

# 土壤侵蚀中吸附态磷流失研究现状与展望

严慕绥<sup>1</sup>, 高云飞<sup>2</sup>, 杨胜天<sup>2</sup>, 王雪蕾<sup>2</sup>, 夏依木拉提<sup>3</sup>

(1. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院 遥感科学国家重点实验室 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 伊犁水文水资源勘查局, 新疆 伊宁 835000)

**摘要:** 吸附态磷流失是土壤侵蚀的结果之一, 不仅造成土壤肥力流失, 还是导致水环境恶化的重要因子。吸附态磷流失是非点源污染计算的重要组成部分, 通过土壤侵蚀研究吸附态磷流失是目前普遍采用的方法。总结了国内外关于吸附态磷流失的研究现状, 分析了我国当前土壤侵蚀中吸附态磷流失研究中存在的问题, 认为中国土壤侵蚀中吸附态磷流失研究还不能满足实践应用的要求。因此一方面需要增加实验数量, 加强实验深度, 坚持连续监测的工作, 深入了解吸附态磷流失的机理; 另一方面应积极构建适合国情的模型, 构建基础信息数据库, 开展国外模型在国内的适用性、差异性研究。

**关键词:** 吸附态磷; 土壤侵蚀; 非点源污染

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0234-04

中图分类号: S158

## Research Progress and Prospect of Soil Erosion and Adsorbed Phosphorus Loss

YAN Mu-sui<sup>1</sup>, GAO Yun-fei<sup>2</sup>, YANG Sheng-tian<sup>2</sup>, WANG Xue-lei<sup>2</sup>, Xaymurnat<sup>3</sup>

(1. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Beijing 100053, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, and Beijing Key

Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing

100875, China; 3. Investigation Bureau of Hydrology and Water Resources, Yining, Xinjiang 835000, China)

**Abstract:** The adsorbed phosphorus loss is one of the adverse effects of soil erosion, which results in not only the degradation of soil fertility, but also the deterioration of water environment. The adsorbed phosphorus loss is recognized as an important part of non-point source phosphorus pollution. Studying the adsorbed phosphorus loss by the investigation of soil erosion is a commonly used method. This article summarizes the researches at home and abroad and analyzes the China's current problems of adsorbed phosphorus loss together with soil erosion. Domestic study of soil erosion and adsorbed phosphorus loss does not match the requirements of practical applications. On one hand, there are the needs to increase number of experiments, enhance works on experiments, adhere to continuous monitoring, and deeply understand China's soil erosion and adsorbed phosphorus loss mechanisms. On the other hand, we should actively construct a model suitable to national circumstances, build the basis of information databases, and study the applicability and difference of foreign models.

**Keywords:** adsorbed phosphorus; soil erosion; non-point source pollution

非点源污染是导致水环境恶化的主要原因之一, 由非点源污染引发的水体富营养化现象日益加剧, 水体富营养化已成为我国大型淡水湖泊中最主要的水环境问题<sup>[1]</sup>。磷是非点源污染物的重要组成部分, 农业上化肥、有机肥和农药的大量施用是其来源<sup>[2,3]</sup>。磷肥在施入土壤后, 有效利用率很低, 一般只有 10%~

25%, 除少量被作物吸收外, 大部分被土壤固定。近年来, 我国农业中磷肥投入量大大高于其产出量, 导致农田土壤磷水平呈逐年上涨趋势, 土壤中磷的累积水平很高<sup>[4]</sup>。磷在土壤中的存在按物理形态可以分为溶解态磷和吸附态磷两大类, 吸附态磷以吸附在土壤胶体上的形态存在, 约占总磷的 95%~99%<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2009-03-09

修回日期: 2009-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(40671123); 国家高技术研究发展计划(2006AA12Z145); 跨界河流生态因子遥感反演关键技术研究(216010)

作者简介: 严慕绥(1957—), 女(壮族), 广西壮族自治区龙州县人, 硕士, 高级工程师。研究方向为信息工程、水土保持。E-mail: yanmusui@sina.com。

通信作者: 杨胜天(1965—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 博士, 教授, 主要研究方向为自然地理、遥感和环境科学。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn。

