

小流域坡地表土层营养物质输运规律研究进展

李 勇,王 超,汤红亮

(河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 综合目前小流域坡地研究现状,论述小流域坡地营养物质随地表径流及壤中流迁移转化的机理以及降雨、坡度与坡长、溶质特性、下垫面、土壤特性和植被状况对营养物质迁移规律的影响。针对当前小流域坡地以及面源研究中存在的不足,指出加强坡地表土营养物质输运规律研究,不仅是土壤养分流失和土壤溶质运移研究的基础,也是水环境中面污染源控制研究的重要内容,建议加强研究以不同坡地为基本单元的流域管理模式,改变不同坡地的土壤施肥量和施肥技术及耕作制度,提高植物覆盖度,弥补目前流域面源控制和管理的不不足。

关键词 小流域;坡地;营养物质;运移

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1000-198X(2004)06-0627-05

大量调查研究^[1~5]发现,一定边界条件下的小型流域中面源污染负荷产生和输出由于受地貌因素(如坡地等)的影响而具有各自的特征。坡地表层土壤中营养物质的运移会对土壤肥力的下降和养分的流失以及地表水体富营养化产生重要的影响。国内外自 19 世纪晚期就开始观察和定性描述坡地表面侵蚀,到 20 世纪 80 年代由于对面源污染的普遍关注,开始重视坡地表层土壤中营养物质的迁移规律研究^[6~9]。阎伍玖等^[3]通过对巢湖流域塘西地区 11 种土地类型地表径流污染调查,发现坡地地表径流明显高于水稻田、农村道路和荒地等土地类型的营养负荷输出量。三峡上游地区坡耕地造成的水土流失比横耕地要高出 44.6%~79.9%,90% 以上的强度流失发生在坡耕地上^[4]。太湖地区丘陵坡地面积占流域面积的 25%,其硝态氮的淋溶量和颗粒态磷的流失量都比水田大得多。从面源污染发生和控制的角角度看,这部分地区尤其重要^[10]。

目前,在传输途径上进行的面源污染控制效果并不是很理想,将污染源控制在源区并促进其在系统内部循环是流域管理措施的关键。加强研究营养物质在源区的产生机制及其在流域坡地的传输过程日益受到关注^[8],这有利于增强小流域面源污染的控制和管理。

1 坡地表土层中营养物质运移机理

坡地营养物质(主要指 N 和 P)主要通过 4 种途径进入水体:(a)部分可溶性的营养物质随坡地地表径流向下坡流动;(b)坡面径流携带部分土壤细粒物质(吸附和含有大量养分)向坡下运动;(c)部分径流携带营养物质于竖直方向向下渗入土壤,或为植物根系截获,或在下层土壤中随壤中流运动,再分布;(d)部分土壤细粒物质向剖面下方淋洗、沉积,随地下水渗入河道和湖泊^[11,12]。

1.1 磷在坡地表土层中的运移

一般来说,作物对磷肥的利用率较低,通常情况下当季作物只有 5%~15%,加上后效一般也不超过 25%,占施肥总量 75%~90% 的磷滞留在土壤中^[13]。磷在土壤中易被固定,扩散移动性能极弱^[13]。磷的产生及输出主要集中在土壤表层 0~5 cm^[6,7,14],较难穿透较厚的土层。根据英国洛桑试验站 100 多年的研究^[13],磷在土壤中的移动每年不超过 0.1~0.5 mm,它只能从施肥点向外移动 1~3 cm 的距离。地表径流是流域坡地土壤磷输出的主要机理^[15],目前大多数研究者都假设流域坡地中磷的输出主要来自地表径流而不是壤中流。磷在坡地土壤中的迁移与转化主要表现为吸附过程和沉淀过程,在迁移的同时可溶态磷不断地转化为吸

