

磷素 迁移规律与模拟

● 周丽丽 范昊明 贾燕锋 武 敏 著



中国农业科学技术出版社

磷素 迁移规律与模拟

● 周丽丽 范昊明 贾燕锋 武 敏 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

磷素迁移规律与模拟 / 周丽丽等著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1269 - 4

I. ①磷… II. ①周… III. ①土壤磷素 - 元素迁移 - 研究
IV. ①S153. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 074278 号

责任编辑 于建慧 崔改泵

责任校对 贾晓红 郭苗苗

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109194 (编辑室) (010) 82109704 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82109194

网 址 [http://www. castp. cn](http://www.castp.cn)

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张 11

字 数 208 千字

版 次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价 35. 00 元

前 言

磷作为重要的生命元素在生物的生长繁育过程中起着不可替代的作用。磷参与复杂的地球化学循环过程,其在环境中的含量水平和分布特征不仅能够反映相关的地球化学信息,而且能反映出环境对污染物的容纳能力。到目前为止还没有研究表明磷素本身具有任何毒害作用,其被公认的影响仅在于磷素的迁移与土壤退化过程具有密切的关系,以及过量的磷素输入会加速水体富营养化。有报道称全世界每年大约有 $3 \sim 4 \times 10^6 \text{ t P}_2\text{O}_5$ 从土壤迁移至水体中,这必将减少土壤磷库的累积,同时增加水环境的负担。

磷、氮都是重要的营养物质,氮(主要是硝态氮)易随径流迁移,并对人体健康构成直接威胁,国内外对其研究较为深入,但关于磷的迁移研究相对薄弱。磷易被土壤固定,很难向土壤深层迁移,即使在饱和条件下磷素向下迁移的速度也极慢。因此,不同于氮素易随下渗水和地表水迁移造成地下水和地表水的污染,磷素则以地表迁移为主,随坡面径流和泥沙汇入接纳水体。

沈阳地区是我国重要的粮食产区,种植作物主要为玉米和水稻。沈阳近郊土壤有效磷含量变幅为 $2.3 \sim 286.7 \text{ mg/kg}$,平均为 39.8 mg/kg ,约为全国第二次土壤普查结果的6倍。磷肥长期普遍施用,而作物对磷的吸收利用率较低,同时加之灭虫剂、除草剂等农药的大量使用,致使沈阳地区耕地土壤磷素富集,从而加大了下游水体富营养化的风险,威胁生态安全。

沈阳地区夏季雨量充沛,磷素受降雨侵蚀影响迁移过程复杂,迁移量集中,对土壤肥力及接纳水环境影响较大;同时,该区春季解冻期土壤季节性冻融过程比较强烈,磷素形态发生变化,表层土壤抗蚀性降低,因此该时期融雪径流侵蚀对磷素迁移过程的影响更为复杂,由此产生的环境问题不容忽视。

笔者在沈阳地区磷素迁移方面做了一些有益的尝试,现将阶段性的研究成果集成本书与大家共勉,希望这些研究成果、方法和理念对读者有所裨益。全书共

分六章。第一章绪论，系统回顾了降雨侵蚀与磷素迁移、春季解冻期土壤侵蚀与磷素迁移以及磷素迁移模型的研究进展，总结了磷素迁移的概念与特征。第二章降雨侵蚀与磷素流失规律研究，在系统分析降雨强度、坡度对坡面产流、产沙过程影响的基础上，深入探讨了降雨条件下坡面磷素流失规律。第三章春季解冻期土壤侵蚀与磷素迁移规律研究，以融雪径流为侵蚀营力，系统分析了冻融循环次数、土壤含水率和施磷量对春季解冻期径流和泥沙中有效磷含量的影响。第四章流域磷素迁移模型建立，介绍了模型建立流程、模型结构及原理。第五章流域磷素迁移量的时空分布与评价，系统分析了流域磷素年、汛期和月负荷分布规律，阐述了磷素负荷的空间分布特点，进而明确了磷素流失关键源区。第六章流域土地利用变化对磷素输出的影响与磷素流失防控方案，通过3种情景模拟，明确了不同土地利用类型对流域磷污染的影响，从而提出了磷素流失的防控措施。感谢国家自然科学基金项目（41101256、41071183、40601054）、高等学校博士学科点专项科研基金项目（20112103120001）和辽宁省博士科研启动基金项目（20111080）的资助，使本研究顺利开展。对在试验研究和撰稿过程中付出辛勤劳动的张志玲、郭萍、韩博、黄东浩、齐非非、顾广贺等人表示衷心的感谢。同时，向本书所有参考文献的作者致以最诚挚的谢意。目前，磷素迁移研究还不够深入，特别是春季解冻期磷素迁移机理和流域磷素迁移模型的建立尚处于探索阶段。同时基于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请同仁赐教。