磷作为非点源污染物其流失过程十分复杂, 流失途径包括降雨或人工排水形成的土壤侵蚀、地表径流及渗漏淋溶<sup>[6]</sup>。其中伴随土壤侵蚀的磷流失是磷流失重要组成部分。由于磷的产生及输移主要集中在土壤表层 0—5 cm 这一范围内<sup>[7]</sup>, 吸附在土壤胶体上的磷会跟随被侵蚀土壤进入水体, 这些磷污染物一部分依附在水中悬浮粒子(泥沙)表面成为固体营养盐进入湖泊水域, 加速了水体的富营养化, 成为直接污染源; 另一部分在扩散、净化过程中下沉到水体底部, 积累在河岸或湖泊底泥中, 当外界环境条件发生改变时, 底泥中的污染物会释放回水体, 加重水体的富营养化, 成为潜在污染源。因此, 对土壤侵蚀中吸附态磷流失的研究具有重要意义。

## 1 吸附态磷流失模型

模型是研究吸附态磷流失过程的主要分析手段。国外吸附态磷流失研究主要耦合于非点源污染模型, 早期模型以 1980 年由美国农业部研发的 CREAMS (chemicals runoff, and erosion from agricultural management systems)<sup>[8]</sup> 模型为代表, 其它较著名的模型如 SWAT (soil and water assessment tool), SWIM (soil and water integrated model), EPIC (erosion productivity impact calculation) 等。在吸附态磷流失模拟过程中, 使用的方程均与 CREAMS 中大同小异, 只是在某些参数方面进行了改进。CREAMS 模型是综合模拟水文、侵蚀和农业面源污染的集总式模型, 既可以模拟场次降雨的土壤侵蚀, 又可以模拟长期(2~50 a)的土壤侵蚀过程。它由水文模块、土壤侵蚀与运移模块、作物养分模块和农药运移模块 4 个子模块组成, 其中土壤侵蚀量的计算采用应用最为广泛的 USLE (universal soil loss equation) 方程, 但增加了坡面流的泥沙输移能力。吸附态磷流失的模拟基于模型<sup>[9]</sup>, 方程如下:

$$Y_p = 0.001Y C_p E_r \quad (1)$$

式中:  $Y_p$  ——径流中吸附态磷的流失量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $Y$  ——土壤侵蚀量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $C_p$  ——表层土壤中磷浓度 ( $\text{g}/\text{t}$ );  $E_r$  ——磷的富集系数, 是泥沙中磷浓度与土壤中磷浓度的比值。估算磷的富集系数的对数方程如下:

$$E_r = x_1 C_s^{x_2} \quad (2)$$

式中:  $C_s$  ——泥沙浓度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $x_1$  和  $x_2$  ——估算富集系数的上、下限参数, 采用下式估计:

$$x_2 = -\lg\left\{\frac{1}{D_R}\right\}/2.699 \quad (3)$$

$$x_1 = \frac{1}{(0.1)^{x_2}} \quad (4)$$

式中:  $D_R$  ——泥沙传输速率, 是泥沙产量与总面蚀量之比。

## 2 吸附态磷监测实验

流域监测和标准小区监测是研究吸附态磷的重要手段。在小流域监测实验研究方面, Markku 等人<sup>[10]</sup>对芬兰 Savijoki 和 Hovi 两个流域的土壤侵蚀与吸附态磷的流失进行了 10 a 的监测。结果表明, 季节与降水是农田土壤侵蚀中吸附态磷流失最主要的影响因子。春秋季无植被期和冬季, 均为土壤侵蚀中吸附态磷流失的关键期。秋季作物收割后, 在一次降雨中, 因为地表的裸露与土壤中高浓度吸附态磷的累积, 产生的土壤侵蚀及吸附态磷流失数倍于夏季的一次降雨。春季播种前, 冬季的融雪产生地表径流, 产生的土壤侵蚀及吸附态磷流失同样不可忽视。春秋季无植被期产生的土壤侵蚀与吸附态磷流失量甚至高于夏季的流失量。降水较多的年份, 土壤侵蚀与吸附态磷流失量多, 保持植被覆盖的天然状况, 土壤侵蚀与吸附态磷流失量小于人为耕作状况。流域尺度与田间尺度的土壤侵蚀与吸附态磷流失量趋势相同, 但关系复杂。因为流域尺度的土壤侵蚀与吸附态磷流失受到土地利用方式、产汇流、泥沙输移等多方面因素的相互制约影响, 其计算结果往往与简单的田间尺度累加差别很大。分析认为, 未来的气候变化趋势决定了地表无植被覆盖期降水量与年降水量的多少, 决定了未来土壤侵蚀与吸附态磷的流失趋势。

