按照化学成分分类如表 1。

4 矿物肥料重要性与不足

4.1 氮矿物肥料

氮是植物生长过程中必需的营养元素之一,对

表 1 矿物质肥料按照化学成分分类 (兰成云等, 2016)
Table 1 Classification of mineral fertilizers according to chemical composition and functional use (Lan Chengyun et al., 2016)

序号	种类	分类
1	氮矿物质肥料	钠硝石、钾硝石、铵明矾、卤砂等
2	磷矿物质肥料	磷灰石、磷块岩、泥炭蓝铁矿、胶磷矿、磷铝石等
3	钾矿物质肥料	霞石、钟盐、钟长石、白云母、光卤石、海绿石、钾石膏等
4	钙矿物质肥料	白垩、文石、石膏、硬石膏、方解石、硅灰石等
5	硼、镁矿物质肥料	硼砂、硼镁石、电气石、白云石、菱镁矿、方镁石等
6	硫矿物质肥料	石膏、重晶石、硬石膏、白然硫、天青石等
7	硅矿物质肥料	沸石、长石、蛭石、皂石、石英、地开石、绿泥石、海泡石、凹凸棒石等
8	微肥矿物质肥料	麦饭石、贝壳矿、软锰矿、辉钼矿、闪锌矿、蓝铜矿、孔雀石等
9	岩石质矿物质肥料	蛇纹石、碳酸盐岩等
10	有机质矿物质肥料	泥炭、腐泥

于叶绿素的合成、植物蛋白质和酶的合成以及其他生理过程的促进至关重要(李兴平等, 2016; Poffenbarger et al., 2017)。由表 1 可知, 氮矿物肥料主要的来源是富钾、钠的岩石。

氮矿物肥料, 能够高产、高效利用农业资源(Aluoch et al., 2022)。与未施肥的土壤相比, 施用氮矿物肥料的土壤中腐生菌的比例降低了 40%, 矿物肥料处理中纤维素分解相关腐殖质比例降低可能有助于增加其土壤碳储量(Tao et al., 2021)。撒哈拉沙漠以南非洲的土壤肥力低, 降雨量不足且不稳定、缺乏保持土壤水分的措施、退化和贫瘠的土壤以及低养分投入导致粮食产量非常低, 在该地区使用单一的氮矿物肥料, 或与有机结合使用能显著提高作物产量(Pypers et al., 2012; Ibrahim et al., 2015)。

然而, 氮矿物肥料与氮肥一样, 过度施用会使过剩的氮流失到环境中。例如使用超出作物实际需要的过量氮肥对土壤、水和空气的质量产生了不利影响(陈云等, 2022)。其中包括土壤酸化(郭群, 2019)、氮泄漏到地下水和 N_2O 排放(田政云等, 2022), 这是一种加速全球变暖的强温室气体

(Bonmatí and Flotats, 2003)(图 2)。浸出的氮被输送到水体中, 导致城市地区地下水中氮(N)浓度升高, 海洋富营养化并影响海洋物种。

土壤氮通常会限制农业生态系统的生产力, 促使施肥以提高作物产量。过量施用氮肥可能会通过植物凋落物的微生物腐烂和土壤中有机碳流失, 这些过剩的氮素在土壤中转化为高流动性硝态氮(NO_3^-)。由于通气良好的土壤中快速硝化作用以及硝酸盐与土壤胶体之间的弱相互作用, 过度施用的氮很容易被浸出到根区以下, 进而污染地下水并造成生态系统氮饱和(Leal et al., 2010)。

此外, 持续施用会对环境造成土壤污染, 土壤中添加过量的氮会积累数十年(Worrall et al., 2015)。Sebilo et al. (2013) 研究表明, 法国土壤中施用的无机肥料在 30 年后仍然存在高达 15% 的施用氮肥。长期施用高浓度氮导致土壤酸化, 这在很大程度上影响了磷的化学形态及其在土壤中的吸附(Yan et al., 2016)。

4.2 磷矿物肥料

磷(P)是生物体中含量第六多的元素, 也是植物生长所需的九种常量营养素之一。P 在所有生物

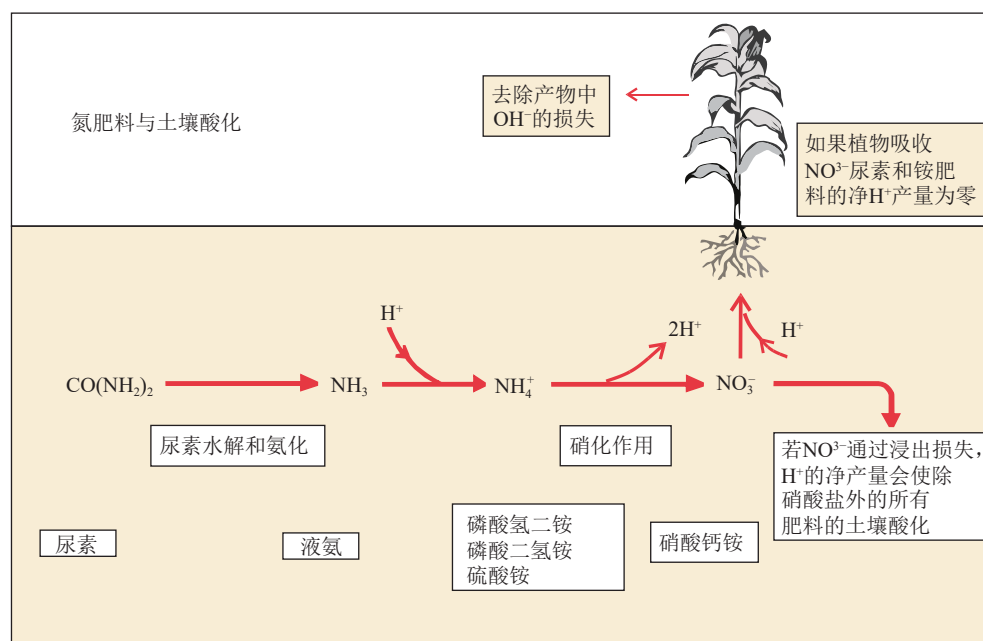


图 2 因作物生产而施用不同氮肥导致土壤酸化的示意图

DAP—磷酸二铵; MAP—磷酸一铵; AS—硫酸铵; CAN—硝酸铵钙

Fig.2 Schematic diagram illustrating soil acidification caused by the application of different nitrogen fertilizers in crop production
DAP—Diammonium phosphate; MAP—Monoammonium phosphate; AS—Ammonium sulfate; CAN—Calcium ammonium nitrate