目 录

前言	(1)
第一章 绪论	(1)
第一节 磷素迁移	(2)
一、磷素迁移概念	(2)
二、磷素迁移特征	(2)
第二节 坡面磷素迁移研究	(4)
一、降雨侵蚀与磷素迁移	(4)
二、春季解冻期土壤侵蚀与磷素迁移	(6)
三、磷素迁移模型	(9)
第三节 磷素迁移研究中存在的主要问题	(12)
第二章 降雨侵蚀与磷素流失规律研究	(13)
第一节 试验设计与研究方法	(14)
一、材料与设备	(14)
二、研究方法	(14)
第二节 降雨侵蚀规律研究	(18)
一、产流时间特征	(18)
二、坡面入渗率特征	(19)
三、坡面水流流速特征	(21)
四、径流量变化特征	(24)
五、泥沙量变化特征	(29)
六、土壤侵蚀过程演变	(35)
第三节 有效磷迁移机理研究	(37)
一、雨强对有效磷浓度的影响	(38)

二、坡度对有效磷浓度的影响	(41)
三、坡地有效磷流失率特征	(43)
四、有效磷迁移量过程分析	(44)
五、有效磷素的富集特征	(48)
六、有效磷迁移过程统计模型	(49)
第四节 本章总结	(51)
第三章 春季解冻期土壤侵蚀与磷素迁移规律研究	(53)
第一节 试验设计与研究方法	(54)
一、材料与设备	(54)
二、研究方法	(55)
第二节 春季解冻期土壤侵蚀模拟研究	(58)
一、冻融前后径流平均含沙量差异分析	(58)
二、坡面径流量变化特征	(59)
三、侵蚀泥沙量变化特征	(62)
四、冻融作用对坡面侵蚀形态的影响	(67)
第三节 春季解冻期磷素迁移机理研究	(69)
一、径流中磷素的流失特征	(69)
二、泥沙中有效磷的迁移	(76)
三、磷素的富集	(82)
四、坡地有效磷的分布	(84)
五、磷素迁移过程统计模型	(85)
第四节 本章总结	(89)
第四章 流域磷素迁移模型建立	(91)
第一节 流域概况	(92)
一、自然地理条件	(92)
二、河流水系及其分布	(93)
三、流域点源状况	(94)
第二节 流域磷素迁移模型选择	(95)
一、模型选择	(95)

二、模型结构及原理	(96)
第三节 数据库建立与水文响应单元划分	(100)
一、数据库建立	(100)
二、子流域划分	(119)
三、HRU 分配	(121)
第四节 模型参数敏感性分析	(122)
一、方法与原理	(122)
二、敏感性分析	(123)
第五节 参数率定与模型验证	(125)
一、参数率定与指标选取	(125)
二、模型校准与验证	(126)
第六节 本章总结	(128)
第五章 流域磷素迁移量的时空分布与评价	(130)
第一节 流域磷素迁移量的时间分布规律	(130)
一、年负荷分布	(130)
二、汛期负荷分布	(133)
三、月负荷分布	(134)
第二节 流域磷素迁移量的空间分布规律	(138)
一、降水及径流空间分布	(138)
二、泥沙迁移量的空间分布	(139)
三、磷素负荷空间分布	(140)
第三节 流域磷素流失关键源区的判断	(142)
一、土壤流失关键源区判断	(142)
二、磷素流失关键源区判断	(143)
第四节 本章总结	(144)
第六章 流域土地利用变化对磷素输出的影响与磷素流失防控方案	(147)
第一节 土地利用情景建立方法	(147)
第二节 土地利用变化对径流产生的影响	(148)
第三节 土地利用变化对泥沙输移的影响	(149)

