

# 滇池流域人工模拟降雨条件下 农田施用有机肥对磷素流失的影响

王涛, 张维理\*, 张怀志

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:**应用田间原位人工模拟降雨的方法,在滇池流域不同作物类型农田上研究了有机肥(猪粪)不同用量水平对农田磷素流失的影响。结果显示,随着有机肥(猪粪)施用量的增加,农田流失液中各形态磷素的平均浓度提高,两者间呈显著正相关,相关系数均达到0.9以上。径流方式下,颗粒态磷是主要流失形态;渗漏方式下,有机肥用量水平低时颗粒态磷是主要流失形态,有机肥用量达到中等至较高水平时水溶性磷是流失的主要形态。同一有机肥用量水平下,不同作物类型农田流失液中各形态磷素的平均浓度均表现为:蔬菜田 > 花卉田 > 粮田。

**关键词:**滇池流域;模拟降雨;有机肥;农田磷素流失

中图分类号:X501

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)06-1092-06

## Effects of swine manure application on P losses from different farmlands under simulated rainfall in Dianchi watershed of Yunnan province

WANG Tao, ZHANG Wei-li\*, ZHANG Huai-zhi

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Field in-situ trials were carried out to study the effects of swine manure application on phosphorous losses from different farmlands under rainfall simulation in Dianchi watershed of Yunnan province. The results show that with the increase of applying swine manure amounts, concentrations of various phosphorus forms in runoff water from farmland are increased. The average concentrations of run off phosphorus are highly correlated (correlation coefficients > 0.9) with the manure application rates. Particulate phosphorus is the main form in runoff water. Particulate phosphorus is also the main form in leaching water when the manure application rate is low, while dissolved phosphorus is the main form in leaching water when the manure rate is from middle to high. Under the same level of swine manure application, concentrations of various phosphorus forms in runoff water from different farmlands have the same trend: vegetable field > flower field > cropland.

**Key words:** Dianchi watershed; simulated rainfall; manure; losses of phosphorus

滇池流域水体富营养化十分严重,已经达到了全湖水质超V类的严重状况;而来源于农业面源形成的入湖氮磷污染物远高于来自工业与城市生活排污造成的点源污染<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来,流域农田的氮、磷化肥及有机肥用量逐年增加,施入农田的氮、磷养分随降雨、灌溉等进入到河流、湖泊,不仅

降低了土壤肥力和化肥利用率,并已成为氮、磷养分迁出农田系统,进入水体导致水体富营养化的主要途径之一。

国际上对有机肥的氮、磷流失及其对面源污染的影响十分关注,人工模拟降雨是研究采用的重要方法之一。Walter等<sup>[2]</sup>及Vadas等<sup>[3]</sup>采用田间小区

收稿日期:2007-03-12 接受日期:2008-04-20

基金项目:农业结构调整重大技术研究专项(06.07-01A);云南省院省校科技合作计划(2006YX35);科研院所社会公益研究专项(2004DIB3J093);国家“973”项目(2002CB410806)资助。

作者简介:王涛(1983—),女,山西原平人,硕士,主要从事农业面源污染方面的研究。E-mail:wangt-1983@163.com

\* 通讯作者 Tel:010-82108685 E-mail:wzhang@caas.ac.cn

人工模拟降雨的方法研究证实,以地表撒施的方式施入农田有机肥中的磷是面源污染的重要原因之一;Hadi等<sup>[4]</sup>认为,农田施用有机肥超过植物生长吸收会对水体富营养化作出重要贡献。Vadas等<sup>[5]</sup>采用室内土盒人工模拟降雨的方法证实,地表径流是土壤表施有机肥中磷流失的主要途径,渗漏流失也占一定比例;Butler和Coale<sup>[6]</sup>研究不同用量有机肥在剖面各层次磷流失情况,结果显示0—30 cm流失量最大。McDowell和Sharply<sup>[7-8]</sup>采用直径19 cm的渗滤计淋洗试验表明,人工模拟降雨装置可较好地满足农田氮、磷流失研究所必需的多点、全过程两方面的要求,获得很好的试验和监测结果。