附态磷和沉淀态磷,可溶态磷(W-P)和吸附态磷可以在酸性土壤中沉淀生成 Al-P 和 Fe-P,在碱性土壤中则很快地生成微沉淀态的 Ca₂-P, Ca₂-P 进一步生成较难溶的 Ca₈-P, Ca₈-P 继续沉淀生成沉淀态 Ca₁₀-P. 坡地携磷素流失的沉积物以 0.25 mm 以下的颗粒物为主,流失的磷中 80% 以上是颗粒态形式的磷,而颗粒态磷中 60% ~ 90% 随 0.1 mm 以下的颗粒物流失^[14]. 颗粒态磷主要与土壤颗粒和侵蚀的有机质结合,是许多坡地土壤中输出磷的主要组成部分(60% ~ 90%)^[6,7]. 从有植被覆盖或森林的坡地上随径流输出的磷则主要是可溶态磷.

1.2 氮在坡地表土层中的运移

氮素的作物利用率为 20% ~ 35%,有 5% ~ 10% 挥发到大气中,地下渗漏损失 10%,随降水径流和渗漏排出农田的氮素中有 20% ~ 25% 是当季施用的氮素化肥,大部分被土壤吸附^[8]. 各种形态的氮肥施入土壤后,在微生物作用下,伴随着矿化作用、硝化作用、反硝化作用、吸附作用和脱氮作用等生物化学作用以及非生物化学损耗等转化为各种形态的氮,最主要以氨氮和硝态氮形式存在. 坡地土壤氮素流失过程实际上是表层土壤氮素与降雨、径流相互作用的过程,氮素流失的多少主要受相互作用的限制^[16]. 这种相互作用主要表现为 (a) 表层土壤氮素在雨滴作用下,向雨水中释放或被雨滴溅蚀 (b) 表层土壤氮素特别是硝态氮随雨水在土壤入渗^[16]. 在相互作用的过程中,土壤溶液中的铵态氮和硝态氮向雨水中释放,吸附于土粒中的铵态氮也同时进行扩散,与土粒表面中的有机态氮结合随不同粒径的溅蚀而分离于土体^[8,17]. 由于土壤颗粒和土壤胶体对 NH_4^+ 具有很强的吸附作用,使得大部分的可交换态铵得以保存在土壤中^[8]. 当土壤对 NH_4^+ 吸附达到饱和时,在入渗水流的作用下 NH_4^+ 可能被淋洗出土体. 通过硝化作用形成的 NO_3^- -N,土壤胶体对其吸附甚微,易遭雨水或灌溉水淋洗而进入地下水或通过径流、侵蚀等汇入地表水^[8]. 坡地土壤氮素径流损失表现为两种形式:溶解于径流中的矿质氮随径流液流失,吸附于泥沙颗粒表面以无机态和有机质形式存在的氮素. 颗粒态的氮的流失远高于溶解态的氮,占总氮的 70% ~ 90%^[18].

2 坡地表土层中营养物质运移规律的影响因素

流域中坡地表层土壤营养物质的运移规律与降雨情况(降雨强度、降雨时间、降雨分布)、施肥状况(种类、时间、数量)、地形地貌特点、植被覆盖条件、土壤特性和人为管理措施等因素密切相关.

2.1 降雨因素对表土营养物质运移的影响

降雨强度对坡地养分流失的显著影响主要是通过影响坡面泥沙量进而影响其携带的养分含量. 傅涛等^[19]经过分析雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失影响得出,坡面泥沙所携带的养分流失量与雨强的回归关系为: $Y_{\text{TN}} = 0.74X + 0.241$, $Y_{\text{TP}} = 0.37X + 0.303$ (其中, X 为雨强, Y 为泥沙携带的养分含量). 这一回归关系也充分说明了上述观点. 陈欣等^[20]研究发现,土壤磷素的损失与降雨量和降雨强度呈显著正相关,其中降雨强度的相关系数略高于降雨量,说明降雨量和降雨强度是影响坡地径流量进而影响土壤磷素损失的直接因素,尤其是过程性的暴雨对土壤 P 素流失影响甚大. William 等^[21]对坡度范围为 3% ~ 17% 和 1% ~ 20% 的两个小流域的径流污染负荷进行研究时发现,流域中磷的流失主要有 3 种径流形式,即暴雨、高差引起的势能流和基本流,长期观察显示流域中 3 种径流分别占 10%、20% 和 70%,但是所携带的溶解态磷负荷却分别为 70%、20% 和 10%,可见暴雨期间磷的损失量占相当大的比重.