第四节 土地利用变化对磷素输出的影响	(151)
一、年值输出结果与分析	(151)
二、月值输出结果与分析	(154)
第五节 磷素流失防控方案	(155)

参考文献 (157)

第一章 绪 论

磷是植物生长所必需的营养元素之一,土壤对其有很强的吸附能力。随着土壤侵蚀的发生,土壤中的磷素也随泥沙和径流发生迁移和沉积,从而引起土壤肥力下降及下游水体富营养化。目前,由磷素迁移引起的非点源污染问题受到越来越多的关注。

近年来,许多国家的农业非点源污染问题都日益突出。资料显示,美国有 67% 的污染来自于非点源污染,而农业非点源污染则占其中的 57% ~ 75% (Novotny et al., 1981; USEPA, 1995)。欧洲由于农业活动造成大量的 TN 和 TP 污染,其污染量分别达入海通量的 60% 和 25% (Edwin, 1996)。荷兰由农业非点源污染产生的总氮和总磷负荷分别占水环境污染负荷总量的 60% 和 40% ~ 50% (Boers, 1996)。我国的非点源污染情况也日趋严峻。20 世纪 90 年代,化肥和杀虫剂等农用化学品施用量与日俱增,尤其是我国的化肥利用率较低,大量的氮磷损失极易随地表径流的冲刷进入河流或通过淋失作用进入地下水,导致水质和水体富营养化问题的加剧,引发的问題引起了越来越广泛的关注。近 20 年来的研究表明,氮、磷非点源污染负荷已占受纳水体污染负荷的 50% 以上 (晏维金, 1996; 蒋鸿昆等, 2006), 并对受纳水体产生严重影响。氮和磷都是生物的重要营养物质,但藻类等水生生物对磷更为敏感。磷是水体富营养化的控制性因素,水体中增加 1kg 磷可增长 100kg 藻类。水体中磷的浓度超过 0.02mg/L 时,对水体的富营养化就起明显的促进作用。如果磷是限制因素,总磷浓度超过 0.1mg/L 藻类会过量繁殖。

农田是磷素流失的主要策源地,磷素迁移与农田土壤侵蚀密切相关,我国国土面积的 37.6% 存在不同程度的土壤侵蚀。据统计,我国现有耕地 $1.22 \times 10^8 \text{hm}^2$, 其中, 38% 的农耕地为土壤侵蚀严重的旱地 (张洪江, 2008)。耕地表土流失,造成土地生物或经济产量明显下降的同时也成为非点源污染物的主要策源地区。东北地区是我国重要的粮食生产基地,严重的土壤侵蚀已吞蚀了大量土地,使该区土壤肥力失衡,耕地生产力下降,粮食生产受到抑制。我国东北地区辽宁、吉林、黑龙江 3 省共有坡耕地 $561.47 \times 10^4 \text{hm}^2$, 每年因土壤侵蚀损失的

