

小流域土壤养分流失机理与土地覆盖格局演变

胡 婧¹, 丛 伟², 闫 锋², 张兴昌²

(1. 杨凌职业技术学院; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 小流域土壤养分流失与土地利用格局演变关系的研究作为陆地- 大气相互作用、全球变化等研究的主要基础内容, 是一个正在形成的、具有综合性和交叉性的学科生长点。论述了该项研究的重要性、小流域土壤养分流失机理与土地覆盖格局演变的关系、小流域土壤养分流失模型和今后的研究展望, 以期推动土壤环境科学的发展。

关键词: 小流域; 土壤养分流失机理; 土地覆盖格局演变

中图分类号: S153.6; S153.621

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)06-0218-04

Mechanism of Soil Nutrient Loss by Erosion and Land Covering Pattern Succession

HU Jing¹, CONG Wei², YAN Feng², ZHANG Xing-chang²

(1. Yangling Vocational and Technical College;

2. College of Resource and Environment, Northwest Sci-tech University of
Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The research on mechanism of soil nutrient loss by erosion and land covering pattern succession has been regarded mostly as a base research content of the globe change, and the reciprocity of matter and energy between the terrene and atmosphere, which will produce a new research subject with integration and interconnection crossover. The essentiality of this research, the relationship of soil nutrient loss mechanism by erosion and land covering pattern succession, the model of soil nutrient loss by erosion in little catchment and future research expectation in this research were illustrated for promoting the soil environment science to develop.

Key words: small catchment; the mechanism of soil nutrient loss by erosion; land covering pattern succession

小流域土壤侵蚀环境养分流失与土地利用格局演变的关系的研究, 已成为世界各国普遍关注的重大科学问题之一。许多国际研究计划对此问题均给予足够的重视, 将流域生态系统中的物质运移过程、物质循环和能量转换等问题作为陆地- 大气相互作用、全球变化等研究的主要基础内容。将流域生态系统中养分迁移、流失和有效利用与土地覆盖格局演变有机结合起来进行研究, 是一个正在形成的、具有综合性和交叉性的学科生长点, 也是一项具有广阔应用前景的基础性工作。它涉及到流域生态系统中以水分为载体的养分迁移、以水分为介质的土壤养分吸收和转化; 土壤学、植物学、流域生态学和环境科学研究中薄弱的环节- 小流域土壤养分流失与土地覆盖格局演变关系; 是土壤学、植物学、水文学、生态学、自然地理学、环境科学等多种学科领域所面临的交叉领域, 具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

黄土高原生态环境建设的关键问题在于解决好水土资源的持续利用和保护。土壤退化、水资源短缺和利用效率过低是造成农业生产力低下的主要原因, 严重的水土流失和频繁的干旱灾害以及不合理的土地利用则是该区生态环境和

国土整治所面临的重大问题。因此, 开展流域土壤侵蚀环境养分流失与土地覆盖格局演变的关系研究, 有利于合理利用水土资源, 对西部地区坡面植被恢复与重建, 防治水土流失和土壤退化, 促进农业生产持续发展和加速区域环境整治, 实施国家生态环境建设规划尤其是退耕还林(草), 具有重要的指导意义。

1 小流域土壤养分流失与非点源污染

黄土高原坡面面积约占总耕地面积的70%, 坡耕地土壤侵蚀占总侵蚀量的50%~60%, 小流域土壤流失是黄河泥沙的主要来源。黄河泥沙的淤积不仅加速了断流, 而且对黄河流域的安全构成了极大威胁。而土壤侵蚀- 养分流失- 土地生产力下降- 人为开垦- 环境恶化互为因果, 相互影响。事实上, 降水既是土壤侵蚀的主要动力, 又是植被生长的水分来源, 流域的传统耕作方式加剧了土壤侵蚀, 土壤侵蚀导致的水分养分流失直接降低坡面生产力, 生产力的下降引发新的陡坡开垦, 从而造成新的人为加速侵蚀和环境恶化。

* 收稿日期: 2005-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371076)

作者简介: 胡婧(1984-), 女, 主要从事土壤学方面的研究工作; 通信作者: 张兴昌(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事环境研究与工程方面的教学研究工作, 已发表科研论文80多篇。

