北方半干旱地区棕壤总磷流失特点试验研究

霍太英,陆桂华,薛联青

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用直接套取土柱的方法采集原状棕壤土,通过模拟降雨和灌溉试验,分析了棕壤总磷流失的特点。结果表明:下渗率是影响总磷流失量的最主要因素;疏松性棕壤总磷主要通过下渗方式流失,密实型棕壤主要通过径流方式流失;灌溉条件下棕壤总磷流失量与时间成指数函数关系,累计流失量与时间成幂函数关系。

关键词:总磷;流失特点;棕壤土;模拟试验;北方半干旱地区

中图分类号:P33 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2008)06-0061-03

Experimental study on loss of total phosphorus in brown soil in northern semi-arid area

HUO Tai-ying, LU Gui-hua, XUE Lian-qing

(*College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Undisturbed brown soil was directly collected through casing pipes. An experiment of simulated rainfall and irrigation was conducted to study the loss of total phosphorus in brown soil. The results indicate that: (1) infiltration is the main factor affecting the loss of total phosphorous; (2) the loss of total phosphorus is mainly through infiltration in loose brown soil and through runoff in dense brown soil; and (3) when there is irrigation, an exponential function relation exists between total phosphorus loss and time, and a power function relation exists between its accumulation and time.

Key words: total phosphorus; loss features; brown soil; stimulation experiment; northern semi-arid area

1 概 述

随着农业的发展,大量施用氮肥、磷肥对环境造成的污染已受到世界各国的广泛关注。全世界化肥使用量从 1939 年的 0.39 亿 t 到 1985 年的 18.4 亿 t,增加了 47 倍[1]。美国环保署把农业列为全美河流和湖泊污染的第一污染源[2]。我国湖泊、水库的水质富营养化问题日趋严重,磷已经成为控制湖泊水体富营养化的重要因子。如太湖、滇池和巢湖,非点源污染(包括人畜粪尿和生活污水)已经成为入湖总氮和总磷负荷的主要来源[3]。

如何防治磷对水环境造成的污染,从源头上控制其流失显得尤为必要。磷作为非点源污染物,其产生的过程比较复杂。有关研究认为,磷的产生及输出主要通过地表径流方式,集中在土壤表层 0~5 cm 这一范围内,为此大量的研究多集中于表面径流中磷迁移动态的研究。但对北方半干旱地区而言,降雨少且多集中在夏季,春秋两季干旱少雨,需要进行农田灌溉,影响磷流失的因素主要有降雨和灌溉,其流失的特点直接影响着农业面源污染对水环境的影响。

棕壤是北方半干旱地区有代表性的地带性土壤,主要分布于胶东半岛和辽东半岛,土层较厚,质地比较黏重,表层有机质含量较高,呈微酸性,其粘化作用强烈,淋溶作用较明显,土壤易溶性盐类和碳酸盐淋失较强,粘粒向下淀积。为研究北方半干旱地区棕壤总磷流失的特点,选取山东泰安地区棕壤,采用原状土柱进行了室内模拟降雨试验和灌溉淹水试验。这

基金项目:国家自然科学基金青年基金(50609006);山东省环境保护局科技攻关项目

作者简介:霍太英(1965—),男,山东单县人,博士研究生,研究方向为水资源综合开发与环境效应。E-mail:huotaiying@sdein.gov.cn

对于从源头上减少总磷的流失，做好农田水肥管理，开展农业面源污染防治具有十分重要的意义[4-7]。

2 研究方法与试验过程

取土区位于山东泰安市东北部。该地区年平均降雨量 700.0 mm，多集中在 6 ~ 9 月份，汛期平均降水量 480.0 mm，占年降水量的 68.6%。主要是冬小麦/夏玉米轮作种植体系，与山东的主要农作物的种植体系相近。同时，该地区化肥施用历史悠久，与山东农业发展整体状况比较接近，有一定的代表性[5]。