体的大多数代谢过程中具有直接或间接、但决定性的作用,并且很容易在 DNA/RNA(生物体的复制)、ADP/ATP 能量循环(新陈代谢的能量循环)和细胞膜中发现磷脂 (Jarvie et al., 2019)。磷矿物肥料主要从含氟磷灰石和羟基磷灰石的岩石中生产出来,通过用强酸处理富含磷的岩石,含磷矿物转化为水溶性磷盐,如用硫酸试剂,会产生含有磷酸一钙和石膏大约等量混合物的普通或单一过磷酸肥,用磷酸处理磷矿产生三磷酸过磷酸肥(图 3)。作为一种不可替代、不可再生的资源,磷矿床(尤其是高品位磷矿)在世界范围内的储量有限,主要分布在摩洛哥、中国和阿尔及利亚等国家 (Blackwell et al., 2019)。非洲拥有世界上 80% 的磷矿储量,大约有 45 亿 t 磷酸盐岩矿床,是当地可用于农作物的廉价磷矿物肥料来源(Lompo et al., 2018)。

在作物生产中广泛使用矿物磷肥能提高作物产量。磷通过光合作用捕获光能以及将大气中的二氧化碳转化为糖磷酸盐,这些磷酸盐是组成作物生长所需的有机化合物的基础;磷矿物肥料对植物的养分至关重要,它能改善根系生长、增强植物抗病性、促进种子发芽、增强植物抵抗病害和逆境的能力 (Yanthan et al., 2020)。

磷矿物肥料影响土壤的化学性质、土壤酶、土壤结构,进而改善土壤质量。一方面,磷矿物肥料可以显著增加土壤无机磷和不稳定磷的含量(Fei et al., 2020);另一方面,磷酸盐矿物肥料可以改善生物炭的孔隙结构和表面化学特性,增强其对重金属的吸附亲和力。例如,磷酸盐矿物肥料可以将生物炭对 Cd(II) 的吸附能力提高近 10 倍 (Zhang et al.,

2018)。

磷矿物肥料的过量使用也会带来环境污染问题,如磷污染导致的水体富营养化等。大量使用化肥以促进作物增产,导致大量养分排放到水生生态系统中 (Blum et al., 2013)。磷矿物肥料每年开采约 2000 万 t 磷,其中约 850~950 万 t 流入海洋,据估计,这大约是自然本底流入率的 8 倍 (Rockström et al., 2009)。

磷矿物肥料的长期使用会使土壤中的微生物数量减少,影响土壤的生物多样性(Liu et al., 2022)。农业生态系统中,施肥制度对土壤微生物群落结构具有深远影响,而微生物群落结构反过来又可以为土壤磷的有效性提供反馈。

磷矿物肥料中的磷酸盐大部分在土壤中被吸附,导致土壤酸化、磷肥利用率低,使得植物无法充分利用这些营养物质。磷矿物肥料主要来自氟磷灰石 ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$),氟磷灰石吸附性较强,易吸附释放重金属,成为铀、砷、镉、铬和铅等潜在有毒元素的重要来源 (Pérez-López et al., 2010)。此外,许多含磷的矿物肥料显示出相对较高的硼浓度,并且还向土壤提供硼负荷,这明显超过了植物的吸收,成为一个潜在的环境问题。

4.3 钾矿物肥料

钾矿物肥料主要来源于钾盐矿床以及硅酸盐矿物(Khatrri and Garg, 2022)。常见的两种钾矿物肥料是氯化钾和硫酸钾,前者从世界不同地区蒸发岩留下的岩石沉积物中开采;后者由氯化钾和硫酸反应产生。硅酸盐矿物含有大量 Si、Al、Fe、Ca、Mg 等土壤无机物和 N、P、K 等植物营养元素,能够快

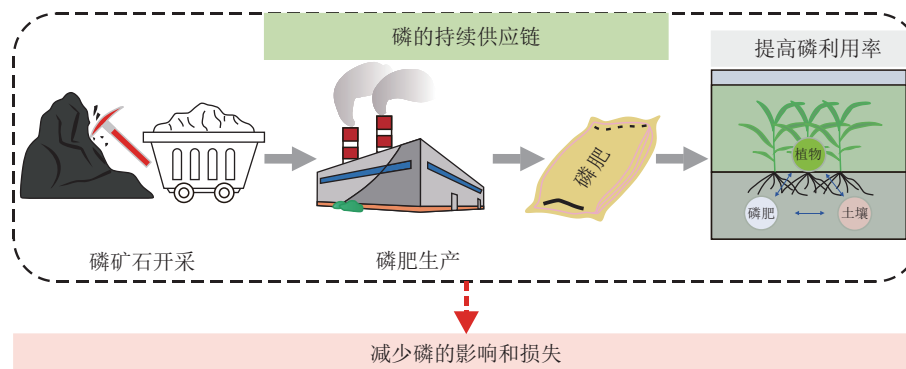


图 3 全磷供应链的持续发展流程图 (Gong et al., 2022)

Fig.3 Sustainable development process diagram of the phosphorus supply chain (Gong et al., 2022)

速提高钾供应能力,其中储量丰富的低品位含钾岩石(钾长石、伊利石等)是获取钾素极好的矿物源。直接施用钾矿物岩石作为天然肥料已逐渐成为农作物、植物补钾的替代方法(刘建明等, 2014; 高游慧等, 2021)。将富钾硅酸盐岩石中的不溶性钾等成分转化成为植物可以吸收的有效营养形态,即将其变成一种含有多种营养元素的矿物质土壤调理剂/新型矿物肥料。

