

● “十一五”国家重点图书出版规划项目 ●

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

坡面土壤侵蚀动力过程 与化学调控技术

雷廷武 唐泽军 于 健 潘英华/著



科学出版社

www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目

土壤侵蚀与旱地农业系列专著

坡面土壤侵蚀动力过程 与化学调控技术

雷廷武 唐泽军 著
于 健 潘英华

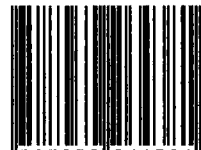
科学出版社

北 京

(S-0544.0101)

- 根系与植物高效用水
- 黄土高原沟蚀演变过程与侵蚀产沙
- 黄土高原土壤水分植被承载力研究
- 黄土高原土壤有机氮及其矿化
- 黄土高原土石混合介质土壤水分研究
- 黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征与数学模型
- 坡面水蚀输沙动力过程试验研究
- 坡面土壤侵蚀动力过程与化学调控技术
- WEPP模型及其在黄土高原的应用评价

ISBN 978-7-03-026438-1



9 787030 264381 >

定价: 80.00 元

内 容 简 介

本书系统总结了作者们多年来在坡面土壤侵蚀动力过程和高分子化学材料在土壤改良中应用研究的结果,重点介绍了聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM) 和磷石膏对土壤结构的改良作用。全书共十章,主要内容有:土壤结皮的定义和形成机制,坡面土壤侵蚀的研究,化学调控技术在改良土壤中的研究进展;PAM 的物理、化学及其他性质;PAM 对土壤入渗与结构的影响;PAM 提高雨水利用效率的研究;PAM 对土壤侵蚀产沙的影响;PAM 和石膏的应用对水分入渗及土壤侵蚀的影响;PAM 在沟灌中的应用;PAM 对土面蒸发的影响;施加 PAM 对土壤水分性状的影响;结论。

本书可供土壤侵蚀、水土保持、化学、农林牧和水利等部门的研究人员及高等院校相关专业师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

坡面土壤侵蚀动力过程与化学调控技术 / 雷廷武等著. —北京: 科学出版社, 2010

(土壤侵蚀与旱地农业系列专著)

ISBN 978-7-03-026438-1

I. 坡… II. 雷… III. 土壤侵蚀—研究 IV. S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 010139 号

责任编辑: 张 震 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

封面照片提供: 田均良

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 19 1/4

印数: 1—1 200

字数: 378 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

总 序

资源合理利用与生态环境保护已成为 21 世纪中国西部开发的战略核心。实施这一战略，对粮食和环境安全有着举足轻重的作用。开展土壤侵蚀和旱地农业研究是实施上述战略的关键。土壤侵蚀与旱地农业是黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的两个基本研究方向。该系列专著针对实验室两个研究方向，以黄土高原土壤侵蚀环境调控和提高旱地农业生产力为基础，从土壤侵蚀过程及其调控、土壤侵蚀模型及预测、水土流失、土壤水分养分循环机制及其调控、土壤侵蚀与旱地农业研究的新方法和新技术等领域出发，系统反映实验室基于大量重要研究项目资助获得的研究成果。

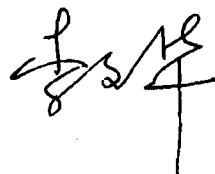
《土壤侵蚀与旱地农业系列专著》具有以下特点：一是长期和集体研究工作的结晶。作者以他们自己的研究工作累积为基础，并综合国内外有关专家、学者的研究成果，较充分反映了我国土壤侵蚀与旱地农业研究取得的成就。二是具有坚实的科学立论基础，作者以严肃、认真的科学态度，从黄土高原实际出发，理论联系实际，观点明确，论据充分，是具有较高权威性的系列专著。三是有很强的应用性，主要基于土壤侵蚀与旱地农业的相关理论，对如何控制水土流失和提升旱地农业生产力提出关键技术措施。

该系列专著各分册相对独立，但又相互补充，体系完整，资料系统，涉及地学和农业科学的诸多领域，是一套在理论上具有一定深度、实践上具有一定广度的丛书。该丛书的出版发行对推动水土保持、优化旱地农业水肥资源管理和提高农业生产力将会产生积极作用。系列专著资料丰富，数据可靠，内容翔实，图文并茂，是理论联系实践的著作。它不仅可以作为地学、生态学、气象学、土壤学、植物营养学、农学等相关专业科技工作者的参考书，而且可作为高等院校相关专业

教学的重要参考书。

我相信这套专著的出版，一定会受到学术界的欢迎，将为推动土壤侵蚀和旱地农业学科建设发挥其应有的作用。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Li Shuhua, a Chinese Academy of Engineering Academician.