在雨强较大的情况下,养分流失主要以颗粒态的形式,雨强较小时,可溶态养分流失量占流失泥沙养分量的比例较高^[22~24]. 径流在坡面形成、汇集和传递,一方面与表层土壤发生作用,土壤矿质氮因径流浸提向径流扩散,土壤颗粒表面吸附的铵态氮因径流的冲洗作用而解吸;另一方面,随产流的形成,在径流沿坡面冲刷作用下,一些土壤颗粒被径流携带流出坡面,在这种方式中,与土壤颗粒结合的氮素主要是有机态氮因侵蚀而流失^[16]. 马琨等^[23]对红壤坡地养分流失特征试验研究表明:雨强较大时,土壤养分以泥沙形式随径流迁移,雨强较小时,随径流迁移的可溶态养分流失量占流失泥沙养分量的比例较高.

2.2 坡长对表土营养物质运移规律的影响

坡长通过影响坡地水土流失,进而影响坡地养分流失. 坡长对水土流失的影响主要表现为:一方面,坡长对降雨强度具有明显的响应,雨强影响着侵蚀随坡长而变化的趋势;另一方面,在由一定雨强而引起的超渗产流情况下,由坡面上部至下部沿程各断面的径流量不相等,从而引起坡面各部位的侵蚀方式和侵蚀程度不同^[25]. 王百群等^[25]通过黄土丘陵区坡地径流小区试验,研究了坡地地形因素中的坡长与土壤养分流失的关

系和土壤可溶性养分离子随径流而流失的状况。结果表明坡地土壤有机质及速效氮、磷、钾养分的流失强度与坡长呈指数函数关系($N_L = a_1 \exp(b_1 x)$, $a_1 > 0$, $b_1 > 0$), 养分流失强度随坡长的增加呈指数增加趋势。

2.3 坡度对表土营养物质运移规律的影响

坡度主要影响降雨入渗的时间, 进而对坡面产流特征产生明显的效应。在其他条件一定的情况下, 坡地土壤侵蚀量与坡度呈二次抛物线型关系^[26]。降雨开始后, 坡度越大, 坡面出现径流越快。在产流以后, 坡度与径流的速度有关, 从而影响坡面表层土壤颗粒起动、侵蚀方式和营养物质的流失。

王百群等^[25]通过黄土丘陵区坡地径流小区试验研究得出: 不同的坡度下, 有机质的流失强度与坡度呈明显的指数函数关系($N_S = a_2 \exp(b_2 x)$, $a_2 > 0$, $b_2 > 0$)。彭浩等^[27]通过不同坡度人工模拟冲刷实验得出, 径流流失的离子钾浓度随坡度的增大而增大, 土壤钾的流失量与坡度呈指数函数关系。刘秉正等^[28]指出养分流失总量随坡面坡度的增加呈幂指数增加, 在坡度小于 12° 时与坡度呈线性相关, 当坡度大于 12° 时则呈幂指数相关。张乃明等^[5]研究了人工降雨和自然降雨条件下坡度等因素对农田土壤径流中磷污染物输出浓度和输出总量的影响, 结果表明不同坡度土壤径流中总磷的浓度和输出量不同, 其中坡度为 18° 时径流中磷含量和输出量最高, 分别达到 0.138 mg/L 和 6.14 kg/hm^2 。随着坡度的增大, 径流中总磷浓度和输出量呈增大的趋势。坡度较小时 (6°), 雨水在土表停留时间较长, 径流中的磷素以溶解态为主, 而颗粒态较少, 坡度较大时 (24°) 却相反, 坡度适中 (18°) 时径流中颗粒态磷和溶解态磷都相对较高。

