

陈永毕,熊康宁,池永宽.我国南方喀斯特石漠化治理进展[J].江苏农业科学,2019,47(1):17-21.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.01.004

# 我国南方喀斯特石漠化治理进展

陈永毕,熊康宁,池永宽

(贵州师范大学/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵州贵阳 550001)

**摘要:**南方喀斯特是我国典型的生态脆弱区,石漠化问题是该区域突出的环境问题。从喀斯特脆弱生态系统恢复的角度,以地理-生态过程为主线,从石漠化治理的基础理论和应用研究 2 个方面总结喀斯特石漠化治理的研究进展,指出基础理论研究在喀斯特脆弱生态系统结构与过程空间尺度耦合研究中的不足,须要进一步发掘技术集成与模式提炼方面的应用研究,工程实施中存在工程落地难、成果巩固难、产业形成难的问题。最后对未来的石漠化治理研究方向提出建议。

**关键词:**中国南方喀斯特;石漠化治理;生态系统;地理-生态过程;技术集成;模式提炼;未来研究方向

**中图分类号:** X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)01-0017-04

我国南方喀斯特以贵州高原为中心,涉及贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东等 8 省(区、市)的 451 个县,土地总面积为 105.45 万  $\text{km}^2$ ,喀斯特面积为 44.99 万  $\text{km}^2$ ,其中石漠化面积为 12.96 万  $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>,是世界热带、亚热带喀斯特成因最复杂、发育最典型、景观最丰富的片区,也是世界面积最大、分布最集中、规模最连片的喀斯特生态脆弱区。关于喀斯特石漠化治理的科学研究也主要集中在该区域,笔者结合近年来石漠化治理的工作经历,并在查阅大量文献的基础上,主要从石漠化治理的基础理论、治理模式、技术研发领域等方面对国内外学者的成果进行梳理和总结,以期进一步推动我国南方喀斯特石漠化的深入研究。

## 1 石漠化治理进展

石漠化问题是我国南方喀斯特突出的环境问题,在历史的很长一段时期内,喀斯特生态环境的脆弱性没有受到重视。1994 年,中国科学院地学部 and 生物学部以“我国生态脆弱地区持续发展与科技脱贫”为题开展调研咨询活动,由袁道先组织的 6 位院士赴西南岩溶石山地区进行考察,指出南方岩溶地区石漠化迅速扩大的根本原因和对经济发展造成的严重影响,并从治理对策、科技投入和中央财政专项资金方面提出建议<sup>[2]</sup>,“加快推进黔桂滇岩溶石漠化的综合治理”才进入了我国政府“十五”工作报告,石漠化治理工作才得到陆续开展。近年来,在国家科技攻关(科技支撑)项目、扶贫开发项目、世界银行贷款国家造林项目、森林资源发展和保护项目、三江源项目、世界粮食计划署和国际农业发展基金的 3146、3156、5181、2FAD 项目以及长江上游防护林工程、珠江上游防护林工程、长江上游水土保持重点防治区工程、珠江上游水

土保持重点防治区工程、3356 造林工程等项目和工程的支持下,我国南方喀斯特地区开展了石山改造治理、科技扶贫试点工作,并取得了一定成效。特别是“十一五”以来,我国先后在 300 个县启动实施岩溶地区石漠化综合治理试点和重点治理工程,开展以封山育林育草、人工造林和基本农田建设为核心的石漠化治理工程,石漠化治理取得了实质性进展,据 2012 年国务院公布的全国第二次石漠化监测结果显示,与 2005 年相比,石漠化土地面积减少 0.96 万  $\text{km}^2$ ,首次实现石漠化面积由持续增加向净减少的重大转变。石漠化治理相关科技成果也在这一时期得到丰富和发展,主要集中于石漠化治理基础理论、治理模式和技术研发方面。