在标准小区监测方面, Withers 等人<sup>[11]</sup>在英国建立了 3 种类型的标准小区, 分别是坡度为  $8^\circ$  的石灰土, 坡度为  $5^\circ$  的绿砂土, 坡度为  $1^\circ$  的黏土, 实行不同耕作方式与管理措施, 对土壤侵蚀与吸附态磷流失进行了 2 a 的监测。结果表明, 土壤侵蚀与吸附态磷流失受到天气、土壤自身性质、管理措施等因素的影响, 地表覆盖度、土壤紧密度和排水方向分别为石灰土、绿砂土和黏土的敏感影响因子; 浅耕(0—5 cm)较常规耕作(20—25 cm)更能降低土壤侵蚀与吸附态磷流失量。

## 3 我国吸附态磷研究现状

在我国开展的有关吸附态磷的研究中, 杨胜天等<sup>[12]</sup>应用 USLE 方程, 根据我国土壤水力侵蚀分类分级标准, 建立了大尺度区域土壤侵蚀量的估算模型, 见公式(5):

$$A_i = \frac{R_{\text{USLE}, i}}{R_{\text{USLE}, \text{avg}}} \times A_{\text{grade}, i} \quad (5)$$

式中:  $A_i$  ——第  $i$  年的土壤侵蚀量 ( $\text{t}$ );  $R_{\text{USLE}, i}$  ——第

$i$  年的降雨侵蚀力;  $R_{USLE, avg}$  ——多年平均降雨侵蚀力;  $A_{grade, i}$  ——下垫面因子。

基于 GIS 技术平台, 利用土壤普查数据, 构建了全国表层土壤磷含量数据库, 应用遥感 ENV I 软件的空间分析和运算功能, 完成数据输入、空间运算和结果输出, 完成了 2000 年全国吸附态磷流失估算空间分布图。结果表明伴随土壤侵蚀的吸附态磷流失达到  $3.465 \times 10^5$  t, 主要来自于长江流域、珠江流域、淮河流域、黄河流域和东南诸河区。刘腊美等<sup>[13]</sup> 在三峡水库上游流域从影响土壤流失年际变化的水文条件和人类活动两个方面修正了 USLE 方程, 以公式(6) 计算吸附态磷流失的富集系数。

$$E_r = 7.4 \times Y \times T_f \quad (6)$$

式中:  $T_f$  ——土壤质地校正因子, 沙土为 0.85, 粉土为 1.0, 黏土为 1.15, 泥炭土为 1.50。在 GIS 支持下, 对 1990—2006 年间吸附态磷流失进行了模拟。结果表明金沙江中下游流域, 雅砻江中下游流域和岷江的大渡河流域是吸附态磷流失的主要源区, 嘉陵江流域通过治理水土流失和吸附态磷流失情况明显好转;“长治”工程后, 三峡水库上游流域的吸附态磷年负荷总体上有下降趋势, 近 5 a 的年均负荷为 16 482 t/a, 比治理初期的 1990 年减少约 37%。

薛金凤等<sup>[14]</sup> 在妫水河流域官厅水库周围进行了野外人工降雨试验, 并以公式(1) 为基础, 采用泥沙中总磷百分含量与土壤中总磷百分含量之比修正了吸附态磷流失的富集系数。结合妫水河流域的土壤图、土地利用图及数字高程模型, 得到妫水河流域吸附态磷污染负荷的空间分布。结果表明泥沙总磷与土壤总磷比值的对数与产生率的对数具有很好的相关性, 平均相关系数达到 0.977 2, 土壤侵蚀与吸附态磷流失主要来自地表植被覆盖差的丘陵和山地。