钾矿物肥料不仅具有其他肥料的优点,如改善土壤的阳离子交换量(CEC)、土壤 pH 等,还可以改善深度风化和质地粗糙的土壤。矿物肥料在风化过程中,其富含的碱性矿物经过水解释放大量的氢氧根从而调控土壤的 pH 值,改善土壤的阳离子交换能力,可以实现采矿废料作为钾肥的绿色循环利用,同时提高作物产量和改善土壤质量(Basak et al., 2023)。然而,相比于 N、P 矿物肥料,世界上适合生产钾肥的优质钾矿石较少,因此,钾矿物肥料的可用性是许多国家/地区的主要关注点。在世界大部分地区,尤其是东南亚、非洲和拉丁美洲,商业钾肥的供应完全依赖于国外进口。目前正在开发各种纳米增强材料,但最大量研究的纳米复合材料类型使用层状硅酸盐黏土矿物作为强化阶段,因为它易于获得、成本低,更重要的是环保。

4.4 硅矿物肥料

硅矿物肥料(MSiF)是以矿石为原料制成的硅酸盐肥料,主要成分有 MgO、CaO 和 SiO₂。它具有高表面积,可吸附磷、减少其他营养元素浸出流失的特点,近年来受到广泛关注(Marafon and Endres, 2013; Saihua et al., 2016; Cai et al., 2022)。硅矿物肥料主要来源见表 2。

通过影响土壤中镉和铅等重金属的化学形态抑制其在植物中的积累。以沸石、煤矸石为例,因为沸石的高吸附能力及其对阳离子和阴离子的亲

和力,通过离子交换作用可以从土壤、水和空气选择性吸附某些有害或不需要的元素。沸石矿物是碱土金属的水合铝硅酸盐,结构为三维刚性结晶网络,由四面体铝酸盐(AlO₄)和二氧化硅(SiO₄)形成,其环连接在通道、空腔和孔隙系统中,所有沸石都被认为是分子筛,这种材料选择性地吸附镉和铅等重金属(Reháková et al., 2004)。煤矸石来源于地层,与土壤具有同源性,煤矸石经无害化处理后作为土壤改良剂应用于农业领域,无疑是其有效利用的最佳途径之一。煤矸石化学组成主要包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O,与土壤在元素组成、化学组成和矿物组成方面较为接近,这为煤矸石肥料在土壤利用方面奠定了良好的基础。煤矸石肥料本身的吸附性、黏结性和离子交换性等性质,有利于改良土壤结构,提高土壤肥力,减少重金属危害(Lü et al., 2022; 盛定红等, 2023)。

但是,硅酸盐在土壤中的溶解度较低,易与其他元素发生反应生成难溶性物质,而且植物对硅的吸收能力有限,大部分硅无法被植物充分利用,导致硅矿物肥料的利用效率较低。此外,硅矿物肥料的生产需要大量的能源和资源,施用量较大,容易导致土壤中硅的积累,从而影响土壤的生态环境。

5 矿物肥料应用

5.1 土壤改良修复的应用

在中国,土壤污染主要是无机污染,其中最主要的是重金属污染常见的环境问题(Kumar et al., 2019)。物理化学修复不适用于农田土壤,选择施用矿物肥料进行吸附重金属,可解决土壤中有害重金属的超标问题。矿物肥料主要应用在改善土壤、修复受污染土壤等方面(Jaborova et al., 2021)。其在土壤改良中的作用包括促进植物生长、改善土壤结构、提高土壤肥力以及调节土壤酸碱度等。

5.1.1 土壤改良

沙漠化是危害世界生态环境的重要因素之一。在沙质土壤或者气温高、有机碳含量低或保水能力低的土壤中,施用矿物肥料是改善土壤质量的重要策略之一(Cordeiro et al., 2022)。沙质土壤用于作物生产,需要施用矿物肥料的长期实验来确定合适的肥料用量,可更好地理解营养状况和土壤特性变化所涉及的过程,可持续提高作物产量和保护

表 2 硅的来源及其主要成分

Table 2 Sources and Main Components of Silicon

硅的来源	化学组成	Si的含量/%
硅酸	H ₄ SiO ₄	29
硅酸钙熔渣	—	18~21
硅酸钙	CaSiO ₃	24
硅酸钾	K ₂ SiO ₃	18
硅酸钠	Na ₂ SiO ₃	23
石英砂(细粒)	SiO ₂	46
非晶态硅	ASi	—

健康土壤环境 (Lollato et al., 2019)。

酸性土壤, 定义为 pH 值低于 5.5 的土壤, 是全球农业生产中问题最严重的土壤之一 (Zhao et al., 2014)。中国土壤酸化严重, 主要分布在南亚热带和热带地区, 面积约为 $2.18 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 22.7%。目前, 最有效的方法是通过施用石灰、矿粉等碱性矿物肥料包括碳酸钙(石灰)、碳酸钙/碳酸镁(白云石、石灰)、氧化钙或氢氧化钙等碱性矿物肥料来增加土壤 pH 值 (Hao et al., 2019)。碱性矿物肥料中的 Ca 盐增加了交换络合物中的 Ca 含量, 从而导致更高的碱饱和度。同时, 当 Al^{3+} 被 Ca^{2+} 取代时从交换络合物中释放出来的 Al^{3+} 与 OH^- 发生中和反应, 导致土壤 pH 值升高 (Paradelo et al., 2015)。酸性土壤的 pH 值提高(即 $\text{pH} \approx 6$), 既可降低铝、锰等有害元素的毒性以及具有可变电荷成分的土壤中的正电荷, 也可增加磷的有效性 (Li et al., 2019)。