### 1.1 基础理论

石漠化的理论研究始于 20 世纪 90 年代,在此之前,学者们主要从地貌学、水文学和地质学角度进行喀斯特地貌的二元结构、形态、演化及水文地质过程方面的研究<sup>[3-5]</sup>,自此认识到喀斯特生态系统的特殊性和脆弱性,同时也意识到喀斯特地区的生态环境问题<sup>[6]</sup>,一些学者用“石化”“石山荒漠化”“石质荒漠化”的概念来描述喀斯特地区的土地退化过程。1993 年,袁道先采用石漠化概念来表征植被、土壤覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程,并指出,石漠化是我国南方亚热带喀斯特地区严峻的生态问题,可导致喀斯特风化残积层土的迅速贫瘠化<sup>[7]</sup>。热带和亚热带地区喀斯特生态系统的脆弱性是石漠化的形成基础,包括人口压力、土地利用规划和实践的不合理、大气污染等人类活动触发了这一事件所有过程。之后学者们从石漠化的界定、科学内涵等方面对石漠化的概念进行更进一步的阐述<sup>[8-10]</sup>;熊康宁等特别强调,对于基岩裸露的裸岩山地(石山),要把由于自然形成的裸岩景观如冰川刨蚀裸岩地和由于人为活动如陡坡开垦造成表土冲刷致基岩裸露的石质坡地区区别开来,后者才能称之为石漠化<sup>[11]</sup>。2006 年,《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》定义石漠化是指在热带、亚热带湿润、半湿润气候条件和岩溶极其发育的自然背景下,受人为活动干扰,地表植被遭受破坏,造成土壤侵蚀程度严重,基岩大面积裸露,土地退化的表现形式。

收稿日期:2017-07-26

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502607)。

作者简介:陈永毕(1976—),男,贵州兴义人,博士研究生,副教授,主要从事喀斯特环境演变与生态建设研究。E-mail:13765146394@163.com。

通信作者:熊康宁,硕士,教授,主要从事喀斯特环境保护与石漠化治理研究。E-mail:Xiongkn@163.com。

1.1.1 结构 喀斯特脆弱生态系统的结构研究重点探讨系统的要素组成和空间分布特征。要素可分为自然要素与人文要素,其中自然要素又可细化为地质、地貌、水文、气候、植物、土壤等,人文要素可细化为人口、聚落、政治、经济、文化等,探索石漠化生态系统各要素的组成和空间组合以及构成的景观单元大小、形状、数量和类型,是石漠化生态系统结构研究的主要内容。

在区域尺度的空间格局上,《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》从碳酸盐类型、岩性组合特征以及地貌发育特征角度,将我国南方喀斯特石漠化划分为中高山、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原和溶丘洼地八大类型区,并对各个石漠化类型区内的组成要素和生态环境特征进行定性与定量阐述。李阳兵等采用两级分区方法,根据出露岩性的不同,将岩溶生态系统分为石灰岩出露区岩溶生态系统与白云岩出露区岩溶生态系统 2 种主要类型;并按地貌类型进行第 2 级分区,将岩溶生态系统分为高原面(黔中台地)、斜坡过渡带与深切峡谷区 3 种类型<sup>[12]</sup>。根据第 1、2 级分区从本质上将岩溶山地生态系统划分为 6 种生态类型,6 种岩溶生态系统的地质地貌组合、水文土壤组合、植被和小生境组合结构和运行特点不同,不同组合结构的岩溶生态系统具有特殊的功能。

在景观尺度上,熊康宁等利用“3S”地理信息提取技术和地理信息系统(geographic information system,简称 GIS)分析方法,基于喀斯特石漠化生态系统的基岩裸露率、植被+土被盖度、坡度、土层厚度各要素的组合规律,将喀斯特石漠化强度划分为无明显、潜在、轻度、中度、强度、极强度 6 个等级,对不同等级石漠化生态系统的要素组成和空间组合进行指标量化,并在此基础上对贵州省进行不同等级石漠化的空间分布研究<sup>[11]</sup>,这对在尺度(坡面-小流域-流域-区域-全球)和层次(种群-群落-生态系统-景观-区域-全球)上认识喀斯特石漠化生态系统结构具有重要的现实意义,对喀斯特石漠化生态系统的识别和治理对策制定具有重要指导作用。李森等基于生态基准面理论,将我国南方岩溶区石漠化土地退化程度划分为极重度、重度、中度和轻度 4 级,并以粤北岩溶区为例,根据区域生物、气候、岩溶和石漠化土地特征,制定区域性的石漠化土地分级综合景观指征<sup>[13]</sup>,该研究在石漠化等级判别上有一定参考价值,但从岩溶生态系统景观的完整性角度来看,其分级略显不足。