黄云凤等<sup>[15]</sup> 在九龙江流域内选取 4 种不同土地利用方式的典型小流域为实验区, 大于 15 mm 的天然降雨时, 在每个实验小流域出口采集水样, 同时监测径流量。结果表明 4 个实验小流域降雨径流中悬浮泥沙、吸附态磷的流失依次为: 坡地果园 > 水稻田 > 半人工果林 > 天然次生林; 典型小流域降雨径流流失的悬浮泥沙量、吸附态磷流失量与植被覆盖度和降雨量成反比; 磷的流失形态主要为吸附于土壤颗粒上的形态发生。

## 4 存在问题及展望

综上所述, 国内外通过土壤侵蚀研究磷流失的方法通常有两种, 一种是模型研究, 即使用较成熟的模型计算土壤侵蚀量, 再由磷的富集系数计算磷的流失

量; 另一种是实验研究, 即依据不同土壤侵蚀影响因素, 设计建立标准小区, 监测天然降雨或人工降雨期间, 伴随土壤侵蚀产生的磷流失量。

总体上看, 国外土壤侵蚀中吸附态磷流失研究开展多年, 模型与实验方法都较为成熟, 并取得了一些成果。但土壤侵蚀中吸附态磷流失产生输移过程复杂, 影响因子众多, 且存在一定的不确定性, 如何进一步构建普适性模型还需开展更多的基础性研究。

从目前我国的研究现状分析, 国内土壤侵蚀中吸附态磷流失研究还不能满足实践应用的要求。首先, 在土壤侵蚀中吸附态磷流失模型研究方面, 国内独立构建开发的模型较少, 部分模型仅在少数研究区进行过验证, 还不能在全国推广应用, 大量的研究是直接使用国外模型; 其次, 国外模型在构建时, 基于大量的实验数据和复杂的机理, 对某一参数的理解偏差可能产生难以控制的结果, 且国外模型运行时基于大量的后台数据库, 国内在土壤侵蚀中吸附态磷流失相关研究不足, 监测资料缺乏, 因此如何科学地应用好国外模型仍是亟待解决的问题。

在实验研究方面, 国内因实验数量开展不足, 地理条件复杂, 造成吸附态磷流失的监测点过少, 不能满足生产实践的要求; 同时, 实验监测规范还有待进一步加强, 对土壤侵蚀中吸附态磷流失有较大影响的因子如季节因子、水保措施因子等触及较少, 而且大部分研究仍停留在简单的观测资料分析阶段, 有关实验数据与模型的关系, 误差的产生等深层次探讨较少; 再者, 研究缺乏连续性, 土壤侵蚀中吸附态磷流失是一个长期复杂的过程, 国内多年连续监测甚少, 难以准确把握土壤侵蚀与吸附态磷流失的规律。

由此看来, 开展土壤侵蚀中吸附态磷流失的研究, 还有大量艰巨的工作需要开展, 重点在于解决实验监测和模型计算两个方面问题。总之, 增加实验数量, 加强实验深度, 坚持连续监测, 解析机理是研究土壤侵蚀中吸附态磷流失的重要基础; 构建适合国情的模型, 完善基础信息数据库, 拓展国外模型在国内的适用性是研究我国土壤侵蚀中吸附态磷流失的主要途径。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Zhang W, Wang X J. Modeling for point-non-point source effluent trading: perspective of non-point regulation in China[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 292: 167-176.
- [ 2 ] 高超, 张桃林. 欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J]. 农村生态环境, 1999, 15(2): 50-53.
- [ 3 ] 单艳红, 杨林章, 王建国. 土壤磷素流失的途径、环境影