氮、磷、钾量分别达到 $9.24 \times 10^5 \text{t}$ 、 $3.99 \times 10^5 \text{t}$ 和 $1.84 \times 10^6 \text{t}$ 。其中, 辽宁省自新中国成立以来由于土壤侵蚀已损失土地 $71.2 \times 10^4 \text{hm}^2$, 吉林省仅浑江市的坡耕地已被沟壑侵蚀 4800hm^2 (占耕地总面积的 15%), 黑龙江省的黑土区有大型冲沟 14.4 万条, 已侵蚀耕地 9.33hm^2 (张洪江, 2008)。如此严重的土壤侵蚀和养分流失与该区所处的地理位置和气候因素密切相关。其位于欧亚大陆东部, 气候类型多样, 自南而北跨暖温带、中温带与寒温带。雨量集中于夏季, 以水力侵蚀为主, 汛期降雨是土壤侵蚀和磷素流失的主要动力。冬季较长, 具有深厚的季节冻结层, 冻融侵蚀显著。东北地区冻土层厚度多超过 1m, 春季解冻期土壤季节性冻融过程比较强烈。已有研究表明, 冻融作用会影响土壤的物理性质及力学性质, 进而加重土壤侵蚀, 但受诸多因素限制, 目前为止, 国内外对其研究甚少。同时, 季节性冻融条件下土壤中的磷素形态会发生变化, 影响随着融雪侵蚀而发生的磷素迁移过程。因此, 有必要加强降雨侵蚀和春季解冻期土壤侵蚀的研究, 深入分析磷素迁移的规律。

第一节 磷素迁移

一、磷素迁移概念

磷素迁移是指土壤中存在的溶解态或吸附态磷素, 以广域、分散或微量的形式随径流或泥沙进入受纳水体的过程。

二、磷素迁移特征

磷素迁移不仅受降雨特征、磷素形态转化的综合影响, 还与土壤的理化性质、地形条件、坡面管理措施和土地利用方式密切相关, 其主要特点如下。

1. 迁移形式的特殊性

农业活动中为了满足人们对产量的需求, 施肥量日趋增大。但由于磷素在土壤中化学行为的特殊性, 磷肥施入土壤以后, 除少量磷素为植被吸收利用以外, 剩余部分均在土壤中发生累积, 很少向深层迁移, 即使在水分饱和情况下磷素向下迁移的速度也极慢。因此, 与易随下渗水和地表水迁移造成地下水和地表水污染的氮素不同, 磷素主要以地表迁移为主, 随坡面径流汇入下游水体。

2. 迁移载体的普遍性

径流和泥沙是坡面磷素迁移的主要载体。在坡面径流过程中, 由于径流与土

壤相互作用,可溶性磷会不断由土壤向径流解吸释放,因而径流与土壤的作用时间越长,溶解态磷随径流的流失量也就越大。泥沙结合态磷的流失主要受坡地产沙量的影响,产沙量越大,养分流失量也就越大,因此,泥沙结合态磷的迁移受降雨特征、土壤含水率、地形条件、坡面植被覆盖等因素的影响。

3. 迁移时间的间歇性

坡面磷素迁移时间为非连续的,主要发生在雨季和春季融雪期,这两个时期坡面容易形成径流,为土壤中磷素的输移提供动力。即使在多雨季节,磷素迁移也不是连续的,而是随着降雨的发生而发生。磷素迁移量与降水的年内分配具有较高的相关性,因此,坡面磷素迁移与降水条件密切相关,从而具有间歇性。

4. 迁移过程的分散性

磷素迁移与水土流失密切相关,并通过径流和泥沙流失过程而汇入受纳水体。径流在坡面上以漫流为主,当降雨强度超过土壤表面的下渗能力或包气带土壤含水量达到饱和时,剩余的降水就形成地面漫流。坡面漫流由许多时合时分的细小、分散水流组成,分散的地表径流挟带泥沙向坡下游输移。由于坡面漫流的分散性,土壤侵蚀与产沙过程不仅是剥离和搬运泥沙的过程,而且也是分散泥沙的过程,致使磷素的迁移过程也具有分散性。因此,磷素的迁移量很难量化,研究和防控难度较大。

5. 迁移路径的复杂性

由于坡面径流侵蚀力的空间易变性,土壤侵蚀所导致的磷素迁移在空间上存在差异。坡面磷素主要通过地表径流迁移,但是,产流过程中直接输出坡面进入下游水体的磷素仅仅是坡面磷素迁移流失中的一部分,由于坡面较长、坡度和地被物变化、产流量较小或降雨停止等原因,径流中携带的大量磷素会在坡面一定部位发生沉积,这些沉积的磷素又成为以后坡面磷素迁移的来源,输出坡面的径流泥沙及其携带的磷素是经过多次搬运—沉积—搬运以后才最终移出坡面进入受纳水体。