1.1.2 过程 过程研究主要探讨石漠化生态系统要素或景观单元的动态变化、驱动力及机制。石漠化的概念表征了喀斯特脆弱生态系统的退化过程和结果,从喀斯特原生生态系统退化为石漠化生态系统的过程,即石漠化的成因,已成为石漠化治理基础理论研究的焦点。由于关于石漠化的研究起步较晚,目前缺少由喀斯特原生生态基准面退化到不同等级基准面的过程研究,针对某个特定区的石漠化问题,都是从石漠化的现状入手,通过石漠化生态系统的组成要素来追溯由原生退化到现状的原因。许多学者也采用新的技术方法来研究石漠化的变化过程,如通过洞穴滴水监测和水文水化学过程分析<sup>[14]</sup>、洞穴沉积物石笋测年研究<sup>[15-16]</sup>,利用同位素变化对环境的指示重建环境变化过程,但由于洞穴监测数据积累和石笋定年精度的限制,对环境变化的解译仍然存在多解性和

不确定性<sup>[17]</sup>。目前普遍认为,喀斯特生态系统的退化是自然过程与人文过程共同作用的结果<sup>[11]</sup>,脆弱的生态环境为石漠化过程提供条件,不良的人为活动则加速这一进程。

## 1.2 应用研究

石漠化治理的应用研究是在认识石漠化生态系统结构和过程的基础上进行的。首先要理清系统退化的主导因子,然后通过实施人工调控来进行系统恢复与重建,最后研发石漠化治理的模式与技术体系。

1.2.1 治理模式 近年来,国内一些学者从不同领域开展了喀斯特石漠化治理的理论和应用研究,并取得了一些可喜的研究进展,石漠化治理模式得到繁荣,包括小流域综合治理模式、脆弱生态环境综合治理模式、生态农业建设模式、混农林业模式、开发扶贫与生态建设模式、退耕还林(草)与森林生态建设模式、种草保土与草地畜牧业模式、环境移民与开发式扶贫模式、坡耕地的坡改梯模式、自然保护区与森林公园模式、生态旅游与风景名胜区建设模式等<sup>[18-21]</sup>。治理模式的繁多导致模式应用上的混乱,甚至针对一个特定的石漠化治理区,不知道该选择哪种模式来开展石漠化治理,很多石漠化治理模式仅停留在概念描述上,没有相应的配套技术体系支撑,还有很多是将一个具体的石漠化治理实例称之为石漠化治理模式,针对这些问题,有必要对石漠化治理模式进行进一步讨论。模式的定义最早由著名的建筑学家 Alexander 提出,他指出,模式是在同一时间里发生在世界上的一切事物和如何创建这个事物以及我们何时必须创建它的规则,它既是一个过程,又是一个事物;既是一个活生生事物的描述,又是产生那个事物的过程描述<sup>[22]</sup>。简单地说,模式是在生产实践中,从不断重复出现的事件中发现和抽象出来的规律,是解决问题形成经验的高度归纳总结和提炼,是解决某一类问题的方法论。石漠化治理模式是从石漠化治理实践中总结和提炼出来的普遍性规律,它应具备以下几个基本特性:(1)普遍性。主要包括 2 个方面:一是模式特征的普遍性。石漠化治理模式主要指对石漠化治理过程共性特征因素的总结和提炼,并通过问题-解对的形式进行描述。二是模式应用的普遍性。就是无论你应用模式来解决何种类型的问题,某些事情的做法总是一样的。(2)指导性。石漠化治理模式不是石漠化治理的具体解决方案,而是提供具体解决方案形成的规则和约束。它通过提供具体方案的生成或变换规则,明确方案的范围和方向,指导人们根据自己的特殊要求生成所需要的解决方案。因此它体现的是构造的思想,强调的是方案在构造重用过程中的柔性。(3)重用性。从石漠化治理实践经验中总结抽象出模式,其目的是通过使用模式重用已被实践证实的成功解决问题的经验,以解决在相似情形下出现的石漠化治理新问题。

