

# 钾素循环及其农业利用

陈焯<sup>1</sup>, 连宾<sup>2</sup>

(1 贵州大学化学与化工学院, 贵州贵阳 550003 2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002)

**摘要** 钾素是农作物生长的三大要素之一, 钾素缺乏严重影响我国农业生产的发展。贵州喀斯特地区拥有储量丰富的钾矿资源, 但至今没有得到有效利用。针对贵州农业生产中钾肥资源短缺的问题, 通过对钾元素地球化学循环、土壤矿物钾的存在状态及其释放特点、贵州农业生产中钾素收支状况等方面的分析, 提出开发贵州钾矿资源的紧迫性和必要性, 通过对比分析含钾矿物的三种利用途径, 强调生物法在矿物钾开发中的潜力和应用前景。

**关键词** 喀斯特地区; 地球化学循环; 矿物钾; 模式

**中图分类号** S158.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)25-12087-04

Potassium Recycle and Its Utilization in Agriculture

CHEN Ye et al. (School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003)

**Abstract** Potassium is one of the three essential factors in crop growing and lack of potassium would have a strong impact on the growth of agriculture production. The abundant potassium ore resource in karst region in Guizhou has not been efficiently utilized yet. Aiming at the scarcity of potassium fertilizer in agriculture production in Guizhou, the independency and necessity of developing the potassium ore resource in Guizhou were pointed out by analyzing geochemical recycling, existing state, releasing feature of mineral potassium in soil and coming and going position of potassium in agriculture production in Guizhou. Based on it, the development potential and application foreground of biological technique in mineral potassium production were emphasized by comparative analysis of three utilization paths of potassium containing mineral in karst region in Guizhou.

**Key words** Karst region; Geochemical recycling; Mineral potassium; Mode

土壤养分是土壤资源的重要组成部分, 土壤钾素是植物必需的营养元素之一。植物能利用的主要是土壤中的速效性钾, 而存在于矿物晶体结构中的固定态钾并不能被植物利用, 只有当矿物钾经过长期的物理、化学及生物风化作用转变为速效性钾后, 才能为植物所利用。我国是一个钾盐资源极为缺乏的国家, 普遍缺钾的土壤和钾肥的供应不足, 已经严重制约了我国农业生产的发展, 全国约 1/4 ~ 1/3 的耕地土壤缺钾或严重缺钾, 南方地区尤其严重<sup>[1]</sup>。贵州省喀斯特岩溶面积分布很广, 占全省总面积的 73.55%, 属生态环境脆弱的喀斯特岩溶山区<sup>[1]</sup>。喀斯特地区由于强烈的化学溶蚀和淋滤作用, 造成土层系统的特殊物理构造, 导致土层与基岩之间的附着力小、土层上部质地松散、下部质地较粘, 极易造成水土流失、土壤有机质氧化分解和钾等矿物元素的大量流失。贵州富钾岩石资源丰富, 储量巨大, 分布广, 总储量约 20 亿, 有巨大的应用开发价值<sup>[2]</sup>。随着生物技术的发展, 生物法在矿物开采和加工中取得了长足进展。笔者针对贵州丰富的钾矿资源, 通过分析钾元素循环的基本特征, 贵州农业生产中的钾素收支状况, 提出开发贵州钾矿资源的紧迫性和必要性, 强调生物法在矿物钾开发中的潜力和应用前景。

## 1 钾素在农田生态系统中的循环

在自然界生态系统中, 物质循环和能量流动是同时进行的, 这种物质和能量的循环流动是生态系统中最根本的运动<sup>[3]</sup>。各种化学元素包括生命有机体所必需的营养物质, 在不同层次、不同大小的生态系统内乃至生物圈里, 在气象、地质和生物作用力的推动下, 沿着特定的途径从环境到生物体, 从生物体再到环境, 不断地进行着流动和循环。钾循环是通过沉积循环的途径进行, 土壤生态系统既是钾的储存

库, 又是植物所需钾素的主要来源。由于大量的土壤钾处在一个稳定的储存库即土壤含钾矿物中, 钾移动性小, 循环缓慢, 容易受到局部干扰, 趋向于不完全循环<sup>[3]</sup>。