2 小流域土壤养分流失机理与土地覆盖格局演变的关系

以景观生态学原理为指导,对景观格局进行调整和合理布局以提高系统的稳定性和改善其整体功能是景观规划的主要目的之一。以景观生态学原理为指导,对景观要素的数量、比例及时空配置进行有效的规划和管理,使景观中资源组合在结构和功能上接近或达到最优化,提高景观的稳定性,可以实现对非点源污染的有效控制。景观格局变化对养分等非点源污染物发生、迁移和转化的影响主要表现在土地利用和土地覆被的变化引起生态系统物质和能量流动过程的变化。与自然景观相比,人工景观的有序度高而稳定性较低,必需人为地输入大量负熵。通过优化景观格局,在农田人工系统为基质的景观中增加自然斑块和廊道,可提高人工景观的稳定性和自我调节能力,从而使生态系统的抗逆能力和内部物质循环增强,负熵输入(如农田生态系统的化肥、农药等)可大大减少。非点源污染的产生和迁移与降雨—产流过程密切相关,降雨及随之形成的地表和地下径流是非点源污染物产生的主要动力,水土流失是污染物迁移的主要载体。由于土地利用方式和人类活动强度的差异,不同类型景观中产生和输出的非点源污染负荷有着很大的差别。

流域农业生态系统中养分流失及其过程的研究一直是国际上流域生态研究的热点,受到国际上一些研究组织普遍关注。如国际水文计划(IHP)、国际地圈—生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、全球水量与能量平衡研究计划(GEWEX)等对此问题给与足够的重视,自从IGBP提出其生物圈水循环态势的核心项目研究以来,90年代起欧美各国即把生态系统中水分传输的研究作为国家关注的研究重点。英国制定了全球生态环境研究的陆地计划(TIGER),在该计划中把生态系统物质运移作为主要研究项目,德国陆地生态系统研究网络(TERN)也相应制定了农业非污染点源防治研究项目,主要研究和发展农业非点源污染模型,并将水分养分传输模式和区域模式用于评价全球变化对水分养分与能量收支的影响^[10, 13~15]。

与小流域非点源污染相伴生的土壤养分流失是河流水质污染的重要源泉。在美国目前约有60%的河流和50%的湖泊污染与非点源污染有关,其中农业非点源污染贡献了73%的生物化学耗氧物质,99%的可溶性固体物质,83%的氮和98%的细菌携带物质,1995年美国国家环保局用于控制非点源污染的财政拨款达3.7亿美元^[32]。在我国,非点源污染问题也日趋严重,在黄河流域,非点源污染已成为水质恶化的主要原因之一,其中延河流域水体中的硝态氮已超过10 mg/kg,可溶性磷达到8~10 mg/kg^[19]。据推算,我国丘陵山区每年约流失数十亿t表土,按每年流失0.5~2.0 cm厚度计算,每1 km²流失8~15 t氮,15~40 t磷,200~300 t钾^[18]。输入到地下水层和滞留在河流、湖泊和海洋水体中的硝态氮,严重危害人类的健康,人体摄入后,血液中高铁血红蛋白增高,限制氧气的运载,也可生成致癌的N—亚硝酸胺和次生胺物质^[41],尤其当缺乏维生素C之类抑制剂时,在人体可诱导致变、致畸物质。水体中高含量的氮素也往往造成藻类和水生植物的增殖,水底氧气的耗竭及水体透明度的降低^[42],这些不良效果会影响以水体为栖生的鱼类生存。随着点源污染的治理与控制,非点来源的磷素逐渐受到研究者的重视^[43]。土壤侵蚀与农业径流是一种主要的非点源污染形式。农业径流不仅直接向接纳水体输送水溶性养分,同时由

于泥沙对养分的富积作用,当径流所携带的泥沙在水体底部沉积后,泥沙结合态(颗粒态)养分还会以不同的速率逐渐向水体释放,转化为生物有效养分,因此农业径流所携带的泥沙对水体富营养化构成潜在危险。含磷水平较高的土壤是农业径流中磷素的主要来源,而且土壤表层的含磷水平与径流中的磷素含量呈直线相关。