石漠化治理在揭示喀斯特脆弱生态系统结构与过程耦合机制上的模式探索,经历了从单因素到多因素、从小尺度到大尺度的实践过程。从影响生态系统动态变化的主导因子入手进行生态适应性调控,比如一个坡面尺度的生态退化,通过调查生态环境和影响因子,如果是由人工采樵或过度放牧导致的,则采取封禁封育或人工促进的方法限制人为活动的封山育林模式进行治理;如果是由人工垦殖所致,则采取人工造林或种草的退耕还林还草模式进行治理。如果将尺度转换为小流域,则除考虑坡面尺度的因子外,还须对小流域内的水资源、土

壤、生物群落分布及海拔高度变化等因子进行综合分析,采取山、水、路、林、村综合治理的小流域综合治理模式进行治理。随着研究尺度的扩大,须要考虑的因子增多,生态恢复的机制进一步复杂,但在喀斯脆弱生态系统退化解决方法的选择上,无论在何种空间尺度下,某些事情的做法总是一样的,如封山育林、植树造林、水资源综合开发利用等,只是针对不同的具体问题,这些解决方法在技术上存在差异,而这些技术差异成为了石漠化治理模式提炼的难点。目前提出的很多石漠化治理模式都存在应用尺度上的问题,探索出一个广泛适用的石漠化治理模式是石漠化治理过程研究中富有挑战性的研究课题。

**1.2.2 技术研发** 石漠化治理技术是在石漠化结构与过程研究的基础上建立的程序规则,模式是抽象的,技术是具体的,技术具有可操作性。近年来随着石漠化治理工作的开展,石漠化治理技术也取得了一些新的突破,在喀斯特退化生态系统的单因子调控上,研发了封禁治理、人促封山育林育草、人工造林、土壤改良、坡耕地梯化、坡面集水、引水渠、排水沟、拦水坝、蓄水过滤池建设等技术<sup>[23-28]</sup>。在因子的组合调控上,研发了强度石漠化环境封山育林与人工辅助生态修复技术、中度石漠化环境速生高效林灌草种植与生态演替诱导技术、轻度石漠化环境林草优化配置及草地畜牧养殖配套技术、潜在石漠化环境水土保持与混农林业复合经营技术、喀斯特农村参与式社区发展与新农村建设科技支撑、喀斯特水资源开发利用优化调度与配套节水技术等关键技术。在区域尺度上,以蓄水、治土、造林、种草为中心,将包括生物、工程、耕作、管理与社区发展在内的多种技术措施加以捆绑、组装和科学配置,形成了喀斯特高原山地潜在~轻度石漠化混农林业复合经营、喀斯特高原盆地轻度~中度石漠化生态产业集约经营、喀斯特高原峡谷中度~强度石漠化生态维护循环经营、喀斯特峰丛洼地农业产业结构调整等多目标、多层次、多功能、高效益的综合防治技术集成<sup>[29]</sup>。这些技术的研发在一定区域内取得了石漠化治理成效,同时也可为国家开展石漠化治理专项提供技术基础。

## 2 存在问题

石漠化治理研究的起步较晚,加上石漠化生态系统结构的特殊性、过程的复杂性与分布的区域性,可以直接借鉴的石漠化治理经验不多,许多基础理论与应用研究还存在不足,还有较大的深入研究空间。

### 2.1 基础理论研究中喀斯特脆弱生态系统结构与过程空间尺度耦合研究不足

尺度-结构-过程是地理-生态过程研究的核心,结构影响过程,过程改变结构,尺度不同,结构与过程的关系也将有很大差异<sup>[30]</sup>。在土地利用变化与水土流失方面,可以针对不同的土地利用类型、坡度设计径流观测小区,通过对比观测,在坡面尺度上识别不同坡度下不同农作物和植被类型土地之间的水土流失差异,研究不同坡度下不同土地利用类型的水土保持效应。在小流域观测尺度上,设计流域卡口观测站进行小流域水土流失观测,同时结合“3S”技术和小流域样地调查手段,调查小流域内不同土地利用类型的景观单元构成,推算小流域的水土流失总量,并与流域卡口站观测的水土流失量进行综合分析,建立坡面尺度和小流域尺度的水土流