碱性土壤被定义为 pH 值大于中性的土壤, 通常为 7.5~8.5。其特点是含有过多的钠盐、钙盐和镁盐等碱性离子, 缺乏元素包括铁、锰、锌、铜、硼和钼等微量元素 (Adnan et al., 2017)。这种土壤条件可能会导致土壤结构紧密、通气性差、养分吸收受限等问题。除了沸石这类矿物肥料可以改善碱性土壤的质量, 施用石灰也可改变土壤酸碱度, 钙离子能够与土壤多余的钠离子结合, 从而减少土壤的碱性。但是石灰在碱性土壤中不容易溶解, 表面吸附磷酸钙沉淀, 不利于磷的生物可利用性。

5.1.2 土壤污染修复

在过去的几十年里, 大量的矿山废弃地土壤的修复实践表明, 植被覆盖可以提供一种有效的、经济的、环境可持续的、长期的方法来稳定和复垦废弃的矿区 (Madejón et al., 2022)。因此在受污染的土壤修复中加入矿物肥料, 能够修复改善土壤质量, 进而增加植物的营养。目前矿物肥料, 主要应用在钼(Mo)、镉(Cd)以及放射性元素污染的土壤污染方面。矿物肥料中的一些成分具有吸附、螯合和沉淀的能力, 可以与重金属发生反应, 减少其在土壤中的有效性和生物可利用性。例如, 石灰石中含有碳酸盐, 可以与铅等重金属形成难溶性沉淀物, 减少其毒性和迁移性。磷酸盐、石灰石矿物肥料可有效稳定受污染土壤中的痕量金属 (Siebielec

et al., 2007); 有机化合物如农药、石油产品等也可能污染土壤。一些矿物肥料中含有具有降解和分解有机污染物的微生物。这些微生物可以通过降解有机化合物的作用, 将其分解成较简单、较少有害的物质。矿物肥料中的有机物质能够促进土壤微生物的生长繁殖, 增加土壤有机质含量, 进而提高土壤的抗重金属能力。

需要注意的是, 在应用矿物肥料修复污染土壤时, 应根据具体的土壤污染物性质和污染程度选择合适的矿物肥料和施用方法, 并结合其他修复技术如植物修复和土壤改良等进行综合修复。此外, 使用矿物肥料修复土壤污染需要进行长期监测和评估, 以确保修复效果和环境风险的控制。

土地污染不仅会影响作物产量, 还会被人类摄入到体内, 进而危害人体健康。

5.2 农业产品生产的应用

矿物肥料在农业生产中有着广泛的应用, 主要包括以下几个方面:

提高作物产量。矿物肥料对作物产量提升和品质改良的贡献, 在中国集约化农业体系和传统耕作模式中均具有显著效应, 包括使用矿物和化学肥料, 定期耕作, 使用合成杀虫剂和除草剂, 旨在增加土壤营养和抑制有害物种以提高作物产量。矿物肥料的使用可以促进土地的养分循环和提高土壤肥力, 从而减少土地的耕地面积和化肥使用量, 实现农业可持续发展。

促进植物生长。矿物肥料中含有的氮、磷、钾等元素是植物生长所必需的, 能够促进植物生长、增加叶面积、提高光合效率, 增加谷物中蛋白质、脂肪和淀粉的含量。

改善土壤质量。矿物肥料中含有的矿物质能够改善土壤的物理性质, 增加土壤肥力, 提高土壤的保水保肥能力。例如, 硅钙肥和硅钾肥等硅肥已广泛应用于稻田以改善土壤质量 (Meharg and Meharg, 2015)。研究已发现, 硅酸盐肥料改良显著改变了土壤微生物群落和与水稻土中碳、氮和磷循环相关的功能基因 (Ma and Yamaji 2015)。

6 矿物肥料的展望与挑战

6.1 展望

根据联合国粮农组织统计 2000—2020 年世界

各区域 N、P、K 肥生产量占比(图 4)。自 2008 年以来中国矿肥总产量已经超过国内使用量,但这并不一定表明中国已经实现了化肥供应的自给自足。虽然近几十年来所有养分的农业使用量急剧增加,但氮肥和磷肥在国内生产、进口和出口的结构失衡,已导致资源利用效率下降。农业氮磷肥用量增速开始放缓,国内产量迅速扩大,中国从进口国转变为出口大国。与氮肥和磷肥自给自足相比,钾肥探明储量低、开采能力有限,中国钾肥严重依赖进口(Sun et al., 2009)。国内钾肥生产自 20 世纪 90 年代初开始缓慢起步,2000 年代开始增长,但仍难以满足钾肥需求,消费仍受制约。

矿物肥料与生物、有机肥等不同类型的联合施用逐渐成为研究的热点(Abou-el-Seoud and Abdel-Megeed 2012; Maity et al., 2022)。单一的黏土矿物和磷酸盐矿物,由于其溶解性差,不能在较短的时间内为土壤重建提供必要数量的阳离子和硅,但是在矿物肥料添加有机肥,会显著影响土壤的有机碳、全碳、全氮、铵态氮、硝态氮、土壤 pH 值、磷、钾、硫、钙、镁含量,如粪便类的有机肥与矿物肥料结合后,可以促进有机质不稳定部分的矿化过程,从而促进其分解(Shen et al., 2001)。与单独施用相比,矿物肥料和有机肥料的交互使用可以改良土壤物理特性、刺激土壤生物活性、增加农产品的产量(Siddique, 2019)。近年来,矿物肥料的研究除了集中在与其他肥料结合方面,还集中在作物施用矿物肥料的最佳剂量、最佳比例、施肥后的土壤特性变化以及施肥试验持续时间,探讨新型高效肥料、控释肥料、特殊肥料等的技术创新和发展趋势等研究(Almeida et al., 2018; Dhaliwal et al., 2022; Šimanský et al., 2022)。

6.2 挑战

首先,传统的矿物肥料生产会带来一定的环境

污染问题。例如,矿床勘探开采、矿石加工生产会导致大量氮、磷等养分的流失和排放,直接影响土地、水体等自然资源的质量;煤矸石长期使用会造成重金属积累进而威胁作物生长,经风化和淋溶作用后,易对土壤、水以及大气造成污染(Tian and Niu 2015)。