因此,农业生态系统侵蚀环境中养分流失受到人们的广泛关注,小流域土壤侵蚀规律和非点源污染控制机理等方面的研究成果不胜枚举。在我国,土壤侵蚀机理的研究成果层出不穷^[1, 6~8, 12, 17~18],如:史培军^[2]研究了土壤侵蚀过程模型,史德明^[4]应用遥感技术对土壤侵蚀动态进行了长期监测,符素华和刘宝元^[9]对国内外土壤侵蚀量预报模型进行了系统评价,李勇^[11]研究了黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的空间格局。我国小流域土壤养分流失机理研究起步较晚,尚处于探索阶段,与国外研究相比还有较大差距。如:孟庆华和傅伯杰^[13]根据Habit- food- resource范式,研究土壤养分流动与景观格局之间的关系,认为土壤侵蚀是山区和丘陵地区影响景观格局和土壤养分流失的重要过程之一,并采用SCS范式,评价了黄土高原地区景观格局与土壤养分流动的关系;李俊然等^[20]利用地理信息系统研究了小流域不同土地利用结构与地表水质的关系,结果表明:在单一土地利用类型为主控制的流域中,林地和草地控制的小流域地表水质明显优于以耕地为主的小流域,随着耕地比例的升高,非点源污染有逐渐增大趋势;蔡崇法等^[18]建立了可与GIS相结合的侵蚀泥沙携带养分量的预测模式;张兴昌等^[19]研究了流域土地利用结构对土壤养分流失的影响,从洪流泥沙富集模型入手,建立了流域土壤氮素流失的统计模型。

影响土壤侵蚀的因素主要有土壤、地貌、植被、气候和人为活动,这些因素也显著地影响土壤养分流失,在流域范围内,除这些因素外,土地覆盖格局也对流域土壤养分流失产生重要的影响^[34]。不同的土地覆盖格局可加剧或减少土壤养分流失,土地覆盖格局改变了土壤养分的环境条件—土壤微气候、植物根系分布、土壤结构、养分的有效性和表层土壤养分的分布等^[30],由于土壤养分环境条件的改变,使土壤养分流失的载体—水土流失携带养分的能力发生变化,这种能力的改变必然影响流域土壤养分的流失^[33]。从所检索的文献来看,土地覆盖格局演变与土壤养分流失的关系研究目前仅限于定性评价阶段,利用流域土壤养分流失模型进行土壤养分流失与植被格局演变关系研究的尚处于探索阶段。

3 小流域土壤养分流失模型

在研究农业径流中养分流失机理的同时,模型的建立也同时开展。早于1977年,Haith首先基于统计分析,建立了污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计模型^[44]。自70年代中后期以来,随着对非点源污染物理化学过程研究的深入和对非点源过程的监测,机理模型逐渐成为非点源污染模型开发的主要方向,其中著名的有模拟城市暴雨径流污染的SWMW和STORM,模拟农业污染的ARM,以及流域模型ANSWERS和HSP等^[16]。美国农业部农业研究所开发的CREAMS模型^[32]奠定了非点源污染模型发展的“里程碑”,它首次对非点源污染的水文、侵蚀和污染物的迁移过程进行系统的综合。在此基础上发展了一系列结构类似的模型,如农田小区模型EPIC^[45],用于模拟农业活动对地下水影响的GLEAMS^[22],用于模拟大型流域非点源污染负荷的SWARRB^[46]和SWAT^[21]。这些非点源污染模型的结构主要

有两部分组成: 水文模型和土壤侵蚀模型。由于应用的目的不同, 实际上非点源污染模型的结构更为复杂, 一般涉及到水质模拟、气候模拟、作物生长模拟和管理控制费用等方面的子模型。

一般而言, 应用土壤侵蚀学和水文学原理来建立农业非点源污染模型较为普遍。Donigian^[38]模拟了径流传递过程, 建立了非点源污染模型(NPS), 该模型由三个相互独立子模型组成, 即: 污染物累积模型、污染物产生模型和污染物在径流过程中与土壤相互作用模型。在NPS模型的基础上, Donigian^[34~37]对其进行修正, 建立了适合农业土壤养分径流流失模型(ARM), 该模型不仅能从侵蚀角度模拟降雨侵蚀过程, 而且能模拟养分在径流作用下迁移、扩散、释放过程, ARM模型由5个相互联系的子模型构成, 即: 水分模型(LANDS)、泥沙产生模型(SED T)、养分吸收和迁移模型(ABSTR)、土壤退化模型(DEGRAD)和养分传输模型(NU TRNT)。Young^[39~40]以流域为研究单元建立AGNPS模型, 该模型主要用于研究和预测次降雨过程中径流量、侵蚀和传递的泥沙、径流液中有效N和P的浓度、泥沙中NP的含量, AGNPS模型主要包括三个子模型(水分模型、侵蚀泥沙传输模型和土壤NP输运模型)。