失系统模型,甚至可以通过尺度推绎与尺度转换的方法将小流域尺度转换到区域尺度<sup>[31]</sup>。傅伯杰对陕西省延安市羊圈小流域(延河流域二级子流域)进行基于生态水文过程的监测和分析,结果发现,在同等降水和坡度条件下,产流、产沙的能力及对应危险性从大到小依次为坡耕地、牧草地、乔木林地、天然草地、灌木林地;坡耕地产流产沙多,其水土保持能力也相应较差,并开展了土地利用类型与环境因子耦合、不同生态系统组合下的水土流失过程研究,建立了土地利用格局与流域生态水文过程模型<sup>[31]</sup>。在喀斯特地区,由于水土流失受喀斯特特殊“二元结构”控制,除地表产生水土流失外,还存在地下水流失过程<sup>[32]</sup>,目前对地下水流失的研究积累较少,地下水流失的贡献率还存在争议,关于不同地质条件、不同土地利用类型在不同空间尺度上的地表地下水流失过程的研究较少;另一方面,目前水土流失过程的研究主要关注自然过程,而对于人口变化、经济发展、文化价值观念改变等人文变化导致的水土流失过程的研究较少。水土流失过程只是喀斯特生态系统变化的一个方面,在生态过程、地貌过程、水文过程等方面存在结构与过程在空间尺度耦合上的研究不足。

### 2.2 应用研究在技术集成与模式提炼上须要进一步发掘

石漠化治理技术是针对不同的系统退化影响因子提出来的,就单一技术而言,许多治理技术在空间尺度上存在因地制宜问题。如针对不同区域、不同树种,人工造林技术在人工整地、造林季节和抚育管理措施上都存在差异,须开展不同尺度的人工造林技术试验,提出适宜的人工造林技术,形成技术体系。在复合技术上,技术与技术之间的耦合机制研究不够深入。如种草养殖技术、林下养殖技术等是种植技术与养殖技术的耦合,除须研发种植和养殖技术体系外,两者耦合下的林草优化配置、草地营养配置、草地生产力及载畜量等都有待继续研究。综合技术集成是石漠化治理技术的升华,通过选择典型喀斯特石漠化类型区,针对石漠化生态系统的主要问题开展综合技术集成研究,对种养技术、区域生态需水量与水资源优化调度技术、农村能源开发技术、社区参与技术等多技术进行综合应用,形成关键技术,集成重大技术,构建区域石漠化治理的技术体系。石漠化治理模式依赖技术而存在,模式与技术体系相对应,由于技术在空间尺度和时间尺度上的集成有待深入实践,因此模式的提炼也有待进一步发掘。

### 2.3 工程实施存在工程落地难、成果巩固难、产业形成难的问题

2008 年,国家启动了西南 8 省(市、区)的 100 个县(市、区)的石漠化专项试点工程,“十二五”期间扩展到 200 个县(市、区),开展重点治理工作,“十三五”重点对以长江经济带、滇桂黔等区域的集中连片特殊困难地区为主体的 200 个石漠化县实施综合治理。由于喀斯特石漠化生态系统的复杂性,加之国家需求的紧迫性,石漠化综合治理专项工程在前期准备工作明显不足的情况下开始实施。譬如,石漠化综合治理工程设计没有设计标准,执行过程参照的是《林业工程施工设计标准》《水利水电工程初步设计标准》,工程的概预算编制参照的是《水土保持工程概预算额》。石漠化退化生态系统领域的研究相对滞后,且缺乏相应的经营管理经验,因此,随着工程的陆续上马和实施,工程技术与管理的完善、不配套、不健全问题日益暴露出来,突出表现在以下几个方面。