2009. 10. 24

前 言

水和土壤是人类赖以生存的物质基础，是人类生存环境最基本的构成要素，因而，水土流失是人类生存和发展的制约因素，是人类面临的最主要环境问题之一。中国是一个干旱、半干旱地区面积较大的国家，水土流失问题尤为严重。造成水土流失（特别是在我国干旱、半干旱地区的黄土高原）的一个重要原因是降雨引起的土壤表面结皮，降低土壤的入渗率，增加土壤表面的径流。高分子化合物聚丙烯酰胺（PAM）作为土壤改良剂是近几十年来国内外有关水土保持化学调控科学研究的前沿领域，对发展旱作农业、提高土地生产力和农业抵御旱灾能力、降低土壤侵蚀等具有重要的理论意义和实用价值。

随着土壤侵蚀的加剧，很多国家都把土壤侵蚀的研究和治理作为基本国策。我国的土壤侵蚀发展形势严峻，并且治理的难度愈来愈大，在这样的前提下，研究减少和防止土壤侵蚀的方法是十分有意义的。本书瞄准土壤侵蚀学科前沿，系统阐述了 PAM 作为土壤结构改良剂在土壤侵蚀方面的影响，从 PAM 的使用方法、效果到机理进行了深入系统的研究，为今后在相关方面进一步深入研究与应用提供基础、经验和借鉴，对我国水土保持具有十分重要的科学意义。

本书是作者们多年研究成果的集成，全书共分十章。第 1 章绪论，详细阐述土壤结皮的形成、坡面土壤侵蚀研究及高分子化合物在土壤侵蚀中的研究进展。第 2 章介绍了 PAM 的物理和化学性质。第 3 章系统、详细地分析了土壤表面的封闭和结皮现象，分析了不同交换性钠百分率（ESP）和不同黏粒含量对土壤封闭和结皮的影响，探讨了 PAM 抑制土壤的物理结皮、磷石膏（PG）对土壤的化学结皮抑制作用的机理。第 4 章至第 9 章分别结合 PAM 的理化性质，采用试验的方法研究了 PAM 对土壤结构、降雨入渗、侵蚀产沙、水分性状及土面蒸发等

方面的影响,深入、系统讨论了不同 PAM 使用方法对增加土壤降水入渗、减少土壤侵蚀的效果。第 10 章总结了本书的主要成果。

作者们的研究工作得到了中国科学院“百人计划”和“引进国外杰出人才”项目“水蚀参数量化研究”(项目编号:982602)、教育部重大项目“细沟土壤侵蚀动力过程模型模拟及其基本参数的系统研究”(重大 01-10)、国家自然科学基金重点项目“黄土高原多尺度小流域土壤水蚀动态过程模拟研究”(项目编号:40635027)、国家农业转化资金项目“利用土壤结构调理剂(PAM)形成高效保水集成技术提高节水农业综合效益”(项目编号:02EFN211500071)和国际科技合作重点项目计划项目“土壤结构调理剂综合技术研究及在内蒙古可持续旱作农业中的应用”(项目编号:2004DFA03700)的资助,并得到了科学出版社的大力支持,在此表示诚挚的谢意。作者先后与以色列农业研究中心土壤、水、环境科学研究所 Shainberg 教授,中国科学院水利部水土保持研究所邵明安研究员、唐克丽研究员等对本书的主要研究内容进行过多次的交流和讨论,受益匪浅,书稿的写作过程中也得到了他们的热情指导和大力支持,在此表示衷心的感谢。参加本书的试验研究工作的还有肖娟博士、詹卫华博士、刘吉根博士、袁普金高级工程师、陆军老师以及中国农业大学水利与土木工程学院有关的博士研究生和硕士研究生,博士生王利书以及赵亮、原翠萍也为本书付出了大量劳动,在此一并向他们表示诚挚的谢意。同时,向本书所引用参考文献的作者表示衷心的感谢。

水土保持调控技术措施的内容十分广泛,化学调控技术是其有效的拓展,也是有待继续深入研究的领域。本书的研究成果正是作者们多年进行的有益尝试,但水平所限,书中必然存在许多缺点乃至错误,恳请读者批评指正,也敬请各位专家学者提出宝贵意见。