6. 迁移形态的多样性

随径流流失的磷素按其形态可以划分为溶解态磷与泥沙结合态磷两种类型,在水环境研究中泥沙结合态磷通常称为颗粒态磷。溶解态磷主要通过径流迁移,而颗粒态磷是通过以无机态和有机态形式吸附或结合在土壤颗粒表面,并随径流冲刷的泥沙迁移。水溶性磷是溶解态磷的重要部分,当其施入土壤后,并不是以原有的磷酸盐形态存在于土壤之中,而是随着土壤性质与组成的不同,很快发生物理和化学反应,转化成新的磷酸盐形态。溶解态磷容易被藻类等植物利用吸收;颗粒态磷吸附在土壤颗粒上,成为溶解态磷的潜在补给源。

第二节 坡面磷素迁移研究

一、降雨侵蚀与磷素迁移

(一) 降雨侵蚀

降雨径流及侵蚀泥沙是磷素迁移的主要载体。坡耕地是水土流失最为严重的地类之一，也是磷素流失的主要策源地。辽宁省现有坡耕地 12 914. 10km²，其中，坡度 15°以下的坡耕地占总数的 90. 7%，15°~25°的占总数的 8. 4%，大于 25°的占总数的 0. 9%，全省坡耕地具体分布情况见下表。从农业生产的角度出发，坡耕地是农业可持续发展的重要后备资源。因此，探究坡耕地土壤侵蚀机理，将对采取有效措施遏制坡耕地水土流失、控制坡耕地水土流失导致的面源污染具有重要意义。

表 辽宁省不同坡度坡耕地面积

Tab Land area with different slop gradient of Liaoning province (单位: km²)

市县	坡耕地总数	坡耕地坡度			
		3°~5°	5°~15°	15°~25°	>25°
全省合计	12 914. 10	6 481. 96	5 235. 58	1 081. 08	115. 48
沈阳	734. 61	427. 18	249. 70	49. 75	7. 99
大连	1 155. 23	684. 98	406. 16	61. 11	2. 99
鞍山	360. 88	151. 60	167. 58	37. 82	3. 88
抚顺	656. 74	256. 76	305. 16	84. 26	10. 56
本溪	578. 69	158. 54	257. 86	152. 91	9. 38
丹东	900. 29	362. 37	376. 80	122. 88	38. 24
锦州	822. 35	341. 21	419. 85	61. 28	—
营口	312. 09	183. 00	82. 32	43. 70	3. 06
阜新	2 046. 99	1 824. 39	221. 96	0. 65	—
辽阳	219. 69	65. 85	95. 54	50. 07	8. 22
铁岭	1 638. 63	743. 92	754. 48	124. 63	15. 60
朝阳	2 585. 77	1 002. 75	1 355. 70	215. 55	11. 77
葫芦岛	902. 14	279. 41	542. 48	76. 48	3. 78

注：参见余晓光（2003）调查研究

坡度是对坡面土壤侵蚀影响最大的因素 (Meyer, 1986), 也是控制坡耕地水土流失的重要因素, 它对侵蚀的影响最终通过坡面径流量和流速体现出来。坡度对径流量的影响各异。魏天兴 (2002) 认为, 径流率与坡度间为线性关系。而王占礼等 (2005) 采用人工模拟降雨试验对黄土裸坡降雨产流过程的研究表明, 在小雨强 ($0.80\text{mm}/\text{min}$, $1.04\text{mm}/\text{min}$, $1.70\text{mm}/\text{min}$) 条件下坡面径流深与坡度之间具有较好的抛物线相关性, 随着坡度的增大, 坡面径流深也相应增加, 但当坡度达到 25° 左右以后, 径流深反而变小。一般认为, 侵蚀量随着坡度的增大而增加。Zingg (1940) 在坡度较小时得出侵蚀量随坡度的增大而增大, 随后 Wischmeier 和 Smith (1960) 研究得出坡度与侵蚀呈多项式关系, 国内一些学者的研究也证实了这样规律。万廷朝 (1996) 亦指出坡度与土壤侵蚀量呈幂指数相关。刘莉丽等 (2005) 通过人工模拟降雨研究了直线坡和相同降雨强度下, 土壤流失量随着坡度的增大而增大, 且呈较好的幂函数关系。