2.3.1 工程落地难 通过对不同土地利用方式的石漠化发生率研究发现,旱地的轻中度石漠化发生率较高<sup>[33]</sup>,因此,很多石漠化工程要在农民的耕地上实施,实施过程中,当地农民的态度、响应以及是否配合和石漠化治理是否受益、暂时受益或长远受益的抉择等问题都使得石漠化的治理工作异常复杂。目前的石漠化综合治理作业设计很难协调处理农民的土地使用问题,导致很多工程设计农民不允许在自己的土地上实施,工程实施困难。

2.3.2 成果巩固难 石漠化综合治理工程由省级发改委牵头,县级发改局或林业局组织实施,工程施工实行政府招标,由具有相关资质的公司参与投标,承接相应的石漠化治理工程,工程验收结束后,工程产权自动移交给农户,由农户自行监管,公司不再对所实施的工程进行管理。喀斯特石漠化植被恢复的周期较长,人工造林大多还处于幼林和未成林阶段,尚须进行多年人力、物力和技术的投入以及后期的精细抚育管理,由于农户资金与技术的缺乏使得管理得不到长期保障,如何维持已经栽植的林草正常生长已成为一个突出问题。

2.3.3 形成产业难 石漠化综合治理工程区大多为经济发展水平相对薄弱地区,在创业观念、人口素质等方面都无法支持形成产业,在产业技术上也是自发农合组织发展的瓶颈。农户大部分从事传统农业生产,面对产业结构调整,发展新产业的经验不足。例如,贵州“花江模式”中花椒产业的发展,由于科技的投入,顶坛花椒在北盘江花江段有很好的生长优势和品质,政府的大力投入,使其在面积和产量上已基本形成规模,村组还组织种植农民成立了顶坛花椒种植专业合作社来促进产业发展,但由于农民在发展上的短视,没有品牌保护意识,在产品销售价格上没有形成统一,甚至一些农民以次充好,从外地廉价购买劣质花椒掺杂其中出售,合作社成立的初衷是保护种植户的利益,但最后在利益面前没有人听从合作社的指令,合作社也没有权利去控制农民,最终导致花椒市场交易混乱和价格下跌,损害的还是广大花椒种植户的利益。

### 3 我国南方喀斯特石漠化治理的几点建议

我国南方喀斯特的石漠化问题是该区域突出的环境问题,喀斯特脆弱生态系统的退化是一个复合退化过程,治理也要从系统的角度进行地理-生态过程的理论与应用研究,针对目前基础理论、应用研究与工程实施中存在的问题,笔者结合近年来的参与石漠化治理的实践工作经验,对未来石漠化治理研究方向提出几点建议,以期对未来的石漠化治理研究作出贡献。

3.1 加强喀斯特石漠化生态系统结构和过程在空间尺度上的耦合研究

喀斯特石漠化生态系统的变化伴随着地理-生态过程,结构与过程在不同尺度上的相互作用是地理-生态过程研究核心理念。通过构建石漠化生态系统不同代表性阶段的组成要素和空间分布特征,建立石漠化治理的生态系统参照系,根据不同石漠化治理区域在系统组成要素和空间分布上与系统参照系的差异采取相应恢复措施,观测系统结构变化中要素之间的相互作用过程,明晰石漠化退化系统的恢复机制,构建石漠化治理的系统恢复模型。

3.2 加强石漠化治理技术集成与模式提炼

将石漠化生态系统的自然、生态、经济、社会等多因素纳

入石漠化治理技术研发过程中,并在坡面-小流域-流域-区域-全球的不同尺度上进行自然、社会、经济要素相互作用的石漠化治理技术集成,形成石漠化治理的关键技术,集成重大技术。