其次,矿物肥料生产所需的原材料存在缺乏和枯竭的风险。例如,磷矿储备已经逐渐枯竭,储量严重不足,可能带来未来的磷肥料短缺。尽管化肥投入量很高,但目前世界土壤中的磷正在耗尽,非洲(无法负担化肥的高成本)以及南美洲(磷有效利用低)和东欧(由于前两个原因的组合)的磷消耗率最高。在未来世界,假设矿物磷肥绝对短缺,全球农业土壤每年将耗尽 4~19 kg/hm²,由于水的侵蚀造成的平均磷损失占总磷损失的 50% 以上(Alewell et al., 2010)。

最后,矿物肥料原料的有限地质资源及其市场波动引发了广泛的竞争,对粮食安全提出了挑战。到 2050 年,不断增长的世界人口预计将达到 97 亿,这将使目前的粮食需求增加约 70%。因此,要在有限的耕地范围内促进农业生产和实现粮食安全,有效利用肥料变得至关重要。

综合考虑,矿物肥料的展望和挑战并存。在未来,要加强技术创新和环保意识,提高资源利用效率,推广可持续肥料技术和管理模式,以应对存在的挑战,为农业的可持续发展提供更有力的支持。

6.3 建议

土壤测试: 在使用矿质肥料之前,进行土壤测试是至关重要的。通过土壤分析,可以了解土壤中的养分含量和 pH 值等基本信息,从而为施肥提供准确的指导。根据土壤测试结果,可以确定适合的矿质肥料类型和施肥量,以满足作物的具体需求。

营养平衡: 矿质肥料的配合使用应根据作物的

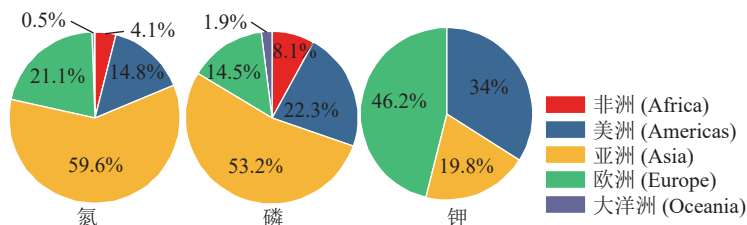


图 4 2000—2020 年世界各区域 N、P、K 肥生产量占比

Fig.4 Proportion of N, P, and K fertilizer production in different regions of the world from 2000 to 2020

营养需求和土壤分析结果进行施肥管理。确保主要营养元素(如氮、磷和钾)以及必要的微量元素均衡供应,促进作物的全面生长和发育。

施肥量和施肥时机: 施肥量和施肥时机的选择应根据作物发育阶段和土壤条件进行合理调整。在农作物的生长周期中,根据不同阶段对养分的需求,合理增减施肥量,避免过度施肥或缺乏养分的情况,增强施肥效果。

施肥技术: 使用适当的施肥技术可以提高矿物质肥料的利用效率,减少养分损失和环境污染的风险。常见的施肥技术包括基于作物根系分布的定向施肥、整地施肥、分层施肥等。

环境保护: 在使用矿质肥料时要注意环境保护。避免过度施肥、避免养分流失进入水体,合理施肥量,减少对环境的负面影响。结合轮作、覆盖物和有机农业等可持续管理措施,实现环境友好的农业生产。

持续创新: 矿质肥料的持续创新研究和技术发展是实现更高效、环境友好的农业生产的关键。投资于矿质肥料效率的研究,开发更加绿色、可控释放和环境友好的肥料产品,推动可持续农业发展。

综上所述,针对矿质肥料的建议包括进行土壤测试、平衡营养需求、合理施肥量和施肥时机、采用适当的施肥技术、注重环境保护和持续创新。通过科学施肥管理和可持续的农业模式,能够最大限度地发挥矿质肥料的作用,提高农作物产量和质量,实现可持续的农业生产。

7 结论

矿物肥料向植物提供肥料有两个重要目的: 植物营养和保持水或土壤通气。施用矿物肥料有助于向土壤提供氮、磷、钾,这是仅次于碳、氢、氧的植物最重要的养分。植物营养中肥料元素(氮、磷、钾)比例充足协同作用,促进植物健康生长发育,最终提高谷物产量。然而,世界各地矿物肥料的过度使用带来的挑战影响了土壤肥力、质量和周围环境。农场、田地和地区往往会造成土壤侵蚀、温室气体浓度增加以及农业系统内生物多样性的丧失。在开放的环境中,这些肥料元素中的部分元素可能与水蒸气和其他气体形成有害的产物。

农业生产的现状和发展情况的分析证实,需要

一套措施来稳定和恢复农业土地,提高农业土地的土壤肥力和改善整体环境状况。对环境的影响在发达国家和发展中国家之间每天都在增加,但是研究人员仍在努力为现代农业提供替代过度使用化肥的方法实现环境可持续性和最佳管理实践。在中国,钾矿物肥料的储量非常有限,而需求远远高于国内产量。因此,有必要对降低矿物肥料利用率、优化施肥结构、改进施肥方式、提高肥料利用率等方面进行综合分析,以便对矿物肥料的实施情况进行全面评估。