2.4 土壤特性对坡地表土营养物质运移规律的影响

土壤的质地、结构状况、孔隙度、水分和温度状况等, 直接影响土壤的氧化还原性和通气状况, 从而影响土壤水分运行规律以及土壤中养分的转化速率和存在状态。

坡地表土质地粗细不同, 导致表土的入渗系数也不同, 最终影响地表径流的产流速度和径流量。从不同质地土壤的模拟试验结果看, 径流中总磷的浓度变化趋势相同, 都表现为随着土壤质地变粗, 浓度逐渐降低^[29]。结构好的土壤, 不仅具有高的孔隙度, 而且还具有良好的透水性, 水分可以沿着大孔隙毫无阻碍地渗入土壤, 从而减少地表径流^[30]。土壤的密度、孔隙度和孔隙度大小的比例以及土壤的渗透性质影响着土壤的入渗速率和稳渗时间, 也影响侵蚀的初始产流时间和表层土壤养分的运移。

土壤含水量高有利于扩散作用的进行。在含水率高时, 土壤中充水毛管数量增加、孔隙加大, 故扩散加快, 扩散系数变大^[31]。黄丽等^[30]通过对 4 个试验小区的试验, 发现土壤初始含水量高会导致地表径流较早达到饱和状态, 而加大对地表的冲刷能力, 引起较大的土壤和养分流失。当雨强较大时, 表层土壤的饱和导水率越大, 水土流失量越小; 当雨强较小时, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 深土层的土壤饱和导水率越小, 水土流失量越大。硝态氮的运移就是在其浓度梯度和水势梯度的联合作用下进行的, 与土壤的含水量有密切的关系, 随着土壤水分含量的增加而成比例增加^[32]。

土壤养分的流失强度还与土壤的养分含量密切相关^[13, 25, 33]。随着土壤中含磷量的增加, 径流运移的颗粒态和溶解态磷也增加。Pote^[14], Sharpley 等^[31]在 Arkansas 和 Oklahoma 流域坡地中的研究发现, 径流中磷的含量与土壤表层 (5 cm) 磷含量呈明显正相关。

2.5 植被状况对坡地表土营养物质运移规律的影响

坡地的不同植被覆盖度对降雨引起的营养物质迁移转化产生重要的影响^[3]。植物的覆盖作用能够促进壤中流, 减缓表面流^[30]。植被覆盖度愈高, 水土流失愈少, 径流和养分流失量均减少。植物的枝叶可以减轻雨滴对土壤的打击和冲刷作用, 植物的根系则可以固结土壤颗粒^[30], 阻碍坡面径流, 减少养分流失^[14], 易于土壤内部的导流, 利于水分的下渗。因而, 有作物覆盖的土壤壤中流幅度明显高于表层裸露的土壤, 明显减缓了径流的输出过程。不同坡度条件下 (经 t 检验表明) 有作物种植条件土壤径流中总磷的浓度和输出负荷明显小于裸地条件^[5]。张洪江等^[34]对长江三峡地区不同林木覆盖度的坡地监测发现: 当林木覆盖度小于 0.60 时, 土壤流失量随坡度的增加急剧增加; 当林木覆盖度在 $0.6 \sim 0.80$ 之间时, 土壤流失量随地面坡度的增加较缓慢地增加; 当林木覆盖度大于 0.8 时, 土壤流失量几乎不受地面坡度的影响。张兴昌等^[35]研究不同植被覆盖度对土壤氮素流失的影响得出: 当流域植被覆盖度分别为 60% 、 40% 、 20% 和 0 时, 土壤铵态氮流失量分别为 87.08 kg/km^2 、 44.31 kg/km^2 、 25.16 kg/km^2 和 13.71 kg/km^2 ; 硝态氮流失量分别为 85.50 kg/km^2 、 74.05 kg/km^2 、 63.95 kg/km^2 和 56.23 kg/km^2 ; 全氮流失量为 0.81 t/km^2 、 1.18 t/km^2 、 1.98 t/km^2 和 7.51 t/km^2 。