试验用原状土柱采取套管直接套取的方法采集，以保证土壤的结构与原状土相一致，同时也使土壤与土柱管壁贴的十分紧密，保证在运输过程中的扰动对土壤影响较小。土柱套管为圆柱形敞口装置，由白色 PVC 管制成。土柱 1、土柱 2 高度 38 cm，内径 20 cm，壁厚 0.4 cm；土柱 3 高度 38 cm，内径 11 cm，壁厚 0.3 cm。土柱 1 取自耕地田埂，土壤结构密实；土柱 2 取自耕地种植区，土壤结构相对疏松，有 4 棵茶苗；土柱 3 取自小麦坡耕地，约有 10 株麦苗。其中土柱 2、土柱 3 土壤颗粒大小比较均匀，沙粒很少，土壤中含有植物残根。土柱的土层高度均为 25 cm，在土层的下面铺有石英沙作为反滤层，且在套管底部均打有出水孔，直径为 0.5 cm；土柱上部套管两侧也打有两个直径约为 0.5 cm 的出水孔，离土面约 1 cm，以排出土壤表面积水。土壤相对密度为 2.66，容重为 1.28 g/cm^3；土柱 1、土柱 2、土柱 3 的总磷含量分别为 0.1040%、0.0885%、0.0015%

试验进行 3 次，包括 2 次降雨试验和 1 次灌溉淹水试验。水样采集采取不固定时段收集渗流水样，待水体积达到分析使用要求（约为 600 mL）时，即作为该时段的终点，转而收集下一时段；同时收集土柱表面积水的溢流（从土柱两侧的导流孔导出），作为径流水样。水样总磷的分析方法为过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法；土样总磷的分析方法为高氯酸-硫酸消化法。

3 试验结果分析

3.1 模拟降雨条件下棕壤下渗率变化趋势

从图 1 看出，第一次降雨试验，3 个土柱下渗率变化趋势不同。土柱 1 和土柱 3 下渗率的最大值出现在降雨的起始阶段，并随着时间的增加而逐步下降；而土柱 2 下渗率出现一个“滞后”现象，这可能与土柱 2 的土壤结构相对疏松以及土壤的耕作特性有关。从图 2 可以看出，第二次降雨试验各土柱下渗率的变化趋势与第一次降雨试验大体相似，这表明在可产生渗流的降雨量范围内，棕壤下渗率主要取决于土壤结构。

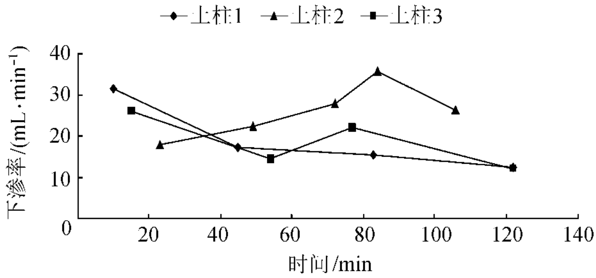

图 1 各土柱第一次降雨试验下渗率变化趋势

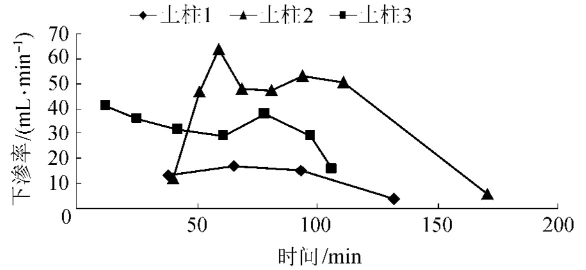

图 2 各土柱第二次降雨试验下渗率变化趋势

3.2 模拟降雨条件下棕壤总磷流失的特点

从图 3 可知，土柱 2 和土柱 3 单位面积总磷流失率的变化趋势基本上是一致的，呈随时间增加先升后降的趋势，土柱 1 却呈逐步下降的趋势；而且土柱 2、土柱 3 单位面积总磷的流失率远远大于土柱 1，尤其在 80 min 左右时更为突出，分别是土柱 1 的 5 倍多。这与采集土样的位置有关，土柱 1 采自田埂上，土壤比较密实，土柱 2、土柱 3 采自种植区，二者单位面积总磷流失率比较相似，只是由于土柱 3 表面积小而使得渗流量小，在试验后期其变化趋势稍有差别。比较图 1 和图 3，各土柱下渗率与其单位面积总磷流失率的变化趋势极为吻合，说明棕壤下渗率是影响土壤总磷流失量的最主要因素。这一特点从第二次降雨的试验结果也可得到证实（图 2 和图 4）。因此，任何可以降低或延缓棕壤土下渗率的措施都可以降低总磷的流失。