References

- Abou-el-Seoud I I, Abdel-Megeed A. 2012. Impact of rock materials and biofertilizations on P and K availability for maize (*Zea Maize*) under calcareous soil conditions[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(1): 55–63.
- Adnan M, Shah Z, Fahad S, Arif M, Alam M, Khan I A, Mian I A, Basir A, Ullah H, Arshad M, Rahman I-U, Saud S, Ihsan M Z, Jamal Y, Amanullah, Hammad H M, Nasim W. 2017. Phosphate-solubilizing bacteria nullify the antagonistic effect of soil calcification on bioavailability of phosphorus in Alkaline soils[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 16131.
- Alewel C, Ringeval B, Ballabio C, Robinson D A, Panagos P, Borrelli P. 2010. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion[J]. *Nature Communications*, 11(1): 4546.
- Almeida E B, Da Silva A d S, Figueiredo J B, Amorim W M de, Pellon L H C. 2018. The new cultural history as a methodology proposed for research in the nursing history field / A nova história cultural como proposta metodológica para pesquisas no campo da história da enfermagem[J]. *Revista de Pesquisa Cuidado é Fundamental Online*, 10(1): 130–136.
- Aluoch S O, Li Z, Li X, Hu C, Mburu D M, Yang J, Xu Q, Yang Y, Su H. 2022 Effect of mineral N fertilizer and organic input on maize yield and soil water content for assessing optimal N and irrigation rates in Central Kenya[J]. *Field Crops Research*, 277: 108420.
- Basak B B, Sarkar B, Maity A, Chari M S, Banerjee A, Biswas D R. 2023. Low-grade silicate minerals as value-added natural potash fertilizer in deeply weathered tropical soil[J]. *Geoderma*, 433: 116433.
- Blackwell M, Darch T, Haslam R. 2019. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(4): 332.
- Bijay S, Sapkota T B. 2023. The Effects of Adequate and Excessive Application Of Mineral Fertilizers on The Soil[M]. Goss M J; Oliver M(eds.). *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Second Edition). Oxford: Academic Press, 369–381.
- Blum J, Melfi A J, Montes C R, Gomes T M. 2013. Nitrogen and

- phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluent[J]. *Agricultural Water Management*, 117: 115–122.
- Bonmati A, Flotats X. 2003. Air stripping of ammonia from pig slurry: Characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion[J]. *Waste Management*, 23(3): 261–272.
- Cai S, Liu B, Li J, Zhang Y, Zeng Y, Wang Y, Liu T. 2022. Biochemical analysis and toxicity assessment of utilization of argon oxygen decarbonization slag as a mineral fertilizer for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb) planting[J]. *Sustainability*, 14(15): 9286.
- Chao X, Zhang T, Lyu G, Chen Y, Zhao Q, Yang X, Cheng F. 2022. Research on the mechanism of sodium separation in bauxite residue synergy preparation of potassium-containing compound fertilizer raw materials by the hydrothermal method[J]. *Journal of Environmental Management*, 317: 115359.
- Chen G, Shi L. 2016. A multi-element mineral conditioner: A supplement of essential cations for red soil and crops growth[J]. *Clean Soil Air Water*, 44(12): 1690–1699.
- Chen Yun, Jiang Dengdeng, Yang Kunhua, Zhu Xin, Kong Lingya, Li Xuwei, Deng Shaopo. 2022. Pollution characteristics and environmental risks of ammonia nitrogen in retired nitrogen fertilizer plant sites[J]. *China Environmental Science*, 42(7): 3265–3275 (in Chinese with English abstract).
- Cordeiro C F d S, Rodrigues D R, Echer F R. 2022. Cover crops and controlled-release urea decrease need for mineral nitrogen fertilizer for cotton in sandy soil[J]. *Field Crops Research*, 276: 108387.
- Cordell D, Drangert J-O, White S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change*, 19(2): 292–305.
- Costantini E A C, Mocali S. 2022. Soil health, soil genetic horizons and biodiversity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(1): 24–34.
- Dhaliwal S S, Sharma V, Shukla A K, Singh J, Verma V, Kaur M, Singh P, Rehal J. 2022. Assessment of optimum mineral zinc fertilizer rate for quantitative and qualitative production of sugarcane in north-western India[J]. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 2: 100021.
- Fei C, Zhang S, Wei W, Liang B, Li J, Ding X. 2020. Straw and optimized nitrogen fertilizer decreases phosphorus leaching risks in a long-term greenhouse soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 20(3): 1199–1207.
- Ferreira G W, Lourenzi C R, Comin J J, Loss A, Girotto E, Ludwig M P, Freiberg J A, Oliveira Camera D de, Marchezan C, Palermo N M, Scopel G, Thoma A L S, Charopem A B, Moura-Bueno J M, Drescher G L, Brunetto G. 2023. Effect of organic and mineral fertilizers applications in pasture and no-tillage system on crop yield, fractions and contaminant potential of Cu and Zn[J]. *Soil and Tillage Research*, 225: 105523.
- Gao Youhui, Jiang Chunyan, Hu Yuegao, Wang Xiaofen. 2021. Effects of different fertilizer treatments on nutrient absorption and distribution in organic *Astragalus*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 29(3): 453–464 (in Chinese with English abstract).
- Gong H, Meng F, Wang G, Hartmann T E, Feng G, Wu J, Jiao X, Zhang F. 2022. Toward the sustainable use of mineral phosphorus fertilizers for crop production in China: From primary resource demand to final agricultural use[J]. *The Science of the total environment*, 804: 150183.
- Guo Qun. 2019. Soil acidification induced by nitrogen addition and its responses to water addition in Inner Mongolia Temperate Steppe, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(10): 3285–3291 (in Chinese with English abstract).
- Hao T, Zhu Q, Zeng M, Shen J, Shi X, Liu X, Zhang F, Vries W de. 2019. Quantification of the contribution of nitrogen fertilization and crop harvesting to soil acidification in a wheat-maize double cropping system[J]. *Plant and Soil*, 434(1): 167–184.
- Ibrahim A, Abaidoo R C, Fatondji D, Opoku A. 2015. Hill placement of manure and fertilizer micro-dosing improves yield and water use efficiency in the Sahelian low input millet-based cropping system[J]. *Field Crops Research*, 180: 29–36.
- Jabborova D, Sulaymanov K, Sayyed R Z, Alotaibi S H, Enakiev Y, Azimov A, Jabbarov Z, Ansari M J, Fahad S, Danish S, Datta R. 2021. Mineral fertilizers improves the quality of turmeric and soil[J]. *Sustainability*, 13(16): 9437.
- Jarvie H P, Sharpley A N, Flaten D, Kleinman P J A. 2019. Phosphorus mirabilis: Illuminating the past and future of phosphorus stewardship[J]. *Journal of Environmental Quality*, 48(5): 1127–1132.
- Khatri I, Garg A. 2022. Potash recovery from synthetic potassium rich wastewater and biometanated distillery effluent using tartaric acid as a recyclable precipitant[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 28: 102841.
- Kumar S, Prasad S, Yadav K K, Shrivastava M, Gupta N, Nagar S, Bach Q-V, Kamyab H, Khan S A, Yadav S, Malav L C. 2019. Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches—A review[J]. *Environmental Research*, 179: 108792.
- Lan Chengyun, Shu Rui, Yao Tiantian, Li Xiaolong, Yue Linxu, Cang Chuanjiang, Guan Xiaohong, Wang Laiwen, Liu Shaojun, Shen Guoming. 2016. The application status of mineral fertilizer in China agricultural production[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(35): 143–146 (in Chinese with English abstract).
- Leal R M P, Firme L P, Herpin U, Da Fonseca A F, Montes C R, dos Santos Dias, Carlos Tadeu, Melfi A J. 2010. Carbon and nitrogen cycling in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with wastewater[J]. *Agricultural Water Management*, 97(2): 271–276.
- Li Q, Li S, Xiao Y, Zhao B, Wang C, Li B, Gao X, Li Y, Bai G, Wang Y, Yuan D. 2019. Soil acidification and its influencing factors in