**1.1 土壤中钾素的存在状态及其地球化学循环** 由于母质、气候等成土条件的影响, 我国土壤钾素含量大体上呈南低北高、东低西高的趋势<sup>[2]</sup>。土壤钾元素根据化学形态分为水溶性钾、交换性钾、非交换性钾和结构钾; 根据对植物的有效性分为速效钾 (水溶性钾 + 交换性钾)、缓效钾 (非交换性钾) 和矿物钾 (结构钾)。贵州土壤全钾含量在 1.43% 左右。速效钾占全钾的 1.00% 左右, 能很快被农作物吸收利用, 是当季农作物吸钾的主要来源, 缓效钾占全钾的 1.00% ~ 5.00%, 是土壤速效钾的储备库<sup>[4]</sup>。矿物钾占全钾的 95.00% ~ 98.00%, 对农作物的有效性很小。土壤钾素的各形态之间存在着动态平衡 (图 1)。

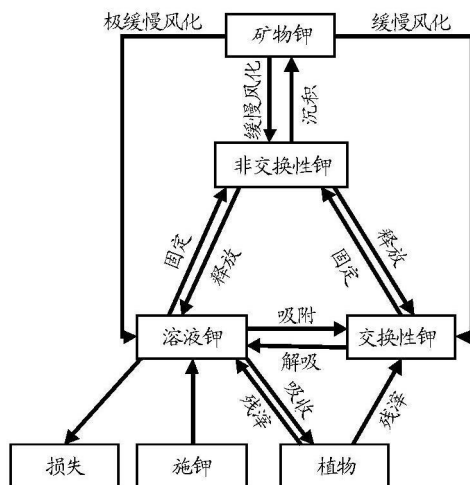


图 1 土壤中不同形态钾素之间的动态平衡

Fig 1 Dynamic balance of potassium between different forms of soil

基金项目 国家高技术研究发展项目 863 课题 (项目编号 2008AA06Z108)  
作者简介 陈焯 (1975—), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 副教授, 从事土壤及环境微生物方面的研究, E-mail: cychen@guizhu.edu.cn  
收稿日期 2009-05-04

在上述体系中,水溶性钾和交换性钾之间的转化较快,它们与缓效钾之间的转化较慢,而矿物钾只有通过极其缓慢的风化作用才能转化为植物能吸收利用的有效性钾。显然,体系中任何一种形态钾元素的变化都会引起整个体系的变化。在土壤有钾素收入、支出或温度、水分等发生变化时,土壤中的钾素平衡将会被打破。当体系中的钾含量升高时,土壤中的钾会发生固定和沉积。反之钾含量减少时,土壤中的钾素释放。

土壤中的钾元素循环主要受光、温、水、热、植被等自然因素和人类活动的影响<sup>[2]</sup>。在岩石圈风化壳中的钾元素与其他一些矿物元素一样,不断地被风化、侵蚀和流失,积聚在江河、海洋之中。同时也有极少量的钾由降雨补充到陆地土壤中,这样构成了在自然地理条件下的地质循环。另一方面,植物从土壤中吸收钾元素将其富集储存,又通过残体和凋落物归还土壤,从而构成了钾元素的生物循环。然而农业生产中农作物成为人畜的食物以及生活所需的各种原料与燃料,耕地上钾素随农作物收获而被带走,但有部分又通过施肥和秸秆等废弃物归还到土壤中,从而构成农业钾的循环。