大量研究表明, 坡面侵蚀量并不会随着坡度增大而无限增大, 在侵蚀随坡度的变化过程中存在一个临界坡度。我国许多学者试图对临界坡度理论进行论证, 但无论从实验结果还是从理论分析来看, 由于各地土壤、地形、植被等条件的差异以及影响侵蚀的因素众多, 临界坡度的大小尚无固定值, 许多室内外试验证明临界坡度大致介于 $25^\circ \sim 28^\circ$ 。蒋定生和黄国俊 (1984) 根据室内模拟试验研究分析, 坡度在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内, 土壤冲刷量随坡度变陡而增加, 至 20° 时随坡度增加其增加率减缓, 当坡度超过 25° 后冲刷量反而减少。陈法扬 (1985) 采用红壤进行试验, 结果表明, 18° 以下土壤冲刷量随坡度的增加而增加, 但趋势较平缓, $18^\circ \sim 25^\circ$ 土壤冲刷量随坡度急剧增加, 25° 以上土壤冲刷量反而减小。吴普特等 (1993) 利用人工模拟降雨方法研究了薄层水流的侵蚀动力、雨滴击溅和水流共同作用下的地表侵蚀与坡度的关系, 得到在击溅和水流共同作用下侵蚀量与坡度关系曲线, 发现临界坡度在 $25^\circ \sim 27^\circ$ 。Horton (1945) 和 Carson (1971) 等也曾有类似报道, Horton 由曼宁公式经过简化, 首先从理论上分析得出侵蚀的坡度转折角为 57° 。

降雨是土壤侵蚀发生的主要动力之一, 降雨强度、降雨量、降雨历时等对土壤侵蚀过程影响较大。Canton (2001) 通过田间长期定位试验研究发现, 西班牙半干旱区小区和小流域尺度下, 每年雨季的径流、泥沙过程特征主要受降雨强度的影响。吴发启等 (2000) 以彬县、永寿、西峰、黄龙和淳化径流场近 30 年的 598 组观测资料为样本, 对缓坡耕地降雨、入渗与产流的关系进行统计分析, 结果显示, 降雨量、降雨历时与径流模数呈幂函数关系, 平均降雨强度与其呈对数函数关系, PI_{60} 、 I_{60} 与产流关系密切, 孙飞达等 (2005) 应用人工模拟降雨的方

法, 研究 5 个不同的降雨强度下半干旱区农地的产流产沙特征, 结果表明, 农地径流量、侵蚀量随雨强增加而增加, 并与降雨强度呈指数函数或幂函数关系。耿晓东等 (2009) 研究表明, 产流时间随着降雨强度的增加而提前, 径流强度随着雨强的增大而增大, 坡面入渗率随着雨强的增加表现为先增加后减小, 径流率和入渗率与降雨历时的关系可以用幂函数和对数函数描述。董元杰等 (2010) 研究得出, 产沙量随着时间递增最终达到稳定产流, 但各次降雨达到稳定产流的时间均随降雨强度的增加而递减。可见在降雨诸要素中, 降雨强度对土壤侵蚀过程影响更为突出。