我国有机肥中氮、磷流失的研究主要为环保部门对畜禽粪便排放量、发生量等的统计。武淑霞<sup>[9]</sup>应用全国、县、乡级统计数据与现场农户调查数据对我国农田畜禽粪便发生量时空变异特征作了研究。而关于农田施用有机肥对水体富营养化影响的研究鲜见报道。施用有机肥农田氮、磷流失方式的田间原位实证性试验研究几乎没有。

滇池流域地区有机肥资源丰富,农田有机肥施用水平高,远超过国际上农田可承载畜禽粪便的最大负荷量标准<sup>[10]</sup>。该区域农民普遍习惯将未腐熟的畜禽粪便泼撒入农田,再使用旋耕机或锄头等农具将有机肥与20 cm左右土壤混合,而全年降水丰沛,特别在雨季降水频率高,施肥后随即遇到降雨的情况时有发生。为了解不同用量有机肥(猪粪)对滇池流域农田磷素流失的影响,本试验采用移动分体式模拟降雨器对农田中施用有机肥(猪粪)后,随着降雨流失的两种方式(径流和渗漏)进行田间原位模拟研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

多年降雨的平均值能够很好地反映出一个地区

的降雨分布情况,通过对滇池流域昆明1951—2001年日降水资料分析得知:昆明7—8月达到降雨量与降雨次数的最高峰。本试验研究区主要以周年轮作蔬菜、花卉等作物为主,换茬主要集中在6—8月,农户施用大量有机肥通常主要集中在这一时期,水肥耦合情况经常会发生,故本试验时间定于2006年7月,地点为云南省昆明市呈贡县大渔乡和晋宁县新街乡。两地位于滇池近湖区1公里内,土壤类型为红壤,有机肥为当地农民常用的未腐熟猪粪,供试土壤及有机肥基本性状见表1、表2。施有机肥处理为:0、15、30、75、150 t/hm<sup>2</sup>,共5个水平(根据当地农户调查,0为对照,75 t/hm<sup>2</sup>为当地中等施肥量,150 t/hm<sup>2</sup>为当地较高施肥量)。各处理分别进行径流流失模拟和渗漏流失模拟试验。其中呈贡县试验点为完全处理;晋宁县粮食作物地块分别设0、75 t/hm<sup>2</sup>径流、渗漏模拟;蔬菜地块设0、75 t/hm<sup>2</sup>渗漏模拟。降雨量均为80 mm,雨强为40 mm/h时收集渗滤液;雨强为120 mm/h时收集径流液。其中雨强40 mm/h为低强度,120 mm/h为高强度。

### 1.2 试验装置

本试验采用移动分体式模拟降雨器(一种土壤径流、渗滤液收集装置,专利号:ZL200620167515.1),该装置由4部分组成:降雨器、土柱桶、给水装置及采集装置。土柱桶为直径30 cm,高30 cm的PVC管,侧壁在5、25 cm处有直径为3 cm的2个孔,分别用于收集径流液或渗滤液。降雨器亦为直径30 cm,高30 cm的PVC管,距上端10 cm处有一降雨筛,降雨筛密度分2种,分别实现2种雨强要求。给水装置由水箱、连通器和控水阀组成,控水阀用于控制水箱中水进入模拟降雨器中的速度。采样装置由有孔胶塞连接橡胶管,用聚乙烯瓶收集水样。模拟试验降雨用水为分析用蒸馏水。