因没有考虑农业流域植被对土壤营养元素的吸收和富集, 根据土壤侵蚀学和水文学原理所建立非点源污染模型, 预测短时间序列内流域土壤养分流失具有较高的准确性, 而对长时间序列预测由于缺乏足够的理论基础, 模型的应用受到了极大的限制^[24]。Bouraoui等人^[30]在充分考虑植物吸收营养元素的基础上, 于2000年建立了小流域非点源污染模型ANSWERS2000。ANSWERS2000模型是一个分散型流域物理模型, 其最初版本是ANSWERS模型^[30]。ANSWERS是一种基于场次的分散型流域模型, 在土壤侵蚀研究中广泛应用于BMPs对流域泥沙及水文过程的影响评价。此后, 模型引入地表入渗、蒸发散模拟模块、植物养分吸收模块和养分

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 郭旭东, 陈利顶, 等. 土地利用变化与土壤养分的变化—以河北省遵化县为例[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 926-931.
- [2] 史培军, 刘宝元, 张科利, 等. 土壤侵蚀过程与模型研究[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 9-19.
- [3] 孟庆华, 傅伯杰. 景观格局与土壤养分流动[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 116-121.
- [4] 史德明, 石晓日, 李德成. 应用遥感技术监测土壤侵蚀动态的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 48-56.
- [5] 王礼先, 刘霞. 生态环境建设的区域配置[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 45-49.
- [6] 关君蔚. 中国水土保持学科体系及其展望[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6):
- [7] 周华锋, 傅伯杰. 景观生态结构与生物多样性保护[J]. 地理科学, 1998, 18(5): 472-478.
- [8] 王根绪, 郭晓寅, 程国栋. 黄河源区景观格局与生态功能的动态变化[J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1587-1598.
- [9] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 78-84.
- [10] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 李勇, 张建辉, 杨俊诚, 等. 陕北黄土高原陡坡耕地土壤侵蚀变异的空间格局[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 1-6.
- [12] 杨艳生, 刘柏根, 丁根生, 等. 南方水土流失区开发治理的思路[J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(1): 32-37.
- [13] 沈振荣. 水资源科学试验与研究-大气水、地表水、土壤水、地下水相互转化关系[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [14] 李保国, 龚元石, 左强. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [16] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
- [17] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1033-1036.
- [18] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. GIS支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 9-12.

流失模块, 使模型可模拟连续的降雨侵蚀过程, 也可用来预测流域范围内非点源污染。ANSWERS2000模型的结构化程度较高, 主要包括泥沙模块、径流和入渗子模块、土壤养分传输子模块和养分循环子模块。其中径流和入渗子模块以Gree-Ampt入渗方程代替了原方程中的Holtan方程进行计算; 泥沙模块中, 产沙计算采用了WEPP模型^[25]中的土壤可蚀性指标以及单位水流动力理论和临界切应力原理; 输沙过程计算把Foster和Meyer方法引入Yalin公式, 并以此建立了泥沙输移模块; 土壤养分传输子模块主要采用了GLEAMS模型; 而植物养分循环子模块主要采用了GLEAMS^[31]和EPIC^[33]模型中的运算方法。

ANSWERS2000模型中泥沙径流子模型的坡度参数适宜范围小于15[°], 而黄土丘陵区坡度较大, 15~35°坡地占土地面积50%左右, 因而, 模型在黄土丘陵区的应用会因坡度参数限制而失去价值。因此, 有必要对ANSWERS2000模型的参数进行修正。

4 研究展望

(1) 土地覆盖格局演变与土壤养分流失关系的研究目前仅限于定性评价阶段, 利用流域土壤养分流失模型进行土壤养分流失与植被格局演变关系的研究尚处于探索阶段。

(2) 流域内土地覆盖格局的变化会对水土流失产生显著的影响, 与水土流失相伴生的土壤养分流失必然与土地覆盖格局变化有关, 从长时间序列出发, 研究土地利用格局演变与养分流失的关系, 对黄土区确定合理的土地利用格局乃至植被恢复重建提供重要的理论依据。

(3) 尽管ANSWERS2000模型考虑了农业流域植被对土壤营养元素的吸收和富集, 其径流泥沙子模型坡度参数适宜范围有限, 且对长时间序列预测缺乏足够的理论基础, 该模型在黄土区应用受到了极大的限制。