作 者

2009 年 7 月

目 录

总序

前言

第1章 绪论	1
1.1 土壤表面的封闭作用和结皮	2
1.1.1 土壤结皮概念	2
1.1.2 土壤封闭的阶段划分	2
1.1.3 土壤结皮的形成机制	4
1.2 坡面土壤侵蚀	4
1.2.1 坡面入渗产流研究	4
1.2.2 坡面侵蚀产沙研究	6
1.3 水土流失化学调控方法的应用研究	8
1.3.1 高分子化合物	8
1.3.2 PAM 改良土壤	13
1.3.3 石膏的应用	17
第2章 PAM 的物理、化学及其他性质	20
2.1 PAM 简介	20
2.2 PAM 的物理性质	21
2.2.1 固体 PAM 的性质	21
2.2.2 PAM 水溶液的性质	21
2.3 PAM 的化学性质	23
2.3.1 水解反应	23
2.3.2 交联反应	24
2.3.3 羟甲基化反应	24
2.3.4 磺甲基化反应	25
2.3.5 霍夫曼降解反应	25
2.3.6 胺甲基化反应	25

2.4 PAM 的其他性质	26
2.4.1 PAM 的毒性及安全	26
2.4.2 土壤和植物中 PAM 的效果和生存期	26
2.4.3 外国关于 PAM 作为土壤改良剂的经验	27
第3章 PAM 对土壤入渗与结构的影响	29
3.1 土壤结皮的形成及形态特征	29
3.1.1 土壤结皮形成机制分析	29
3.1.2 土壤结皮研究进展	31
3.2 PAM 对土壤表面结构的影响	32
3.3 PAM 对土壤结构作用的试验研究	35
3.3.1 材料和方法	35
3.3.2 结果与分析	37
3.4 PAM 作用下土壤表皮结构的变化	64
3.4.1 材料和方法	64
3.4.2 结果分析	66
3.5 结论	71
第4章 PAM 提高雨水利用效率的效应	73
4.1 PAM 在防治水土流失中应用的研究现状及进展	73
4.1.1 PAM 增加入渗减少水土流失研究概况	73
4.1.2 PAM 对水土流失的控制效应	74
4.1.3 PAM 对作物生长的影响	76
4.2 PAM 对降雨入渗产流影响的试验研究	77
4.2.1 材料与方法	77
4.2.2 理论依据	78
4.2.3 结果分析	78
4.3 PAM 对降雨入渗产流的作用效果	88
4.3.1 PAM 对入渗的影响	88
4.3.2 试验材料与方法	89
4.3.3 结果分析	89
4.4 PAM 改善作物水土环境及对作物生长的影响	95
4.4.1 材料与方法	96

4.4.2 结果分析	98
4.4.3 小结	102
4.5 PAM 在水土保持中应用的经济效益分析	103
4.5.1 PAM 的水土保持效应研究	103
4.5.2 经济效益分析	104
4.6 结论	110
第5章 PAM 对土壤侵蚀产沙的影响	112
5.1 降雨引起土壤侵蚀的基本物理过程	112
5.1.1 土壤侵蚀研究概况	112
5.1.2 土壤侵蚀的基本物理过程	113
5.2 PAM 在防治土壤侵蚀中应用的研究现状及进展	115
5.2.1 PAM 防治土壤侵蚀的研究现状	115
5.2.2 PAM 防治水土流失	116
5.3 PAM 对土壤侵蚀产沙影响的试验研究	118
5.3.1 材料与方法	118
5.3.2 结果分析	118
5.4 不同因素下坡长对土壤侵蚀产沙影响分析	130
5.4.1 材料与方法	130
5.4.2 结果分析	130
5.5 PAM 对土壤侵蚀的作用效果及其应用前景	135
5.5.1 PAM 对土壤侵蚀的影响	135
5.5.2 试验材料与方法	137
5.5.3 结果与讨论	137
5.5.4 应用前景	141
5.6 结论	142
第6章 PAM 和石膏的应用对水分入渗和土壤侵蚀的影响	144
6.1 PAM 和石膏在土壤中的应用	144
6.2 不同 PAM 特性与应用方法对入参与侵蚀的影响	146
6.2.1 材料与方法	146
6.2.2 结果分析	149
6.3 PAM 与石膏对土壤入参与侵蚀的影响	161