3 存在问题与研究展望

坡地在一些小流域中占有不容忽视的重要地位,其表层土壤中营养物质的迁移转化对地表水体(特别是湖泊水体)的富营养化产生重要的影响,引起了国内外的高度重视.加强坡地表土营养物质输运规律研究,不仅是土壤养分流失和土壤溶质运移的研究基础,也是水环境中面污染源控制研究的重要内容.

国内外对坡地营养物质随地表径流及壤中流迁移过程的研究取得了许多成果,但仍存在不少有待解决的问题:(a)坡地表土的氮磷等营养物质如何迁移到水体中,以及在迁移过程中的相互转化等方面的研究尚需深入,机理机制尚未清楚,无法有效地预测和控制土壤营养物质的流失以及面源污染引起地表水体的富营养化等问题;(b)当前坡面表土层中营养物质在降雨时的损失主要侧重于坡面径流,而对壤中流研究甚少,壤中流是一种多因素综合效应结果,其中营养物质的迁移应该引起关注^[13,33];(c)由于流域(包括坡地)面源产生和传输机制不清,对面源污染负荷定量化的方法,主要是采用经验统计模型对营养物质N、P的输出进行估算,或者立足于接纳水体的水质分析,难以对流域土地利用进行最佳管理(BMP).建议加强研究以不同类型坡地为基本单元的流域管理模式,改变不同坡地的土壤施肥量和施肥技术及耕作制度,提高植物覆盖度,弥补目前流域面源控制和管理的不足.

参考文献:

- [1] KENNETH G C, ACHIM D, DANIEL T W. Agroecosystems nitrogen-use efficiency and nitrogen management[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 132—140.
- [2] ROMANO N, SANTINI A. On the characterization of soil hydraulic behavior at the hillslope scale in modeling erosional and runoff events in a Mediterranean environment [A]. In: *New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life* [C]. Rotterdam: Balkema, 2000. 91—98.
- [3] 阎伍玖, 陈飞星. 巢湖流域不同土地利用类型地表径流污染特征研究[J]. *长江流域资源与管理*, 1998, 13(3): 274—277.
- [4] 杨艳生, 史德明. 长江三峡区土壤侵蚀研究[M]. 南京: 东南大学出版社, 1994. 1—15.
- [5] 张乃明, 余扬, 洪波. 滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J]. *环境科学*, 2003, 24(3): 155—157.
- [6] SHARPLEY A N. Depth of surface soil-runoff interaction as affected by rainfall, soil, slope, and management[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 1010—1015.
- [7] SHARPLEY A N, DANIEL T C, SIMS T J. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. *J Soil Water Conserv*, 1996, 51: 160—166.
- [8] JEROME M, PATRICK D. Mechanisms of nitrate transfer from soil to stream in an agricultural watershed of French Brittany[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 133: 161—183.
- [9] AHUJA L R. Release of a soluble chemical from soil to runoff[J]. *Trans ASAE*, 1982, 25: 948—953, 960.
- [10] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. *环境科学学报*, 1997, 17(1): 39—47.
- [11] DILLAHA T A. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint-source pollution control[J]. *Trans ASAE*, 1989, 32: 513—519.
- [12] DABNEY S M, MEYER L D, HARMON W C, et al. Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges[J]. *Trans ASAE*, 1995, 38(6): 1719—1729.
- [13] BROOKES P C, HECKRATH G. Losses of phosphorus in drainage water: phosphorus loss from soil to water[M]. New York: CAB International, 1997. 353—371.
- [14] POTE D H, DANIEL T C, SHARPLEY A N. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60: 855—859.
- [15] DANIEL T C, SHARPLEY A N, LEMUNYON J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 251—257.
- [16] 张兴昌, 邵明安. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 128—135.
- [17] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996. 1—40.
- [18] 梁涛, 张秀梅. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. *地理学报*, 2002, 57(4): 389—396.
- [19] 傅涛, 倪九派. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 33—35, 83.
- [20] 陈欣, 姜曙千. 红壤坡地磷素流失规律及其影响因素[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 3(3): 38—41.
- [21] WILLIAM J G, ANDREW N S. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watershed[J]. *J Environ Qual*, 1998,