- [19] 张兴昌, 邵明安. 小流域土壤氮素流失规律研究[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 617- 626
- [20] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506- 510
- [21] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiach T S. Large area hydrologic modeling assessment part II: Model application [J]. JAWAR, 1998, 43(1): 91- 101.
- [22] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAM S: Ground-water loading effects of agricultural management systems[J]. Trans ASA E, 1987, 30(5): 1403- 1418
- [23] Reginato R J. Irrigation Scheduling and Plant Water in U S A [A]. Presentation at the International Congress of Agro meteorology[C]. Cesera, Italy, 1987. 10
- [24] Nobel P K. Physiochemical and Environmental Plant Physiology[M]. New York: Academic Press Inc., 1991. 635
- [25] Huang C H, Joe M B, Bradford, John M L, afen. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1996, 57(2): 457- 461.
- [26] Jaynes D B, M Shao. Evaluation of a simple technique for estimating two-domain transport parameters[J]. Soil Science, 1999, 164(2): 82- 91.
- [27] John M L, afen, Leonard J L, ane, George R, Foster A. new generation of erosion prediction technology (WEPP) [J]. J. Soil and Water Conservation, 1991, 56(1): 12- 19.
- [28] Novotny V. A review of hydrologic and water quality models used for simulating agricultural pollution [A]. In: Agricultural nonpoint source pollution, model selection and application [M]. A Giorgini, F Zingales (Eds.) Dev. Environ. Model 10, Elsevier, 1999. 9- 35.
- [29] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS- 2000: Runoff and sediment transport model[J]. J. Environ. Engng., ASCE, 1996, 122(6): 493- 502.
- [30] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS2000: Non-point-source nutrient planning model[J]. J. Environ. Engng., ASCE, 2000, 122(11): 1045- 1055.
- [31] Knisel W G, Leonard R A, Davis F M. The GLEAM S model plant nutrient component, Part I: model documentation [R]. U. S. Dept. of Agr., Agricultural Research Service, Coastal Plain Experiment Station, Southeast Research Laboratory, Tifton, Ga, 1994.
- [32] USDA. CREAM S, A field scale model for chemical s, runoff, and erosion from agricultural management systems [R]. Conservation Research Report No. 26. Washington D. C: USDA, 1980. 643.
- [33] Sharpley A N, Williams J R. EPIC—erosion/productivity impact calculator: I. Model documentation [R]. USDA tech. Bull. No. 1786, Washington D. C: U. S. Government Printing Office, 1990.
- [34] Donigan A S. Agricultural runoff management (ARM) model Version II: Refinement and testing [R]. EPA 600/3- 77- 098. Washington, D. C: U S Gov. Print Office, 2000.
- [35] Donigan A S & Grawford N H. Modeling non-point pollution from the land surface [R]. EPA - 600/3- 76- 083. EPA Technological Service, Athens, GA: U S Environmental Protection Agency, 1999.
- [36] Donigan A S, Grawford N H. Modeling pesticides and nutrients on agricultural lands [R]. Report No. EPA - 600/2- 76- 043, Athens, GA: U S Environmental Protection Agency, 1999.
- [37] Donigan A S & Grawford N H, 1999. Simulation of agricultural runoff [R]. In: Proc. Of the EPA Conference on Environmental Modeling and Simulation, OH, 19- 22. EPA - 600/9- 76- 016. U S Environmental Protection Agency, 1975. 151- 156.
- [38] Donigan A S. Simulation of nutrient loading in surface runoff with the NPS model [R]. EPA - 660/3- 77- 065. Athens, GA: U S Environmental Protection Agency, 1977.
- [39] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. Agricultural nonpoint source pollution models (AGNPS) I & II Model documentation [R]. Minnesota Pollution Control Agency, St. Paul, MI, and Agricultural Research Service, Washington, D. C: U S Department of Agriculture, 2000.
- [40] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS, Agricultural nonpoint pollution. A watershed analysis tool [R]. Conservation Research Report 35. Washington, D. C: U S Department of Agriculture, 1987.
- [41] Legg J O, Meisinger T. Soil nitrogen budgets [A]. In: Nitrogen in agricultural soils (Eds. F J Stevenson) [M]. Am. Soc. Of Agron. Madison, Wisconsin, 1992. 122: 503- 566.
- [42] Wu J J, Bernardo D J, Mapp H P, et al. An evaluation of nitrogen runoff and leaching potential in the High Plains [J]. J. Soil and Water Conserv., 1987, 52(1): 73- 80.
- [43] Sharpley A N. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments [J]. J. Environ. Qual., 1994, 9: 521- 526.
- [44] Haith D A. Land use and water quality in New York River [J]. J. Environ. Div., ASCE, 1976, 102(1): 1- 15.
- [45] Williams J R, Nicks A D, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. Trans ASA E, 1984, 27(1): 129- 144.
- [46] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in Rural Basins [J]. J. Hydraul. Eng., 1985, 111(6): 170- 196.