(二) 降雨侵蚀条件下磷素迁移

降雨侵蚀条件下, 磷素迁移与降雨特性、土壤侵蚀过程及施肥水平关系密切。Chuman 等 (1973) 研究表明, 氮、磷元素会在降雨过程中流失, 暴雨对其影响很大, 总磷的流失量可达到 84%, 这会造成严重的非点源污染。Kingery 等 (1973, 1994) 研究显示, 氮、磷的流失与土地利用方式、施肥程度等也有密切的关系, 大量施肥容易造成土壤中的氮、磷元素等养分积累, 是引起污染物流失的根源。王全九 (1993) 研究认为, 降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移是一个十分复杂的物理化学过程。土壤养分流失与水土流失紧密相关, 泥沙流失是养分流失的主要方式 (刘秉正, 1995)。Ngkeekwong (2002) 研究证实, 氮、磷在热带农区表面径流、泥沙中的迁移量分别达到 $2 \sim 7 \text{ kg/hm}^2$ 和 1 kg/hm^2 , 而且认为磷迁移量主要与泥沙有关。另外, 溶质迁移还与坡度、雨强、土壤性质等因素有关。王辉 (2006) 室内试验研究结果表明, 土壤质地、降雨雨强和坡度等因子影响着坡地溶质的迁移, 同时, 土壤容重和前期含水率也影响着坡地水分、养分的迁移。孔刚 (2007) 通过室内人工模拟降雨试验, 总结出坡度越大、水土流失的程度也越大, 径流溶质质量浓度与坡度间成显著正相关, 土壤侵蚀对径流溶质质量浓度的贡献较大。邬伦等 (1996)、Zhu (2002)、李宪文等 (2002)、王洪杰等 (2002)、杨金铃等 (2002) 和黄满湘等 (2003) 分别就不同区域及不同尺度天然降雨及人工模拟降雨条件下, 径流、泥沙与养分的输出特征进行了探讨。

二、春季解冻期土壤侵蚀与磷素迁移

(一) 春季解冻期土壤侵蚀

除降雨侵蚀外, 春季解冻期的融雪径流或降雨也是磷素迁移的动力之一。我

国东北地区普遍具有深厚且为时较长的季节性冻层, 每年 2~3 月地表开始解冻及融雪, 地表解冻土壤含水率通常处于较高水平。因此, 这一时期较小的降雨或融雪水都会造成较大侵蚀。

春季解冻期土壤抵抗侵蚀的能力降低, 一般极易发生侵蚀作用。有研究表明, 部分冻融侵蚀区春季解冻期土壤侵蚀量占全年水土流失量的绝大部分 (Sharratt B S et al., 2001; Sharratt B S et al., 2000; Dawh T Nicholson, 2001)。春季融雪径流使得美国西太平洋沿岸及加拿大魁北克省西南地区的土壤流失量达全年土壤流失量的 90% (Wischmeier et al., 1978)。加拿大 Peace 河流域的研究表明, 春季融雪径流引起的土壤流失为 80% (Van Vliet et al., 1991)。Zuzel 等 (1982) 对俄勒冈东北部地区发生在冻结土壤上的径流与土壤侵蚀进行了研究, 认为在土壤流失中, 有 86% 的侵蚀是由于融雪径流和冻融作用造成的。Zuzel 等 (1993) 的研究证实, 初春融雪时的降雨能将热量传递给积雪, 而且雨水击溅会产生动力作用, 加速积雪融化的速度, 增加融雪侵蚀的复杂性, 加剧土壤侵蚀。温度突然回升、暖湿气流入侵、融雪季节中出现的降雨事件对融雪侵蚀贡献高达 60%~70%。王随继 (2004) 的研究表明, 黄河中游的沙岩区冻融侵蚀量可达沟道产沙量的一半左右, 最大可达流域侵蚀量的 1/3 左右。张永光等 (2006, 2008) 的研究认为, 春季浅沟侵蚀受融雪、冻融影响显著, 东北漫岗黑土区在春季表层土壤解冻、地表裸露和存在季节性冻土层的条件下, 春季融雪及强降水易造成强烈的浅沟侵蚀。