表1 供试土壤基本性状  
Table 1 Basic properties of testing soils

| 地点<br>Site      | 作物类型<br>Crop type | 土层深度<br>Depth<br>(cm) | 颗粒组成 Particle composition( g/kg ) |             |               |           | 有机质<br>Organic matter<br>( g/kg ) | Olsen-P<br>( mg/kg ) |
|-----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------|---------------|-----------|-----------------------------------|----------------------|
|                 |                   |                       | >0.2 mm                           | 0.2~0.02 mm | 0.02~0.002 mm | <0.002 mm |                                   |                      |
| 呈贡县<br>Chengong | 花卉<br>Flower      | 0—5                   | 16.1                              | 271.7       | 653.4         | 58.9      | 32.4                              | 101.6                |
|                 |                   | 5—20                  | 25.3                              | 257.9       | 626.2         | 60.4      | 32.2                              | 116.6                |
| 晋宁县<br>Jinning  | 蔬菜<br>Vegetable   | 0—5                   | 7.8                               | 239.2       | 688.0         | 65.0      | 28.7                              | 70.6                 |
|                 |                   | 5—20                  | 4.8                               | 221.2       | 708.4         | 65.7      | 28.7                              | 83.1                 |
|                 | 粮食<br>Cereal      | 0—5                   | 0.1                               | 81.9        | 809.2         | 98.2      | 28.9                              | 26.9                 |
|                 |                   | 5—20                  | 0.0                               | 91.3        | 812.0         | 96.7      | 30.2                              | 29.9                 |

表 2 供试有机肥基本性状

Table 2 Basic Properties of swine manure

| 地点<br>Site       | 含水量<br>Water content<br>(%) | 全 N<br>Total N<br>(%) | 全磷<br>Total P<br>(%) | Olsen-P<br>(mg/kg) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 呈贡县<br>Chenggong | 85.40                       | 2.68                  | 3.70                 | 2903.02            |
| 晋宁县<br>Jinning   | 79.50                       | 1.85                  | 3.52                 | 2850.97            |

### 1.3 采样和分析测定

试验将土柱桶置入土体 25 cm, 随后施入有机肥, 与 20 cm 内土层混合均匀, 稍做平整, 将模拟降雨器置于土柱桶正上方, 连接水箱开始降雨。降雨筛密度较大的模拟降雨器用于模拟渗漏流失方式, 在此方式下, 将距地表 25 cm 的孔用有孔橡胶塞连接收集渗漏液, 另一孔用无孔橡胶塞封住。降雨筛密度较小的模拟降雨器用于模拟径流流失方式, 在此方式下, 将与地表齐平的孔用有孔橡胶塞连接收集径流液, 另一孔用无孔橡胶塞封住。2 种方式下水样收集均使用 250 mL 聚乙烯瓶, 集满一瓶为一个样本, 并记录每个样品收集始末时间, 以及降雨过程始末时间等。

样品收集后冰冻保存, 尽快测定。测定时样品分 2 份, 1 份用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤用于测定水溶性无机磷 (DRP) 和水溶性总磷 (DTP), 另一份不过滤用于测定总磷 (TP)。DRP 用钼锑抗分光光度法测定(水和废水监测分析方法), DTP 和 TP 用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定(水和废水监测分析方法)。

## 2 结果和讨论

### 2.1 径流与渗漏流失过程

一般情况持续时间较长的小雨易产生渗漏流失, 而短时间暴雨冲击易产生地表径流。本试验模拟 2 种流失方式的降雨量相同, 均为 80 mm, 渗漏方式下雨强为 40 mm/h, 径流方式下雨强为 120 mm/h。从 2 种流失方式过程时间(表 3)可以看出, 渗漏方式下, 开始产流距开始降雨的时间间隔较长, 基本稳定在 30 min 左右, 产流过程历经时间长, 平均出水速度较慢。而在径流方式下, 开始产流距开始降雨时间间隔较短, 在 15 min 左右, 产流过程历经时间短, 平均出水速度较快。在这 2 种流失方式下, 开始产流距降雨开始时间间隔与肥料用量、种植作物类型间差异均不显著, 产流时间和平均出水速度亦呈