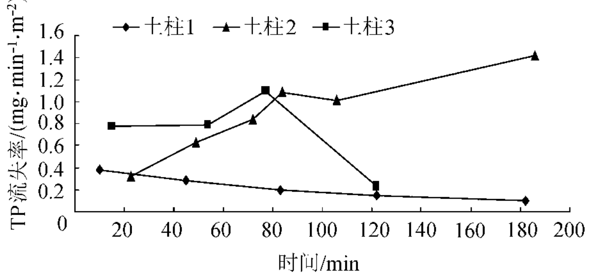

图 3 第一次降雨各土柱单位面积渗流总磷流失率变化

从图 5、图 6 可见，两次降雨试验土柱 2、土柱 3 总磷的流失量都大于土柱 1。这主要是由于土柱 2、土柱3 都采自种植区，土壤比较疏松，磷流失量相差不大，而土柱 1 采自田埂，雨水下渗较少。为便于比

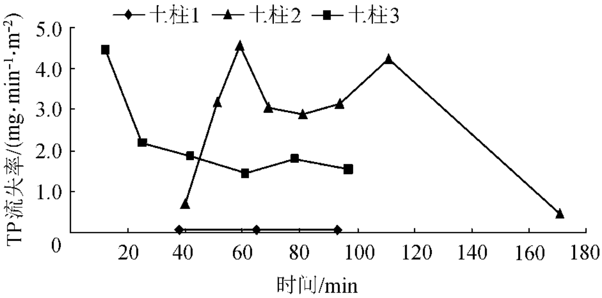

图 4　第二次降雨各土柱单位面积渗流总磷流失率变化

较，在图 5、图 6 中将土柱 3 的总磷流失量转化为与土柱 1、2 同样内径的土柱作图，从而说明磷流失与棕壤自身含磷量关系不大。

从图 7 可知，各土柱总磷流失的主要途径并不相同。土柱 1 总磷的径流流失量是其下渗流失量的 286.5%，而土柱 2 和土柱 3 径流总磷的流失量分别是其下渗流失量的 7.8% 和 6.3%，说明土柱 1 总磷流失主要通过径流方式，而土柱 2 和土柱 3 的总磷流失主要通过下渗方式。这表明在一定的降雨条件下，棕壤的疏松程度影响土壤中总磷流失的方式。

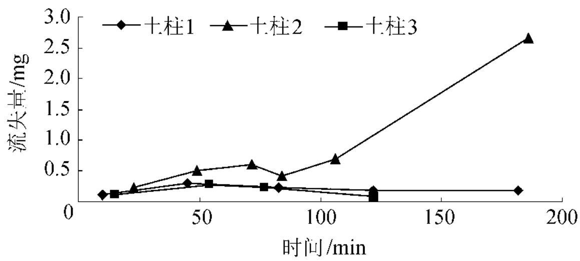

图 5　第一次降雨试验各土柱渗流总磷流失量变化

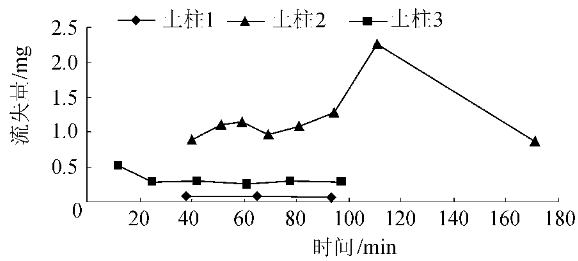

图 6　第二次降雨试验各土柱渗流总磷流失量变化

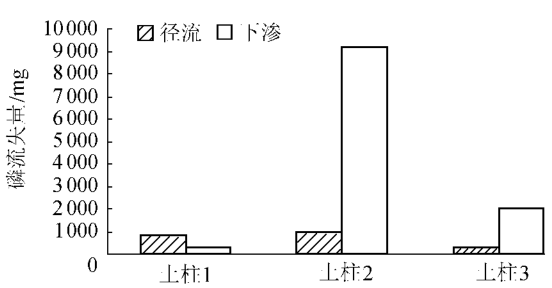

图 7　各土柱渗流和径流下磷的流失量比较（第二次降雨试验）

3.3　模拟灌溉条件下棕壤总磷流失量的变化

北方半干旱地区，农业生产的一个重要特点就是灌溉，灌溉是影响磷流失的一个重要因素。为研究灌溉条件下棕壤总磷流失特点，在前两次降雨试验的基础上，对土柱 1 进行人工控制淹水试验，模拟灌溉条件下棕壤总磷流失量的变化。试验结果见表 1。