冻土层解冻时期, 土壤侵蚀受解冻深度和冻融环境影响较大, 而表层水分聚积增多是土壤侵蚀严重的重要原因 (周丽丽等, 2009、2010; 范昊明, 2010)。Lawrence W Gatto 等 (2000) 对土壤冻融作用与细沟的冻融侵蚀过程进行研究, 指出冻融坡面细沟径流比普通坡面运移的泥沙多很多, 原因是冻融循环增加了表层土壤的含水率, 减少了表层土壤的凝聚力, 使细沟侧壁土壤坍塌、泥浆流下, 而坍塌的土壤使细沟的横断面由矩形变成三角形, 使细沟的水力半径减少了 32%, 流速约减少 25%。由于冻融土壤中温度梯度的差异表层土壤含水率增加, 导致土层下部水分以热毛管运动的方式, 逐渐流向表层而被冻结成为固体形态, 因此, 季节性冻结可引起土壤水分在表层的聚积 (中国科学院林业土壤研究所, 1980)。赵洪书 (1979) 在黑龙江依安县观察, 每降水 1mm 可使土壤中水位上升 11~19mm。H Kok 等 (1990) 在 Palouse 粉沙壤土上的实验显示, 土壤的抗剪强度与距地表 10mm 剖面内的土壤含水量成反比, 融化过程中土壤抗剪强度较低, 但如果蒸发较快, 土壤可以在几小时内又恢复其相对较大的抗剪强度。未冻土在降雨或融雪后其土壤水含量不会超过土壤总重量的 25%, 而冻结状态下其

含量可以达到 58%，融解状态下其含量可以达到 44%。初始土壤含水率不仅影响解冻土层含水率状况，还决定着土壤的冻结类型，进而对坡面产流和侵蚀产生较大影响（周丽丽等，2010）。王飞等（2008）通过分析东北地区气温以及降水变化对区域冻融作用和冻融侵蚀的影响发现，由于春季解冻期降水的显著增加，致使这一时期土壤侵蚀存在加剧的趋势。刘佳等（2009）研究了春季解冻期黑土的侵蚀特征，认为在春季解冻期由于冻融作用，黑土坡面土壤解冻不完全、渗透能力差，致使此时降雨的侵蚀能力相对较强，导致这一时期坡面土壤侵蚀严重。嫩江流域春季解冻期内的降水量和径流量对输沙量的影响明显（张德禹等，2009），而春季解冻期融雪量的增加可能导致土壤侵蚀加剧（范昊明等，2009）。

可见，春季解冻期季节性冻融作用显著，表层土壤含水量高，同时，冻融作用通过影响土壤的渗透性、容重、含水量和稳定性等使其更易遭受侵蚀。我国东北地区土壤侵蚀发展速度较快，部分黑土侵蚀区土壤冻融侵蚀的速度已不亚于暴雨造成的水土流失（范昊明等，2003）。

（二）春季解冻期磷素迁移

春季解冻期的季节性冻融作用可引起较为严重的水土流失，而水土流失是土壤磷素发生迁移的主要途径。目前，国内外有关冻融作用对土壤磷素迁移影响的研究比较少，但仍取得了一些成果。

冻融作用对土壤磷素释放及有效性有影响，使土壤溶液中磷素等营养物质浓度发生变化。冻融作用可促进土壤有机磷的合成，增加土壤中可溶性磷的浓度。Michele Freppaz 等（2007）研究了冻融作用对冬季高山土壤磷素的影响，实验结果显示，经过单一冻融循环，在高含水量（30%）情况下，土壤中的总磷和水溶性有机磷都有增加，而反复的冻融循环作用，没有使这两种磷再随着含水量升高而显著增加。Zhao 等（2008）对科尔沁沙地东南部 3 种典型植被下 0~20cm 土壤进行了室内冻融模拟实验，结果表明，土壤微生物量磷在整个培养期内受冻融作用的影响并不明显，即使解冻后，有效磷仅仅出现了微弱的升高，土壤微生物量磷出现了微弱的降低。Sjursen（2005）研究发现，冻融作用后有效磷和微生物量磷不但没有升高，反而出现显著的下降。Read 和 Cameron（1979）研究发现，从秋季到春季，土壤中的可提取磷几乎没有什么改变。M. S. A. Blackwell 等（2010）通过对土壤微生物层的地表水进行烘干再湿润和冻融试验，结果发现这两种形式可以杀死土壤中 70% 的生物量，并且均可以导致磷的增溶作用。由于土壤冻融过程造成植物细胞死亡和有机质的释放，加速了土壤中有机质矿化和硝化速率，增加了土壤溶液中可溶性有机物以及养分的浓度，其中的一部分便