- 响及对策[J]. 土壤, 2004, 36(6): 602-608.
- [4] Tadano T, SAKAI H. Secretion of acid phosphates by the roots of several crop species under phosphorus-deficient conditions [J]. Soil Sci Plant Nutr, 1991, 37(1): 129-140.
- [5] 周利. 农业非点源污染迁移转化机理及规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [6] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 7-12.
- [7] Ohlsson A E, Smith S J, Rhoades E D, et al. Nutrient and sediment discharges from agricultural watersheds in Oklahoma [J]. J. Environ Qual., 1975, 4: 331-336.
- [8] Muller S, Gregory J. Groundwater loading effects of agricultural management systems, version 3.0 [R]. Department of Agriculture and Biological Engineering, University of Florida, USA, 2003: 1-28.
- [9] Knisel W G. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems [R]. U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26, 1980.
- [10] Markku Puustinen, Sirkka Tattari, Jari Koskiahio, et al. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 93(2007): 44-55.
- [11] Withers P J A, Hodgkinson R A, Bates A, et al. Soil cultivation effects on sediment and phosphorus mobilization in surface runoff from three contrasting soil types in England [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 93: 438-451.
- [12] 杨胜天, 程红光, 步青松. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 366-374.
- [13] 刘腊美, 龙天渝, 李崇明. 三峡水库上游流域非点源颗粒态磷污染负荷研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 320-325.
- [14] 薛金凤, 夏军, 梁涛, 等. 颗粒态氮磷负荷模型研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 334-337.
- [15] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 735-739.

(上接第233页)

[ 参 考 文 献 ]

- [1] 史培军, 王静爱, 冯文利, 等. 中国土地利用/覆盖变化的生态环境安全响应与调控 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 111-1119.
- [2] 陈海, 梁小英, 高海东, 等. Multi-Agent System 模型在土地利用/覆盖变化中的研究进展 [J]. 自然资源学报, 2008, 22(1): 1-8.
- [3] 高志强, 刘纪远. 1980—2000年中国LUCC对气候变化的响应 [J]. 地理学报, 2006, 61(8): 865-872.
- [4] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应 [J]. 生态学报, 2007, 27(2): 414-423.
- [5] 王晓峰, 任志远. 近14年榆林北六县土地利用变化及驱动力分析 [J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 201-207.
- [6] 胥彦玲, 刘康, 秦耀民, 等. 秦岭地区近20年来土地利用/土地覆盖变化及分析 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 144-148.
- [7] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径 [J]. 地理研究, 2001, 20(6): 645-652.
- [8] 李秀彬. 土地利用变化的解释 [J]. 地理科学进展, 2002, 21(3): 196-203.
- [9] 摆万奇, 柏书琴. 土地利用和覆盖变化在全球变化研究中的地位与作用 [J]. 地域研究与开发, 1999, 18(4): 13-16.
- [10] 吴文斌, 杨鹏, 柴崎亮介, 等. 基于Agent的土地利用/土地覆盖变化模型的研究进展 [J]. 地理科学, 2007, 27(4): 573-578.
- [11] 宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954年以来三江平原土地利用变化及驱动力 [J]. 地理学报, 2008, 63(1): 94-104.
- [12] 吴桂平, 曾永年, 邹滨, 等. AutoLogistic 方法在土地利用格局模拟中的应用: 以张家界市永定区为例 [J]. 地理学报, 2008, 63(2): 156-164.
- [13] 张有全, 宫辉力, 赵文吉, 等. 北京市1990年—2000年土地利用变化机制分析 [J]. 资源科学, 2007, 29(3): 206-213.
- [14] 江晓波, 马泽忠, 曾文蓉, 等. 三峡地区土地利用/土地覆被变化及其驱动力分析 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 108-112.
- [15] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析 [J]. 地理学报, 2000, 55(2): 151-160.
- [16] 陈佑启, Verburg P H. 中国土地利用/土地覆盖的多尺度空间分布特征分析 [J]. 地理科学, 2000, 20(3): 197-202.
- [17] 林目轩, 师迎春, 陈秧分, 等. 长沙市区建设用地扩张的时空特征 [J]. 地理研究, 2007, 26(2): 265-274.
- [18] 李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 等. 基于RS和GIS的西双版纳土地覆被动态变化 [J]. 山地学报, 2007, 25(3): 280-289.
- [19] 杨君, 关欣, 李香云, 等. 近10年塔里木河流域土地利用/土地覆被变化与人口因素关系研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 114-117.
- [20] 李秀彬. 中国近20年来耕地面积的变化及其政策启示 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 329-333.
- [21] 宋乃平, 张凤荣. 鄂尔多斯农牧交错土地利用格局的演变与机理 [J]. 地理学报, 2007, 62(12): 1299-1308.