3.3 加强技术与模式的工程化应用

石漠化治理理论和应用研究的最终目的是为石漠化治理工程化提供技术支撑,且该研究是知识从理论-实践-理论的升华过程。

### 参考文献:

- [1]袁道先.西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [2]中国科学院地学部.西南岩溶石山地区持续发展与科技脱贫咨询建议[J].地球科学进展,1995,10(2):113-115.
- [3]杨明德.贵州高原喀斯特地貌的结构及演化规律[M].北京:科学出版社,1985.
- [4]熊康宁.新构造运动对贵州锥状喀斯特发育的影响[J].贵州地质,1996,13(2):181-186.
- [5]Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of South China[J]. Zeitschrift fur Geomorphologie,1997,108:81-90.
- [6]杨汉奎.喀斯特荒漠化是一种地质-生态灾难[J].海洋地质与第四纪地质,1995,15(3):137-147.
- [7]袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.
- [8]屠玉麟.贵州土地石漠化现状及成因分析[M]//李簪.石灰岩地区开发与治理.贵阳:贵州人民出版社,1996.58-70.
- [9]王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J].中国岩溶,2002,21(2):101-105.
- [10]李阳兵,王世杰,容丽.关于喀斯特石漠和石漠化概念的讨论[J].中国沙漠,2004,24(6):29-35.
- [11]熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [12]李阳兵.西南岩溶山地生态环境研究进展与若干问题[J].云南地理环境研究,2006,18(2):61-65.
- [13]李森,董玉祥,王金华.土地石漠化概念与分级问题再探讨[J].中国岩溶,2007,26(4):279-284.
- [14]李廷勇,李红春,向晓晶,等.碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )在重庆岩溶地区植被-土壤-基岩-洞穴系统运移特征研究[J].中国科学:地球科学,2012,42(4):526-535.
- [15]张会领,姜光辉,林玉石,等.洞穴石笋形成过程中的溶蚀作用研究[J].地质论评,2012,58(6):1091-1100.
- [16]杨勋林,张平中,袁道先,等.黄龙洞年轻石笋的210Pb测年研究[J].地质论评,2010,56(4):543-548.
- [17]李玲珑,刘再华.洞穴滴水-CaCO<sub>3</sub>体系氧碳同位素组成的气候意义研究现状和问题[J].地球与环境,2015,43(2):223-232.
- [18]熊康宁,朱大运,彭韬,等.喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究[J].生态学报,2016,36(22):7109-7113.
- [19]曹建华,邓艳,杨慧,等.喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J].生态学报,2016,36(22):7103-7108.
- [20]王克林,岳跃民,马祖陆,等.喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究[J].生态学报,2016,36(22):7098-7102.
- [21]蒋勇军,刘秀明,何师意,等.喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J].生态学报,2016,36(22):7092-7097.
- [22]Alexander C. The timeless way of building[M]. New York:Oxford University Press,1979:5-8.

张 洋,李雅颖,郑宁国,等. 生物硝化抑制剂的抑制原理及其研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(1):21-26.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.01.005

# 生物硝化抑制剂的抑制原理及其研究进展

张 洋<sup>1,2,3</sup>, 李雅颖<sup>1,2</sup>, 郑宁国<sup>1,2,3</sup>, 姚槐应<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院城市环境研究所, 福建厦门 361021; 2. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 浙江宁波 315800;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为维持和提高农作物产量,大量氮肥施入农田生态系统中。所施入的氮肥通过硝化过程形成硝态氮,其易淋溶或通过反硝化作用损失,造成大量氮素流失,影响农业生产的可持续性且带来生态环境问题。硝化抑制剂可抑制硝化作用,而植物根系分泌的生物硝化抑制剂以其成本低、环境友好等优点逐渐引起关注。本文综述了国内外植物源硝化抑制剂的研究进展,包括分泌生物硝化抑制剂的植物种类、生物硝化抑制剂的作用机制及影响因素;总结了生物硝化抑制剂对农业的影响及对生态环境的保护作用,并从农业生产和环境保护的角度出发,对今后生物硝化抑制剂的研究方向进行了展望。