6.3.1	材料与方法	161
6.3.2	结果分析	161
6.4	干粉 PAM 和磷石膏对不同 ESP 土壤的表面径流和侵蚀的影响	167
6.4.1	材料与方法	167
6.4.2	结果分析	168
6.5	结论	180
第 7 章	PAM 在沟灌中的应用	182
7.1	PAM 在灌溉中的应用现状及研究成果	182
7.1.1	引言	182
7.1.2	PAM 在灌溉中的应用及其效应研究	183
7.1.3	PAM 对土壤物理性质的影响	184
7.1.4	PAM 的环境效应	186
7.1.5	PAM 施用效果的影响因素	187
7.2	PAM 在沟灌中作用的试验研究及机制分析	189
7.2.1	试验设计	189
7.2.2	室内试验	194
7.2.3	田间试验	203
7.3	结论	215
第 8 章	PAM 对土面蒸发的影响	217
8.1	土面蒸发的基本过程和原理及其影响因素	217
8.2	室内恒温条件下 PAM 对土面蒸发的影响	218
8.2.1	材料和方法	218
8.2.2	土壤蒸发初始条件分析	220
8.2.3	结果分析与讨论	221
8.3	PAM 实际应用的可行性分析	239
8.4	结论、存在的问题及研究设想	241
8.4.1	结论	241
8.4.2	存在的问题及研究设想	242
第 9 章	施加 PAM 对土壤水分性状的影响	244
9.1	土壤水分运动参数	244
9.1.1	土壤水分运动参数的物理意义及其作用	244

9.1.2 土壤水分运动参数的测定原理	244
9.2 PAM 对土壤水分运动参数的影响	251
9.2.1 材料与方法	251
9.2.2 结果分析与讨论	252
9.3 PAM 对土壤水平入渗的影响	259
9.3.1 材料与方法	260
9.3.2 结果分析与讨论	260
9.4 PAM 对土壤水分有效性的影响	266
9.4.1 材料与方法	267
9.4.2 结果分析与讨论	267
9.5 结论	270
第 10 章 结论	272
参考文献	275

第 1 章 绪 论

水和土壤是人类赖以生存的物质基础，同时，水和土壤也是人类生存环境最基本的构成要素，水和土壤的和谐统一是优良生态环境系统不可或缺的核心。然而，水土流失已成为人类生存和发展最为严重的制约因素之一，正成为人类面临的环境问题之一。对于中国这样一个人口众多、自然生存环境脆弱而又急于发展的国家来说，水土流失及其所带来的农业发展和生态环境问题更为突出。

水土流失是指“在水力、风力、重力等外力作用下，山丘区水土资源和土地生产力的破坏和损失。水土流失包括土壤侵蚀及水的损失，也叫水土损失”（王礼先，1997）。水的流失与土壤侵蚀是一个问题的两个方面，它们之间既有联系又有一定的区别。水的流失主要是降雨在土壤的表面形成径流后而流失，也是引起土壤侵蚀的主导因素，土壤侵蚀与水的流失是同时发生的。适度的表面径流是水循环的必然环节，如果土壤表面土壤侵蚀的控制措施采取得当，就不会或减少形成土壤侵蚀，但土壤侵蚀一定会伴随水的流失。

中国是一个干旱、半干旱面积较大的国家，旱区面积约占国土面积的 70%，在干旱和半干旱地区，水土流失问题尤为严重，所以中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一，土壤侵蚀遍布全国，而且强度高，成因复杂，危害严重，尤以西北的黄土地区最为严重。全国土壤侵蚀面积达 492 万 km^2 ，占国土面积的 51%，其中水蚀面积 179 万 km^2 。水土流失不仅造成土地资源的破坏，导致农业生产环境恶化，生态平衡失调，水旱灾害频繁，而且影响各业生产发展，严重制约着中国的可持续发展（王礼先，1997）。

在干旱和半干旱地区，造成水土流失的一个重要原因是降雨引起的土壤表面结皮，结皮降低土壤的入渗率，增加土壤表面的径流，造成土壤侵蚀。因此，如何抑制土壤表面结皮、减少土壤表面径流、增加降水入渗、把有限的天然降水最大限度地储存在土壤中、最大限度地提高水资源的利用率吸引了许多学者的关注。这不仅是发展旱作农业、提高土地生产力和农业抵御旱灾能力的重要途径，而且还能大大降低土壤侵蚀及减少由此产生的生态环境问题。因此，许多学者进行了大量的研究。例如，利用高分子化合物——PAM 作为土壤改良剂增加土壤的降水入渗率、减少径流、降低土壤的侵蚀就是这一领域的研究热点之一。