- the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. *Catena*, 175: 278–285.
- Liu H, Hao Z, Yuan Y, Li C, Zhang J. 2022. Application of mineral phosphorus fertilizer influences rhizosphere chemical and biological characteristics[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(5): 771–784.
- Li Xingping, Hu Zhaoping, Liu Yang, Yang Lei. 2016. Research review on mineral soil conditioner[J]. *Shandong Chemical Industry*, 45(24): 48–50 (in Chinese with English abstract).
- Liu Gengling, Li Xuhua, Qin Daozhu. 1989. The effects of long-term application of sulfate fertilizers on soil properties and rice growth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, (3): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Han Cheng, Liu Shanke. 2014. Potassium, silicon and calcium multi-element microporous mineral fertilizer—integrated mineral technology for soil and fertilizer[J]. *China Agricultural and Trade*, (23): 23(in Chinese with English abstract).
- Liu S H, Ji X H, Xie Y H, Jiang J, Bocharnikova E, Matichenkov V. 2016 Prospective for remediation and purification of wastes from Xikuangshan mine by using Si-based substances[J]. *Journal of Environmental Management*, 172: 77–81.
- Liu Zhenxing. 1989. Study of the interlayer potassium release of soil minerals through kinetic methods[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, (1): 78–85 (in Chinese with English abstract).
- Lollato R P, Figueiredo B M, Dhillon J S, Arnall D B, Raun W R. 2019. Wheat grain yield and grain-nitrogen relationships as affected by N, P, and K fertilization: A synthesis of long-term experiments [J]. *Field Crops Research*, 236: 42–57.
- Lompo F, Bationo A, Sedogo M P, Bado V B, Hien V, Ouattara B. 2018. Role of local agro-minerals in mineral fertilizer recommendations for crops: Examples of some West Africa phosphate rocks[M]. Cham: Springer International Publishing, 157–180.
- Lü B, Zhao Z, Deng X, Fang C, Dong B, Zhang B. 2022. Sustainable and clean utilization of coal gangue: Activation and preparation of silicon fertilizer[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(4): 1579–1590.
- Ma J F, Yamaji N. 2015. A cooperative system of silicon transport in plants[J]. *Trends in Plant Science*, 20(7): 435–442.
- Madejón P, Domínguez M T, Girón I, Burgos P, López-Fernández M T, Porras Ó G, Madejón E. 2022 Assessment of the phytoremediation effectiveness in the restoration of uranium mine tailings[J]. *Ecological Engineering*, 180: 106669.
- Maity A, Marathe R A, Sarkar A, Basak B B. 2022. Phosphorus and potassium supplementing bio-mineral fertilizer augments soil fertility and improves fruit yield and quality of pomegranate[J]. *Scientia Horticulturae*, 303: 111234.
- Marafon A C, Endres L. 2013 Silicon: Fertilization and nutrition in higher plants[J]. *Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 56(4): 380–388.
- Meharg C, Meharg A A. 2015. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice?[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 120: 8–17.
- Paradelo R, Virto I, Chenu C. 2015. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202: 98–107.
- Pérez-López R, Nieto J M, López-Coto I, Aguado J L, Bolívar J P, Santisteban M. 2010. Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): From phosphate rock ore to the environment[J]. *Applied Geochemistry*, 25(5): 705–715.
- Poffenbarger H J, Barker D W, Helmers M J, Miguez F E, Olk D C, Sawyer J E, Six J, Castellano M J. 2017. Maximum soil organic carbon storage in Midwest U. S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized[J]. *PLoS One*, 12(3): e0172293.
- Pypers P, Bimponda W, Lodi-Lama J P, Lele B, Mulumba R, Kachaka C, Boeckx P, Merckx R, Vanlauwe B. 2012. Combining mineral fertilizer and green manure for increased, profitable cassava production[J]. *Agronomy Journal*, 104(1): 178–187.
- Reháková M, Čúvanová S, Dzivák M, Rimár J, Gaval'ová Z. 2004. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(6): 397–404.
- Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, Wit C A de, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. 2009. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 461(7263): 472–475.
- Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, Pinay G, Mariotti A. 2013. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(45): 18185–18189.
- Sheng Dinghong, Zhang Jingning, Li Xiaojun, Du Xin, Xie Chengwei. 2023. Study on preparation and application of coal gangue fertilizer[J]. *Applied Chemical Industry*, 52(3): 960–963 (in Chinese with English abstract).
- Shen H, Xu Z H, Yan X L. 2001. Effect of fertilization on oxidizable carbon, microbial biomass carbon, and mineralizable carbon under different agroecosystems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(9/10): 1575–1588.
- Shuliko N N, Khamova O F, Timokhin A Y, Boiko V S, Tukmacheva E V, Krempa A. 2022. Influence of long-term intensive use of irrigated meadow-chernozem soil on the biological activity and productivity of the arable layer[J]. *Scientific Reports*, 12(1): 14672.
- Siddique S. 2019. Sodium status of soil, forages, and small ruminants of Punjab, Pakistan[J]. *Pure and Applied Biology*, 8(3): 1950–1961.
- Siebielec G, Chaney R L, Kukier U. 2007. Liming to remediate Ni contaminated soils with diverse properties and a wide range of Ni