表 3 地表径流与渗漏过程时间表

Table 3 Time tables of surface runoff and leakage processes

| 地点<br>Site       | 作物类型<br>Crop type | 施肥量<br>Manure rate<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 流失方式<br>Types of losses | 开始产流距降雨开始时间<br>The time from rain start to loss (min) | 产流时间 (min)<br>The time from loss begin to finish | 平均出水速率<br>Average speed<br>(mL/min) |
|------------------|-------------------|--|-------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 呈贡县<br>Chenggong | 花卉<br>Flower      | 0  | 径流<br>Run off           | 13.20 b   | 35.12 b  | 86.32 b                             |
|                  |                   | 15   |                         | 13.40 b   | 31.12 b  | 96.71 b                             |
|                  |                   | 30   |                         | 14.01 b   | 29.11 b  | 102.21 b                            |
|                  |                   | 75   |                         | 14.20 b   | 36.00 b  | 85.92 b                             |
|                  |                   | 150  |                         | 15.01 b   | 32.13 b  | 97.03 b                             |
| 晋宁县<br>Jinning   | 粮食<br>Cereal      | 0  |                         | 14.03 b   | 32.14 b  | 99.22 b                             |
|                  |                   | 75   |                         | 15.20 b   | 30.02 b  | 96.43 b                             |
|                  |                   | 平均值 Avg.                                   |                         | 14.15   | 32.23  | 94.79                               |
| 呈贡县<br>Chenggong | 花卉<br>Flower      | 0  | 渗漏<br>Leaching          | 25.08 a   | 91.15 a  | 37.63 a                             |
|                  |                   | 15   |                         | 26.02 a   | 90.01 a  | 37.76 a                             |
|                  |                   | 30   |                         | 25.30 a   | 101.20 a   | 34.81 a                             |
|                  |                   | 75   |                         | 27.30 a   | 90.04 a  | 36.1 a                              |
|                  |                   | 150  |                         | 28.01 a   | 98.31 a  | 33.74 a                             |
| 晋宁县<br>Jinning   | 蔬菜<br>Vegetable   | 0  |                         | 26.02 a   | 90.25 a  | 36.74 a                             |
|                  |                   | 75   |                         | 27.21 a   | 98.13 a  | 35.17 a                             |
|                  | 粮食<br>Cereal      | 0  |                         | 25.92 a   | 90.55 a  | 35.54 a                             |
|                  |                   | 75   |                         | 26.69 a   | 91.10 a  | 36.27 a                             |
| 平均值 Avg.         |                   |  | 26.39                   | 93.41   | 35.98  |                                     |

现相似规律。但是 2 种方式间差异显著,即产流开始时间、产流过程经历的时间、出水速度在任何一种流失方式下均比较稳定,受有机肥用量和种植作物类型的影响较小,渗漏是经历时间长、相对缓慢的流失过程,径流是经历时间短、相对快速的流失过程。

## 2.2 施肥量对磷素流失浓度的影响

2.2.1 径流液和渗漏液中各形态磷浓度与施肥量的关系 图 1 看出,随着有机肥用量增加,各形态磷流失浓度逐渐增加,表明其流失风险增大。在同一

点位径流液中 DRP、DTP 和 TP 浓度随着有机肥施用量的增加呈线性增加趋势,各形态磷流失浓度与施肥量均显著正相关,相关系数( $r$ )分别为 0.96、0.97 和 0.95;渗漏液中 DRP、DTP 浓度亦随施肥量的增加而增加,呈显性正相关,相关系数( $r$ )分别为 0.94、0.99。TP 浓度与施肥量相关性未达显著,说明施肥量增加至一定水平时浓度增加缓慢。渗漏流失方式下有机肥用量是否有一个阈值尚待进一步研究。