**1.2 钾元素循环在农业生产中的意义** 随着农业生产的发展,为建立稳定的农田生态系统,人们逐渐认识到必须综合考虑作物、土壤、空气和降雨之间的相互作用,同时对动物排泄物和作物残留物带入农田的再循环养分给予足够的关注,开始定量地研究农田生态系统的结构和功能<sup>[5]</sup>。1955年Allison将系统和整体论的观点引入到生态系统物质循环的研究中<sup>[6]</sup>,此后,农田生态系统养分循环成为世界各国生态学家、土壤学家、营养学家和农学家等所关注的研究热点。众所周知,农田生态系统中的养分循环过程受人类活动的影响很大,不合理的人类活动可能对农田生态系统带来巨大破坏作用<sup>[7]</sup>。农业的可持续发展不能只依靠化肥和能源的投入,还必须研究农田生态系统内部养分循环规律和平衡特性<sup>[8]</sup>。只有通过养分循环研究,才能使有限的养分得到最大限度的利用;只有了解养分的平衡状况,才能对土壤养分水平的发展趋向进行预测,并采取合理的调控措施<sup>[9]</sup>。长期以来由于人们忽略了钾肥的使用,施肥不均衡,加之作物产量大幅度提高,土壤缺钾已成为我国农业生产中普遍存在的限制因子。在充分了解生态系统钾循环的基础上,通过某些途径提高土壤的供钾能力,减少土壤对钾的固定,提高植物对钾肥的利用率,这对提高作物产量,降低成本以及保护生态环境将起到重要作用<sup>[10]</sup>。所以研究农田生态系统中的钾元素循环,无论在理论上还是在实践指导中都具有重要意义。

**1.3 农田生态系统中钾元素循环的一般模式** 土壤生态系统的钾素平衡是诸多因素的综合反映,包括土壤母质、风化程度、施肥、作物吸收、秸秆还田、土壤侵蚀和淋溶损失,但对于大多数耕地土壤来说最重要的因素仍然是植物吸收和施肥。农田生态系统中钾元素的循环包括钾的收入、支出和系统内部流动几个基本环节。钾的收入主要来自降雨和施肥等途径。钾的支出主要包括土壤中钾淋失和农产品中钾的输出两部分。系统内部钾的流动是指农田生态系统中各亚系统间和亚系统内部钾的流动。Frissel<sup>[11]</sup>通过对大量实

例综合分析,设计了农田生态系统养分循环(土壤—植物—动物—土壤)的一般模式,此模式亦适用于钾的循环。该模式包括3个主要亚系统:植物养分亚系统(植物库)、家畜养分亚系统(家畜库)和土壤养分亚系统(土壤库)。钾在3个库之间的转移是沿着一定途径进行的。除库与库之间的转移外,还有系统对外的输出及系统内部的转移(图2)。

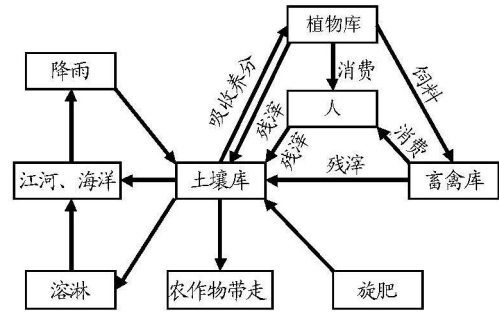


图2 农田生态系统钾素循环的基本模式

Figure 2 Primary utilization mode of potassium cycle in agricultural ecosystem

我国钾肥施用比重过低,且可溶性钾矿资源严重短缺,供需矛盾非常突出。虽然我国可溶性钾矿资源不足,但是我国拥有丰富的不溶性钾矿资源,这是开展研究利用不溶性钾矿资源的重要保障。应该根据不同地区的农田土壤情况、钾矿石储量和矿物生产加工技术等方面进行综合分析,确定较好的资源综合利用模式,以解决我国农田缺钾的问题。