- concentration[J]. *Plant and Soil*, 299(1): 117–130.
- Šimanský V, Jonczak J, Horváthová J, Igaz D, Aydın E, Kováčik P. 2022. Does long-term application of mineral fertilizers improve physical properties and nutrient regime of sandy soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 215: 105224.
- Sun A W, Zhang W F, Du F, Gao L W, Zhang F S, Chen X P. 2009. China's development strategy on potash resources and fertilizer[J]. *Modern Chemical Industry*, 29(9): 10–16.
- Sun Q, Ruan Y, Chen P, Wang S, Liu X, Lian B. 2019. Effects of mineral-organic fertilizer on the biomass of green Chinese cabbage and potential carbon sequestration ability in karst areas of Southwest China[J]. *Acta Geochimica*, 38(3): 430–439.
- Tao L, Wen X, Li H, Huang C, Jiang Y, Liu D, Sun B. 2021. Influence of manure fertilization on soil phosphorous retention and clay mineral transformation: Evidence from a 16-year long-term fertilization experiment[J]. *Applied Clay Science*, 204: 106021.
- Tian D, Niu S. 2015. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 10(2): 24019.
- Tian Zhengyun, Wu Xiongwei, Wu Yuanyuan, Wei Jianan, Bai He, Gu Jiangxin. 2022. Nitric oxide emissions from Chinese upland cropping systems and mitigation strategies: A meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 43(11): 5131–5139 (in Chinese with English abstract).
- Worrall F, Howden N J K, Burt T P. 2015. Evidence for nitrogen accumulation: the total nitrogen budget of the terrestrial biosphere of a lowland agricultural catchment[J]. *Biogeochemistry*, 123(3): 411–428.
- Xu Canxiao. 1991. Agricultural utilization of adsorptive minerals abroad[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (1): 28–31 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jingyong. 1983. Take the path of combining organic agriculture with inorganic agriculture[J]. *Seeker*, (4): 61–63(in Chinese with English abstract).
- Xu Ruiwei. 1965. Ammoniation treatment of mineral coal and fertilizer efficiency of ammoniated coal[J]. *Acta Pedologica Sinica*, (2): 194–207 (in Chinese with English abstract).
- Yan Z, Chen S, Li J, Alva A, Chen Q. 2016. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. *Journal of Environmental Management*, 181: 26–35.
- Yanthan L, Singh A K, Singh V B. 2020. Effect of INM on yield, quality and uptake of N, P and K by ginger[J]. *Agropedology*, 20(1): 74–79.
- Zhai Yonggong. 1996. Non-metallic mineral resources and modern agricultural production[J]. *World Agriculture*, (8): 31–33 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S, Zhang H, Cai J, Zhang X, Zhang J, Shao J. 2018. Evaluation and prediction of cadmium removal from aqueous solution by phosphate-modified activated bamboo biochar[J]. *Energy & Fuels*, 32(4): 4469–4477.
- Zhang Xinbao, Wang Shijie, Cao Jianhua, Wang Kelin, Meng Tianyou, Bai Xiaoyong. 2010. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 29(3): 274–279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. 2014. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils[J]. *Soil Science*, 179(10/11): 503–513.

附中文参考文献

- 陈云, 姜登登, 阳昆桦, 祝欣, 孔令雅, 李旭伟, 邓绍坡. 2022. 氮肥企业退役地块氨氮污染及其风险研究[J]. *中国环境科学*, 42(7): 3265–3275.
- 高游慧, 江春艳, 胡跃高, 王小芬. 2021. 不同肥料处理对有机黄芩养分吸收与分配的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 29(3): 453–464.
- 郭群. 2019. 氮添加对内蒙古温带典型草原土壤的酸化效应及水分的影响[J]. *应用生态学报*, 30(10): 3285–3291.
- 兰成云, 舒锐, 姚甜甜, 李晓龙, 岳林旭, 臧传江, 关小红, 王来文, 刘少军, 申国明. 2016. 矿物肥料在我国农业生产上的应用现状[J]. *安徽农业科学*, 44(35): 143–146.
- 李兴平, 胡兆平, 刘阳, 杨蕾. 2016. 矿物型土壤调理剂研究综述[J]. *山东化工*, 45(24): 48–50.
- 刘更另, 李绪花, 秦道珠. 1989. 长期施用硫酸盐肥料对土壤性质和水稻生长的影响[J]. *中国农业科学*, (3): 50–57.
- 刘建明, 韩成, 刘善科. 2014. 钾硅钙多元素微孔矿物肥——土壤-肥料一体化矿物技术[J]. *中国农资*, (23): 23.
- 刘振兴. 1989. 用动力学方法研究土壤矿物层间钾的释放[J]. *福建省农科院学报*, (1): 78–85.
- 盛定红, 张景宁, 李小军, 杜鑫, 谢承卫. 2023. 煤矸石肥料的制备及应用研究[J]. *应用化工*, 52(3): 960–963.
- 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新. 2022. 中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析[J]. *环境科学*, 43(11): 5131–5139.
- 徐灿校. 1991. 国外吸附性矿物的农肥应用[J]. *矿产综合利用*, (1): 28–31.
- 翟永功. 1996. 非金属矿产资源与现代化农业生产[J]. *世界农业*, (8): 31–33.
- 许经勇. 1983. 走有机农业与无机农业相结合的道路[J]. *求索*, (4): 61–63.
- 徐瑞薇. 1965. 矿物煤的氨化处理和氨化煤的肥效[J]. *土壤学报*, (2): 194–207.
- 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓永. 2010. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. *中国岩溶*, 29(3): 274–279.