表 1　模拟灌溉条件下土柱 1 总磷流失试验结果

时间段/min	TP 流失量/mg	TP 流失累计量/mg	时间段/min	TP 流失量/mg	TP 流失累计量/mg
0 ~ 6	1.15	1.15	167 ~ 183	0.74	13.13
6 ~ 16	1.33	2.48	183 ~ 199	0.79	13.92
16 ~ 23	1.27	3.75	199 ~ 207	0.72	14.65
23 ~ 47	1.17	4.92	207 ~ 215	0.70	15.35
47 ~ 71	0.98	5.90	215 ~ 231	0.62	15.97
71 ~ 79	0.91	6.81	231 ~ 247	0.61	16.58
79 ~ 95	0.93	7.74	247 ~ 255	0.60	17.18
95 ~ 111	0.78	8.52	255 ~ 263	0.61	17.79
111 ~ 127	0.79	9.31	263 ~ 279	0.59	18.38
127 ~ 135	0.83	10.14	279 ~ 303	0.56	18.95
135 ~ 151	0.78	10.91	303 ~ 311	0.54	19.49
151 ~ 159	0.73	11.65	311 ~ 319	0.53	20.02
159 ~ 167	0.74	12.39	319 ~ 327	0.55	20.57

从理论上讲，各种物质对水环境造成的影响主要是总量的影响，这是造成环境污染的重要因素。对引起水体富营养化的营养元素磷而言，其累计量对水环境的影响就显得更加突出。

在棕壤淹水条件下，可以认为土壤中含水量一直处于饱和状态。土柱 1 渗流总磷的流失量、累计流失量与时间的变化关系如图 8 所示。

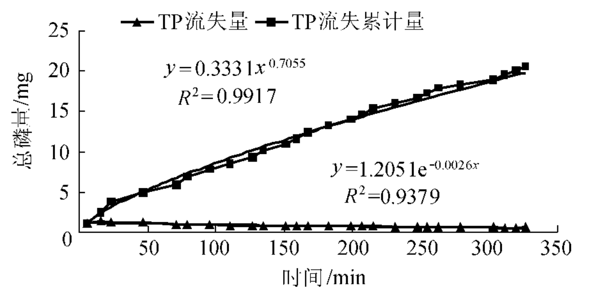

图 8　淹水条件下土柱 1 渗流总磷流失量及其累计量随时间的变化

从图 8 可以看出，总磷流失量与时间成指数函数关系，这与磷从土壤解吸的特征相一致。总磷累计流失量与时间成幂函数关系，这与磷的累积、土壤中含水量增加、水土比增大增加了磷的解析作用有关。

用图 8 确定的关系式分别除以土柱 1 内径面积，就可以求出单位面积（m^2）土壤总磷的流失量及其累计量与时间的关系式（1）、（2），从而就能模拟计算出农田灌溉条件下总磷的流失量。

$$W_{TP} = 0.0384e^{-0.0026t} \tag{1}$$

$$W'_{TP} = 0.0105t^{0.7055} \tag{2}$$

式中：W_{TP}为单位面积棕壤总磷流失量，kg；W'_{TP}为单位面积棕壤总磷累计量，kg。

（下转第 71 页）

表 3　*ET* 值分析结果统计

例序	一项目区		二项目区	
	ET 减少值/mm	减少率/%	*ET* 减少值/mm	减少率/%
试验一	0	0	0	0
试验二	98	14	87	13
试验三	135	20	137	20

表 4　水平衡分析及地下水位统计　mm

例序	一项目区			二项目区		
	取水量	补给量	Δh	取水量	补给量	Δh
试验一	567	181	-386	589	290	-299
试验二	211	176	-35	312	255	-57
试验三	172	174	2	241	248	-7

注：表中取水量为开采的地下水量，补给量为降水量与灌溉水对地下水的补给。

5　结　论

在资源型缺水地区，实施“真实节水”、降低 ET 即减少水资源的净消耗量对保障水资源可持续利用是十分必要的。结合特定区域的具体情况，通过实施 3 项节水措施（工程节水、农业措施节水和管理节水），可以有效降低 ET 值。

在以开发利用地下水为主的地区，将先进的 ET 管理理念应用于水资源开发利用和规划管理，辅以高水平的监测技术（包括降雨量、土壤含水率、地下水位及 ET 监测），能够实现水资源的优化配置和高效利用，有效改善水环境，保障社会经济可持续发展。

ET 管理技术目前还是一种新的管理模式，有诸多问题尚需完善和提高，但随着管理技术的不断完善和监测技术的不断提高，ET 管理将是水资源和水环境综合管理规划的既科学而又有效的技术方法。

参考文献：

[1] 高健磊，吴泽宁，左其亭，等. 水资源保护规划理论方法与实践[M]. 郑州：黄河水利出版社，2002.