## 2 贵州农业生产中的钾素状况分析

**2.1 影响土壤钾素含量的因素** 贵州各类土壤的钾素含量受到气候与地形条件和土壤的各种物理化学性质影响。贵州高原的南部与东部河谷地带气候湿热,而西部高原山区较为温凉少雨。相应地,地带性土壤的分布在南部与东部河谷区为红壤,中部广大高原区为黄壤,西部高原与山区为黄棕壤分布区<sup>[12]</sup>。这3类土壤分布区因气候、地形情况有别,水热条件的差异,土壤矿物的化学风化与淋溶流失程度各不相同,留存在土壤中的钾素含量也有很大差别。其中,红壤钾素含量最低,黄壤钾素含量中等,黄棕壤钾素含量较高。土壤是侵蚀的对象,各种理化因子都会对侵蚀过程产生影响<sup>[13-14]</sup>。土壤钾素与其在土壤中的溶解态和固定态之间存在动态平衡关系,这种关系既有物理、化学因素在起作用,也有微生物的参与,因而土壤因素与其中的钾素流失存在着极为复杂的作用关系<sup>[14]</sup>。土壤因素(土壤温度、湿度、有机质含量及组成、微生物种群及数量、颗粒组成、通气性等)对钾素流失的影响,主要包括两个方面,一为各土壤因素对钾素转化的影响;二为这些土壤因素对土壤侵蚀的影响。土壤团粒结构及其水稳定性直接影响土壤的抗蚀能力,一般而言,土壤团粒结构愈稳定,在水中抗分散和悬浮的能力就愈强,土壤中的钾素越不容易流失;土壤胶体特别是有机胶体也会直接影响到土壤团粒结构的稳定性。

**2.2 近年贵州土壤钾素含量的变化** 自20世纪80年代初第2次土壤普查开展近30年来,贵州粮食作物总产增长82%以上,经济作物产量更是成倍增长,化肥施用量增长3.6倍,出现了养分供应以化肥为主的局面,且化肥中氮磷钾的施肥比例极不平衡<sup>[4]</sup>。由于近年来复种指数的提高,高产作

物与高产品种植面积的扩大,作物对土壤钾素养分吸收量成倍增加,加上肥料结构中的有机肥比重逐年减少,化肥中的钾肥用量比例小,导致农田土壤中钾素储备日渐减少,耕地土壤全钾与速效钾含量逐年降低,部分地区作物缺钾症状日趋严重。贵州省从1997~2003年施用氮、磷、钾化肥的比例为1.00 0.20~0.28 0.10~0.13(表1)这一比例大大低于正常的氮、磷、钾化肥施肥比例(1.00 0.40 0.42)可以说目前在农业生产上钾素的供应远远满足不了作物的需求。

表1 贵州省农业化肥施用率

Table 1 Application rate of chemical fertilizers for agricultural use in Guizhou Province

年 Year	氮肥//万 t Nitrogen fertilizer	磷肥//万 t Phosphate fertilizer	钾肥//万 t Potash fertilizer
1997	38.23	10.63	4.19
1998	38.81	10.67	4.26
1999	41.18	10.54	4.61
2000	42.24	10.91	4.99
2001	42.11	10.89	5.21
2002	43.56	10.44	5.45
2003	44.69	10.17	5.55

2.3 钾肥使用中存在的问题 在贵州省,尽管缺钾情况没有我国南方其他省份严重,但是,贵州土壤的含钾量极不平衡,有1/3的耕地为缺钾或极度缺钾土壤,在这些土壤中,钾已经成为农业发展最大限制因素,所以必须施用钾肥<sup>[1-2]</sup>。烤烟是贵州的支柱产业之一,仅贵阳卷烟厂每年就要投资1 000万元用以满足烟农对钾肥的需求<sup>[2]</sup>。虽然现阶段贵州境内有20余家钾肥生产厂家,但是总体上来说规模较小,生产能力不足,成本高,主要以复混肥为主,且复混肥的指标也不合理,根本满足不了贵州农业生产对钾肥的需求。这种状况导致长期大量进口钾肥,但大量施用进口的硫酸钾和氯化钾等无机钾肥,不仅在经济上和战略上不可取,而且还会引起土壤的板结和酸化,对农业生态环境造成严重损害。

由于钾素化肥的缺乏,目前钾素肥源的近3/4(73.7%)仍由有机肥料提供。从某种意义上讲,秸秆还田与施用沼气肥就是钾素还田。据调查估算,目前该省每年可利用的作物秸秆达1 000万吨以上,其中约1/3做饲料,1/3做燃料,近20%的秸秆直接或堆腐后还田,还有10%以上的秸秆就地燃烧处理<sup>[2,3,15]</sup>,这种处理方式造成大量的钾素流失。由于在部分山区铲草皮烧火,土灰施于地中,是当地习惯生产方式之一,它虽为作物生长提供了部分养分(特别是钾素)但其中大部分有机物均被烧失,特别是山坡上的草皮被铲掉后,将引起水土流失,给当地生态环境带来更大的危害。