27 : 267—277.

- [22] 郭伦 , 李佩武 . 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究 [J]. 环境科学学报 , 1996 , 16 (1) : 111—115.
- [23] 马琨 , 王兆骞 , 陈欣 , 等 . 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究 [J]. 水土保持学报 , 2002 , 16 (3) : 16—19.
- [24] 康玲玲 , 朱小勇 . 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究 [J]. 土壤学报 , 1999 , 32 (4) : 536—543.
- [25] 王百群 , 刘国彬 . 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报 , 1999 , 3 (2) : 18—22.
- [26] 吴长文 , 陈法扬 . 坡地土壤侵蚀机理研究进展与现状 [J]. 中国水土保持 , 1996 , 17 (11) : 21—24.
- [27] 彭浩 , 张兴昌 . 黄土区土壤钾素径流流失规律研究 [J]. 水土保持学报 , 2002 , 16 (1) : 47—49.
- [28] 刘秉正 , 李光录 . 黄土高原南部土壤养分流失规律 [J] 水土保持学报 , 1995 , 9 (2) : 77—86.
- [29] WAN Y , EL-SWAIFY S A . Sediment enrichment mechanism of organic carbon and phosphorus in a well-aggregated Oxisol [J]. J Environ Qual , 1998 , 27 : 132—138.
- [30] 黄丽 . 紫色土坡地的水土流失与其物理性质的关系 [J]. 华中农业大学学报 , 1999 , 19 (1) : 35—39.
- [31] SHARPLEY A N , SMITH S J , JONES O R . The transportation of bioavailable phosphorous in agriculture runoff [J]. J Environ Qual , 1992 , 21 : 30—35.
- [32] AHUJA L R . The extent and nature of rainfall soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff [J]. J Environ Qual , 1983 , 12 : 34—40.
- [33] SIMS J T , SIMARD R R , JOERN B C . Phosphorus losses in agricultural drainage : historical perspective and current research [J]. J Environ Qual , 1998 , 27 : 277—293.
- [34] 张洪江 , 王礼先 . 坡面林地土壤流失系统动力学模型研究 [J]. 北京林业大学学报 , 1996 , 18 (4) : 43—49.
- [35] 张兴昌 , 刘国彬 . 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响 [J]. 环境科学 , 2000 , 21 (6) : 16—19.

Advances in research of nutrient transfer in surface and subsurface soil on sloping land in small watersheds

LI Yong , WANG Chao , TANG Hong-liang

(College of Environmental Science and Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the current research on sloping lands , a discussion was made on the mechanism of nutrient transfer and transformation along with surface runoff and soil flows in sloping lands . It is concluded that the nutrient transfer in soil is affected by some factors , such as intensity of rainfall , gradient and length of slope , characteristics of solute , topographic features , soil type , and vegetative cover , which also determine the form of nitrogen and phosphorus losses . In consideration of some inadequencies in current research , it is pointed out that the study of nutrient transfer can provide a basis for study of nutrient loss and solute transfer in soil . Furthermore , with different sloping lands taken as basic elements , a new watershed management mode was proposed in order to perfect the control and management of non-point source pollution . It is suggested that different fertilizers , fertilization techniques , cultivation systems and high vegetative coverage should be adopted in different kinds of sloping lands .

Key words : small watershed ; sloping land ; nutrient ; transfer