1.1 土壤表面的封闭作用和结皮

1.1.1 土壤结皮概念

降雨在土壤表面形成封闭和结皮是普遍存在的自然现象,在干旱和半干旱地区更是如此 (Morin and Van Winkel, 1996; Helalia et al., 1998)。一次大于土壤入渗能力的降雨所产生的径流会产生一系列连续作用过程:雨滴打击土壤表面,地表径流的形成,土壤颗粒的剥离、搬运和沉积,其结果是导致土壤表层封闭,形成结皮。结皮是土壤表面一层厚 2~3mm 的薄层,具有比其下方土壤更大的密度、更细的孔隙、更低的导水性。它能显著地减小土壤的入渗率,增大地表土壤强度和径流量,可能增加土壤侵蚀,妨碍种子发芽 (Duley, 1939; Baver et al., 1972; Holder and Brown, 1974; Bradford et al., 1987; Ben-Hur and Letey, 1989; Helalia and Letey, 1989; Smith et al., 1990; Morin and Van Winkel, 1996; Helalia et al., 1998)。

土壤结皮的分类是土壤结皮研究中的一个重要问题,不同类型结皮反映了不同的形成机制。结皮的分类尽管还有争议,但有一点认识是比较一致的:根据结构中有无外来物质,结皮可分为沉积结皮 (depositional crust) 和结构结皮 (structural crust) 两大类 (Morin and Van Winkel, 1996)。Moore 和 Singer (1990) 认为沉积结皮和结构结皮是由于雨滴冲击的物理作用和土壤团聚体分散的化学作用而形成的,沉积结皮是由于水流过土壤表面引起悬浮土粒的搬运和随后的沉积而形成的。Remley 和 Bradford (1989) 认为由雨滴打击形成的结皮是结构结皮,由运移和沉积形成的结皮是沉积结皮。结构结皮形成于土壤颗粒在原地的重新排列分布,这是由于分散的团聚体物质不断地被夯实和板结的结果。沉积结皮是在产流形成的条件下由于土壤颗粒的分选、位移和沉积而形成 (Bissonnais et al., 1998)。许多野外观察到的解剖和室内模拟降雨试验形成的结皮都是雨滴冲击和沉积两种作用的结果。

1.1.2 土壤封闭的阶段划分

土壤表面封闭可以由土壤的入渗率来定量表征。一般说来,根据土壤的入渗随时间的变化曲线可将土壤封闭分为三个阶段:①从降雨起始点到径流初始点,土壤的入渗率比较大;②径流初始点到径流稳定状态的出现,由于封闭作用,入

渗率迅速降低达到一个常数；③径流和入渗的稳定阶段，封闭层在土壤表面形成后，入渗率达到最终或稳定值。

Moore 和 Singer (1990) 通过试验研究，进一步证实了土壤结皮形成的三个阶段，并分析了结皮的形成过程中土壤表面径流和土壤侵蚀物质的变化特征，认为土壤结皮的特征总可以从径流和土壤表面物质的变化、这些物质在土壤表面结构中的黏结作用以及这些要素之间的相互作用来进行描述。一般来说，在结皮形成过程中，随着团聚体分散，土壤表面物质不断地减少，形成孔小、致密的结皮，这一过程可以通过径流量的数据及渗透性反映出来。他们同时分析了各个结皮阶段的主要形成作用：第一阶段，雨滴冲击的物理分散、压密和土粒的搬运作用是结皮形成的主要机制；第二阶段，由水流引起的分散、携带、土粒的沉积作用逐渐取得主导地位，溅蚀作用被土壤表面的水流减弱；第三阶段，结皮的均衡是主要特点，结构和沉积结皮是结皮维持的主要原因。近来的研究提出，土壤结皮还可能有一个第四阶段的观点，尽管这一阶段在入渗曲线上没有反映出来，但是存在，而且也是一个很重要的阶段。降雨停止后，土壤表面会滞留大面积的静止水体，水体中的悬浮颗粒会根据粒径的大小依次沉积在土壤的表面，最终形成结皮。这一阶段在野外尤为重要，也正是野外结皮常见微层结构的原因（唐泽军等，2002）。