综上所述,当务之急是要寻找一条合理的途径来解决贵州钾肥严重缺乏的问题。随着近年来生物技术在矿物开采和加工中的应用和发展,为贵州储量丰富的含钾矿石资源的综合开发利用提供了新的思路。

### 3 贵州含钾矿物的开发利用

3.1 贵州含钾矿物的储量及其特点 含钾矿物和岩石在地壳中分布广泛,在火成岩、变质岩、沉积岩中都可出现,特别是在火成岩中<sup>[14,16]</sup>。贵州省富钾岩石资源丰富,储量巨大,质量好,而且分布广泛,含钾矿物储量在60亿以上,为

含钾矿物的加工利用创造了良好的物质资源。贵州可利用的难溶性含钾矿种和岩石大约有20多种,包括钾长石、绿豆岩、明矾石、海绿石、霞石、含钾砂页岩、磷钾矿石、白榴石、粗面岩、含钾水云母、粘土岩、云母类矿物、石煤渣、石膏泥等,其中利用较多且含钾量也较高的有钾长石、含钾砂页岩等。目前开采利用的含钾矿物 $K_2O$ 含量多为8%~12%,最高可达14%。

钾长石是 $K_2Al_2Si_2O_8$ 的3个同质多象变体透长石、正长石和微斜长石的总称。其矿物理论含量 $K_2O$ 为16.9%, $Al_2O_3$ 为18.4%, $SiO_2$ 为64.7%。制钾肥用钾长石其 $K_2O$ 边界品位要求大于6.0%,工业品位要求为 $K_2O$ 大于9.0%。现在钾长石主要用途具制造搪瓷、陶瓷及玻璃工业,其次用于钾肥工业。贵州省钾长石资源虽然丰富,但除部分作水泥、玻璃、陶瓷原料外,多数未被利用,仅有极少量曾被用作生产钾钙肥的原料,后因生产成本和产品质量问题而逐渐停止使用。

3.2 贵州省含钾矿物的利用途径 含钾岩石主要用于制取的钾肥有 $KCl$ 、 $K_2SO_4$ 、 $KNO_3$ 、 $K_2CO_3$ 、 $K_3PO_4$ 以及复合肥料如钾氮肥、钾钙肥、硅镁钾肥、高浓度钾肥、窑灰钾肥等。钾长石、含钾岩石都具有高硅中铝、富钾低钙镁的特点,岩石中所含的钾必须通过加工变成水溶性,制成钾肥才能被植物吸收。根据富钾岩石不溶于水且熔点高的特点,利用该类岩石制取钾肥的途径有:①通过加热法、干式烧结法等高温煅烧分解钾长石,使 $K^+$ 与投料中的酸根结合成可溶性钾盐,然后淋溶出来再蒸发成 $KCl$ 。②湿法、酸法、碱法、酸浸、碱浸,使之发生复合分解反应得到可溶性钾盐或钾碱。③生物法得到可溶性钾盐。

3.2.1 直接法。直接法是指不经复杂的加工处理而将含钾矿物直接利用的方法。含钾岩石直接利用通常有2种方法<sup>[16]</sup>。①在土壤中直接用含钾岩石作为含钾肥料。含钾岩石系指以云母类矿物(黑云母、白云母、伊利石等)为主的含钾岩石。对含钾岩石进行农业地质开发和研究,表明不经湿法或热法处理,将含钾岩石经过粉碎后,直接应用于土壤中,将有效地提高土壤供钾潜力,对农业增产、增质和增效意义重大。②用含钾岩石直接制得含钾肥料。该法制得的 $K_2O$ 含量较低,能耗大,污染比较严重。如钾钙肥、钙镁磷钾肥、硅镁钾肥等。钾钙肥的制取方法:把钾长石或含钾岩石、石灰石、煤按一定比例磨成粉,混匀并加水成球,高温煅烧(170~1250℃),然后再研磨成粉即为钾钙肥。在配料中可加石膏,使其中的钾变成水溶性的硫酸钾。若再加入白云石则可制成硅镁钾肥,现加入磷矿石则可制得硅镁磷钾肥,目前比较成熟的方法有立窑法和高炉法。