**关键词:**生物硝化抑制剂;农业系统;生态环境;氮循环

**中图分类号:** S143.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)01-0021-06

为了满足全球不断增长的粮食需求,人类在农业系统中施入大量氮肥。在促进粮食生产的同时,也造成了严重的环境污染,如水体富营养化、地下水硝酸盐污染、氧化亚氮( $N_2O$ )和一氧化氮( $NO$ )等温室气体的排放<sup>[1]</sup>。在农业生产工业化以前,氮的收支长期处于相对平衡的状态,即固氮作用和脱氮作用基本持平。但自20世纪30年代以来,地球氮循环一直被打乱<sup>[2]</sup>,尤其是1960—2009年间的绿色革命,大量使用工业复合肥料来栽培水稻和玉米,虽然生产了全球近1/4的粮食,但却严重地破坏了生态环境<sup>[3-4]</sup>。全球每年氮肥的消耗量将近 $1.5 \times 10^8$  t,而强硝化作用导致了近70%的氮肥流失<sup>[5]</sup>,每年直接造成的经济损失约8 100万美元(尿素的价格是0.54~0.80美元/kg)<sup>[6]</sup>。预计到2050年全球氮肥的施

用量会翻1倍达到每年 $3.0 \times 10^8$  t<sup>[6]</sup>,每年从农业系统中流失的硝态氮所造成的氮损失将会达到 $6.15 \times 10^7$  t<sup>[7]</sup>,这会增大农业系统中氮肥的流失风险,加剧环境污染问题。

矿化(mineralization)、硝化(nitrification)和反硝化(denitrification)是土壤氮循环的重要过程<sup>[8]</sup>。氮素的矿化作用是土壤有机氮在微生物作用下分解成无机氮的过程;而硝化作用是铵态氮( $NH_4^+ - N$ )在有氧条件下,微生物的作用下经氨氧化和亚硝酸盐氧化2步反应转化为硝酸盐的过程<sup>[9]</sup>;Pjevac等于2015年从硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)中发现并培养了1株完全硝化细菌,这种化能自养型微生物的基因型可以编码氨氧化和亚硝酸盐氧化2个途径中的蛋白,完全硝化菌是氮循环中微生物群落的一个重要成分,它的发现改变了人们对硝化过程的认识<sup>[10]</sup>。反硝化作用也称脱氮作用,是反硝化细菌在无氧条件下,还原硝酸盐,释放出氮气( $N_2$ )或 $N_2O$ 的过程。现代农业所用氮肥以铵态氮肥料(尿素、硫酸铵)为主,铵态氮经过硝化作用形成硝态氮,硝态氮带有负电荷,不能被土壤吸收,具有很高的流动性,在根区容易受淋溶和反硝化作用的影响<sup>[11]</sup>。因此,硝化作用是氮素从土壤生态系统中流失的主要原因,且硝态氮的淋失造成了地下水和地

收稿日期:2017-10-16

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502704)。

作者简介:张 洋(1992—),女,河南开封人,硕士研究生,从事土壤微生物学研究。E-mail:yangzhang@iue.ac.cn。

通信作者:李雅颖,博士,助理研究员,从事植物营养和土壤微生物学研究。Tel:(0574)86085969;E-mail:yyli@iue.ac.cn。

[23] 龙 健,李 娟,江新荣,等. 喀斯特石漠化地区不同恢复和重建措施对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(4):615-619.

[24] 吴孔运,蒋忠诚,罗为群. 喀斯特石漠化地区生态恢复重建技术及其成果的价值评估——以广西平果县果化示范区为例[J]. 地球与环境,2007,35(2):159-165.

[25] 郭 柯,刘长成,董 鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性石漠化治理[J]. 植物生态学报,2011,35(10):991-999.

[26] 郭红艳,万 龙,唐夫凯,等. 岩溶石漠化区植被恢复重建技术探讨[J]. 中国水土保持,2016(3):34-37.

[27] 高渐飞,熊康宁,苏孝良,等. 喀斯特小流域石漠化综合治理技术研究——以贵州省毕节市石桥小流域为例[J]. 水土保持通报,2011,31(2):117-121,127.

[28] 高渐飞,熊康宁,吴克华. 典型喀斯特石漠化小流域小型农田水利配套技术与模式[J]. 中国农村水利水电,2012(8):16-19,23.

[29] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. Earth - Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[30] 傅伯杰,赵文武,陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望[J]. 地理学报,2006,61(11):1123-1131.

[31] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合[J]. 地理学报,2014,69(8):1052-1059.

[32] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境,2007,35(3):202-206.

[33] 李阳兵,白晓永,邱兴春,等. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究[J]. 资源科学,2006,28(2):67-73.