[2] 钟玉秀. 基于 ET 的水权制度探析[J]. 水利发展研究，2007(2)：14-16.

[3] 屈艳萍，康绍忠，张晓涛，等. 植物蒸发蒸腾量测定方法述评[J]. 水利水电科技进展，2006，26(3)：72-77.

[4] 徐俊增，彭世彰，李道西，等. 基于 Logistic 曲线的作物累积蒸发蒸腾量模拟研究[J]. 河海大学学报：自然科学版，2007，35(2)：225-228.

[5] 丁加丽，彭世彰，徐俊增，等. 基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J]. 河海大学学报：自然科学版，2006，34(6)：239-242

[6] 张莉，彭世彰，罗玉峰，等. 辐射参数计算方法对参考作物蒸发蒸腾量计算值的影响[J]. 河海大学学报：自然科学版，2008，36(3)：306-310.

[7] 张瑞美，彭世彰，徐俊增，等. 不同 ea 计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响[J]. 河海大学学报：自然科学版，2006，34(6)：660-663.

[8] 张晓涛，康绍忠. 利用蒸发计估测参考作物蒸发蒸腾量的试验研究[J]. 水利水电科技进展，2007，27(1)：91-94.

[9] 彭世彰，李荣超. 覆膜旱作水稻蒸发蒸腾量计算模型研究[J]. 河海大学学报：自然科学版，2001，29(3). 51-54.

[10] 周忠生，王跃军. 科学灌溉高效运筹 ET[J]. 地下水，2007(3)：92-95.

（收稿日期：2007-12-20　编辑：高渭文）

（上接第 63 页）

为更好地表示灌溉条件下单位面积棕壤总磷流失量及其累计量变化与时间的关系，令 $a_{TP1}=0.0384$，$b_{03}=0.0026$；$a_{TP}=0.0105$，$b_3=0.7005$。

从而可以将式(1)、(2)分别表示为：

$$W_{TP} = a_{TP1}e^{-b_{03}t} \tag{3}$$

$$W'_{TP} = a_{TP}t^{b_3} \tag{4}$$

式中：a_{TP1}，b_{03}，a_{TP}，b_3 为总磷流失量经验系数，与棕壤的结构有关。

4　结　论

a. 在一定降雨量范围内，棕壤下渗率主要与土壤的结构有关，土壤自身磷含量对渗流总磷流失量的影响不大。

b. 下渗率是影响棕壤总磷流失量的最主要因素。凡是能控制下渗率的措施，都能减少磷的流失。

c. 疏松性棕壤的总磷流失主要通过下渗方式进行，密实性棕壤则主要通过径流方式进行。

d. 灌溉条件下，棕壤渗流总磷流失量与时间成指数函数关系，总磷流失累计量与时间成幂函数关系。

参考文献：

[1] 彭奎，朱波. 试论农业养分的非点源污染与管理[J]. 环境保护，2001(1)：15-17.

[2] US EPA. National water quality inventory：report to congress executive summary[R]. Washington DC：US EPA，1995：497.

[3] 李贵宝，尹澄清，周怀东. 中国‘三湖’的水环境问题和防治对策与管理[J]. 水问题论坛，2001(3)：36-39.

[4] 朱兆良，NORSE D，孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京：中国环境科学出版社，2006.

[5] 付伟章，史衍玺. 施用不同氮肥对坡耕地径流中 N 输出的影响[J]. 环境科学学报，2005，25(12)：1676-1681.

[6] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京：海洋出版社，2003：24-28.

[7] 赖格英，于革. 太湖流域营养物质输移的模拟评估研究[J]. 河海大学学报：自然科学版，2007(2)：140-144.

（收稿日期：2008-03-30　编辑：徐　娟）