蔡强国等（1996）研究则表明，在 30min 降雨过程中，土壤团聚体被破坏，土壤颗粒发生垂直和水平分选，结皮层和淋溶层的孔隙和结构不断形成和破坏，其形成经历了形成—破坏—再形成的过程。之后他又把结皮形成归纳为前期和逐渐形成阶段及基本形成的动态平衡三个阶段：①当降雨历时小于 5min，由于雨滴的打击作用，表层中的团聚体被击碎或崩解，分散为细小颗粒，发生溅蚀和搬运，在土壤表层形成明显起伏的溅蚀坑，表土很快吸水湿润，土壤中颗粒膨胀、崩解，但无过多水体向下层渗透，开始形成不完整的表土结皮。②表土结皮逐渐形成阶段，降雨历时 15~25min（坡度越陡，这个阶段历时越长），在雨滴的打击下，溅蚀坑的起伏逐渐减小，土壤表面变得平滑，结皮趋于密实，同时，水流向土中入渗，一些细小土粒淋入土壤孔隙中，逐渐填塞土壤孔隙，形成淋溶层，使土壤入渗率减小，土壤表层容重增加，抗蚀能力也随之增加。③结皮形成与破坏再形成的动态平衡阶段，在雨滴的打击下，土壤表面已较为光滑、密实，起伏很小，再次降雨时，3~5min 就产流，向下坡的溅蚀量仅为无结皮时的 30% 左右，雨滴打击仅能破坏强度较低的结皮部分，可供溅蚀搬运的土壤颗粒已大大减少，同时雨滴打击又使土壤表面更加光滑、密实，使表土结皮不断得以加强，土壤表层处于动态平衡状态。按照结皮的发育阶段，又可分为四个类型：①松散粉状结皮；②松散薄片状结皮；③较紧密的片状结皮；④紧密的片状、块状结皮。

1.1.3 土壤结皮的形成机制

对于结皮的形成机制的研究,许多学者的表述不一。McIntyre (1958) 通过人工模拟降雨试验证实,在结皮的形成过程中两种机制起主要作用,即细颗粒淋入和雨滴的打击夯实作用,而雨后悬浮颗粒的沉积与定向排列并不重要。但 Onofriok 和 Singer (1984) 提出,雨滴打击和悬浮颗粒的沉积具有同等重要的作用。Marshall 和 Holmes (1988) 则认为,雨水是由极性分子构成,雨滴对土壤团聚体的不断剥离,使土壤颗粒表面形成正负电荷不平衡的双层结构。因此,当携带悬浮颗粒的径流在土壤表面入渗时,其流速会按几何级数减小,这样悬浮颗粒的动能不足以克服土壤表面的吸引力而被吸附在土壤的表面,很快土壤孔隙被堵塞封闭而形成结皮。

自 20 世纪 30 年代以来,虽然许多学者对于结皮形成的作用过程各自表述不一,但是比较一致地认为土壤结皮的形成主要有两个作用:①物理机械作用:由于雨滴对土壤表面的打击作用引起土壤团聚体的分散,使表面的土粒产生位移和压密;②物理-化学作用:由于土壤团聚体的分散、阳离子的交换作用等,细小土粒在运移和沉积过程中堵塞表层土壤的孔隙形成封闭 (Agassi et al., 1981; Shainberg et al., 2003)。物理封闭由雨滴的能量和土壤特性所决定,而化学封闭则与水和土壤中的离子组成及含量有关。

在许多研究中,土壤表面封闭和结皮的概念通常没有严格区分。然而,封闭和结皮在本质上是不同的,Remley 和 Bradford (1989) 曾定义表面封闭为结皮的初始阶段或湿润阶段,结皮为随后的干固阶段。本质上来说,封闭是土壤结皮的形成作用,结皮是封闭作用的结果,封闭的发展导致形成致密的结皮。

1.2 坡面土壤侵蚀

1.2.1 坡面入渗产流研究

降雨入渗过程主要是非饱和土壤水分的运动过程,它属于广义的渗流理论范畴。对渗流理论的定量研究,最早的成就是法国工程师 Darcy 提出的达西定律 (雷志栋, 1988)。1931 年 Richards 将达西定律引入非饱和土壤运动方程,从而使入渗研究步入了一个崭新阶段。Green-Ampt、Philip、Horton 等在此基础上建立了各自的入渗模型,使入渗理论得到进一步完善。