3.2.2 浸取法。用酸碱或盐类在高温高压(常压)下处理含钾矿物,使矿物中的钾转变为水溶性钾,然后再浸取出制成纯度较高 $KCl$ 、 $K_2SO_4$ 等钾肥,如氯化物(食盐法)、苏打法、碱加压法、酸法等<sup>[17]</sup>。食盐法浸取氯化钾是目前所知钾长石所有加工方法中相对较好、有工业化前途的方法。该方法可分为以灰石作分解剂和不用石灰石作分解剂两类。以灰石作分解剂 $KCl$ 品位太低且含有大量杂质,残渣量大而后者 $KCl$ 纯度高,残渣量小, $KCl$ 成本为400元/t,总的成本非常

高,大大限制了这种方法的应用。

上述方法不是温度过高、能耗大就是工艺路线繁杂,对设备的要求也很高,因而没有工业生产的价值,所以技术难以推广。

**3.2.3 生物法。**微生物可以对钾矿石粉产生风化作用,并在人工给定情况下大大促进矿石粉的崩解破坏速率<sup>[18]</sup>,这一事实促使笔者考虑利用高效优势微生物开发利用低品位含钾岩石,获得植物能吸收的速效钾,增加土壤钾素的含量。

针对贵州喀斯特地区成土母质缺乏、土层薄、土壤贫瘠等特点和贵州蕴藏着丰富的含钾磷矿物这一事实,通过微生物发酵工程技术和其他有效的生物处理技术,转化钾磷矿物,获得可在农业生产中普遍利用的有机生物肥料,使低品位含钾磷矿物得到高质增值利用。这对促进喀斯特地区土壤肥力的增加、加速岩溶山地土壤形成与演化以及有效开发贵州矿产资源具有重要的理论和现实意义<sup>[19]</sup>。

使用硅酸盐细菌即胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) 菌剂,使土壤中含钾岩石中的结构钾转化为植物可吸收利用的有效钾已经有很多报道<sup>[2,20]</sup>。通过研究硅酸盐细菌对钾长石和伊利石的风化作用,发现细菌对不同晶体结构的矿物具“选择性”破坏作用,在有多种矿物同时存在的情况下,细菌对较易分解的矿物破坏作用速度较快<sup>[21-23]</sup>。该硅酸盐细菌能释放钾磷矿物中的钾、磷等矿物元素<sup>[24-25]</sup>,并在繁殖过程中分泌出农作物生长激素,提高植物的抗病能力;可使农作物对磷素、钾素吸收量增加,提高农作物产量<sup>[25-27]</sup>。由微生物活化的含钾岩石制成的微生物肥料是一种新型的有机生物肥料,施入土壤后,通过其特定菌株的快速繁殖,能固定大气中的氮素、释放土壤中固定态的磷、钾元素,使得环境的养分潜力得以充分发挥,并为作物生长营造一个良好的土壤微生物环境,既能避免农作物后期供钾磷不足又能弥补农作物前期供钾磷欠缺。微生物肥料进入土壤后,功能菌株大量繁殖所产生的大量的植物刺激素、纤维素、异生长素、维生素、生长刺激因子、多种酶、赤霉素、胞外多糖、荚膜多糖等等,在植物根际周围形成优势菌群,刺激植物生长,改善植物根际生长环境,抗病原微生物,提高作物抗逆性和抗旱能力,这是微生物肥料壮苗、抗病、增产的基础所在<sup>[22,25-26,28]</sup>。微生物肥料的施用还可以改善土壤微生态环境,提高土壤中有益菌数量,改善农作物品质,进而实现社会效益、经济效益和生态效益的同步提高。该省含钾岩石分布广,储量多,品位高。如果能有效利用生物法将含钾岩石增值利用,将对促进喀斯特山区的农业生产具有不可估量的影响。

#### 4 结语

贵州富钾岩石资源丰富、种类多、分布范围广,是发展钾肥的有利条件,尽管利用含钾岩石目前在经济效益上还不理想,但根据我国具体情况从富钾岩石中采用生物法提取钾肥

是有现实意义和广阔前景的,可本着就地取材,就地施用的原则进行小规模生产,同时从长远考虑也应开展一些基础研究和试验,加强综合利用研究,不断改进生物加工技术,降低成本,使贵州省丰富的富钾岩石资源得以开发利用。

#### 参考文献

- [1] 姚亚非. 贵州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005: 105-107
- [2] 连宾. 硅酸盐细菌的解钾作用研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1998: 35-38
- [3] 李卓棣. 土壤微生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 140-156
- [4] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 878-934
- [5] 陈旭晖. 贵州土壤养分含量的变化与施肥管理[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 121-128
- [6] ALLISON F E. The engine of soil nitrogen balance theory[J]. Adv Agron, 1955, 7: 213-250
- [7] 傅庆林, 俞劲炎, 王兆寿. 易旱农田生态系统养分循环的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(2): 146-149
- [8] 鲁如坤. 持久农业与红壤的开发利用[C]//红壤生态系统研究第二集. 南昌: 江西科学技术出版社, 1994: 8-15
- [9] 张坤民, 朱达, 张世秋. 中国的可持续发展[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 35-40
- [10] 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统养分循环、平衡和调控研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 501-509
- [11] 骆世明, 陈建华, 严彦. 农业生态学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1987: 89-119
- [12] 杨明德. 喀斯特研究[M]. 贵阳: 贵州民族出版社, 2003: 171-173
- [13] KRONBERG B. Weathering dynamics and geosphere mixing with reference to the potassium cycle[J]. Physics of the Earth and Planetary, 1985, 41: 125-132
- [14] LINKENS G E, DRISCOLL C T, BUSO D C. The Biogeochemistry of Potassium at Hubbard Brook[J]. Biogeochemistry, 1994, 25: 61-125
- [15] 上官周平, 李世清. 旱地作物氮素营养生理生态[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 148-150
- [16] 陈静. 含钾岩石资源开发利用及前景预测[J]. 化工矿产地质, 2000, 22(1): 58-64
- [17] Potash and Phosphate Institute Potash and Phosphate Institute of Canada Foundation for agronomic research soil fertility manual[M]. Saskatoon: Saskatchewan State University Press, 2003: 5-13
- [18] LIAN B, WANG B, PAN M, et al. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(1): 87-98
- [19] 连宾, 陈焯, 朱立军, 等. 微生物对碳酸盐岩的风化作用[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 90-99
- [20] 王改兰, 段建南. 土壤矿物钾活化途径[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 802-805
- [21] 连宾, 付平秋, 莫德明, 等. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 179-183
- [22] 连宾. 硅酸盐细菌 GY2对伊利石的释钾作用[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 234-238
- [23] 连宾, 陈焯, 付平秋, 等. 微生物影响硅酸盐矿物风化作用的模拟试验[J]. 高校地质学报, 2005, 11(2): 181-186
- [24] 李凤江, 郝正然, 杨则璞, 等. 硅酸盐细菌 HM8841菌株解钾作用的研究[J]. 微生物学报, 1997, 37(1): 79-81
- [25] 连宾, 臧金平, 袁生. 微生物肥料科学研究中几个热点问题[J]. 南京师范大学报, 自然科学版, 2004, 27(2): 65-69
- [26] 陈焯, 连宾, 刘丛强. 微生物絮凝剂研究和应用进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 83-89
- [27] 连宾, 袁生, 臧金平. 我国微生物肥料发展的现状与建议[J]. 生物加工过程, 2004, 2(1): 4-6
- [28] 刘戈, 易玉林. 微生物肥料的发展现状与前景展望[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(11): 3318-3319