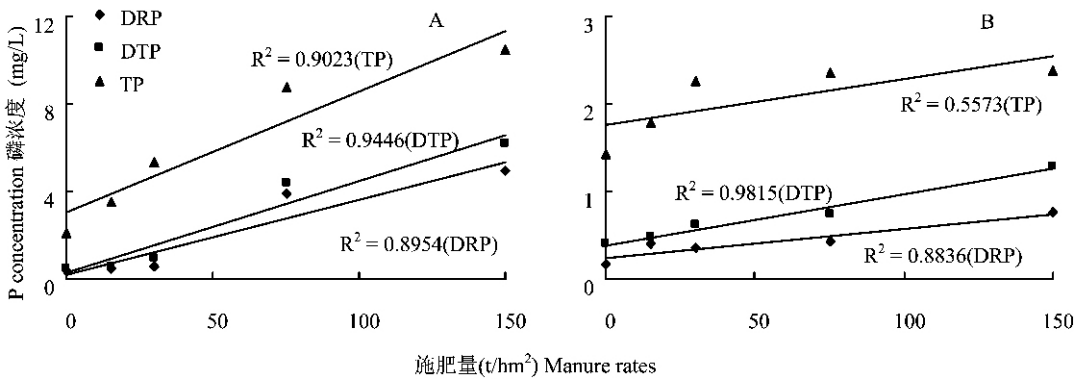


图 1 径流液和渗漏液中各形态磷浓度与施肥量的关系

Fig.1 Relationship between concentrations of different P forms and manure rate in runoff and leaching water

(A: 呈贡县 Chenggong; B: 晋宁县 Jinning. DRP - 水溶性无机磷 Dissolved reactive phosphorus; DTP - 水溶性总磷 Dissolved total phosphorus; TP - 总磷 Total phosphorus)

2.2.2 不同有机肥用量水平对径流液和渗漏液中各形态磷素浓度的影响 表 4 可知,有机肥施用量中等(75 t/hm<sup>2</sup>)时,径流液中 DRP、DTP 和 TP 浓度增加幅度近似,花卉地块分别比不施有机肥对照增加 9.67、7.42 和 3.18 倍,粮食地块分别增加 8.61、6.32 和 1.27 倍。但相同有机肥用量水平下不同点位间径流液中各形态磷浓度表现为:花卉地 > 粮食地。这一方面是由于点位间的土壤养分含量存在一定差异,另一方面是由于长年种植作物类型不同,耕作强度及频度不同使得种植花卉地块土壤疏松而粮食地块土壤相对紧实,养分在疏松土壤中更容易移动引起流失。

表 4 还看出,当有机肥施用量达到研究区域当地用量中等水平(75 t/hm<sup>2</sup>)时,渗漏液中各形态磷浓度高于有机肥用量低水平(30 t/hm<sup>2</sup>)时的浓度,但增加幅度远小于径流液;DRP、DTP 和 TP 浓度分别比低水平有机肥增加 0.18、0.22 和 0.04 倍。相同有机肥用量水平下不同点位间径流液中各形态磷浓度亦有所差异,即:蔬菜 > 花卉 > 粮食。

## 2.3 不同形态磷素流失比较

2.3.1 径流液中不同形态磷素流失比例 不同形态磷在径流液中的比例见表 5。其中颗粒态磷(PP, 直径 > 0.45 μm 土粒)所占比例最小值为 50.36%,最大值为 82.11%,该形态的磷为径流流失方式中的主要形态。当有机肥用量达到中等至较高水平时水溶性磷所占比例有所增加,可达到 50%左右。水溶性磷中以无机态磷为主要流失形态,变化范围为 49.57%~89.86%,与有机肥施用量亦无相关性。Braskerud 等<sup>[11]</sup>也证实,从农田流失的磷素主要以 PP 和 DRP 形式存在,这部分磷可以被水流运输至较远的地区而输出农田。

2.3.2 渗漏液中不同形态磷素流失比例 表 5 还看出,不施用有机肥和有机肥施用量较低时,渗漏液中颗粒态磷在渗漏液中所占比例较大;有机肥施用量增加时,颗粒态磷(直径 > 0.45 μm 土粒)所占比例减小。Pote 等<sup>[12]</sup>研究表明,入渗率与土壤粘粒含量高度正相关,施有机肥会增加粘粒含量,减小颗粒态磷的入渗。在此流失方式下,水溶性磷中无机态

表 4 径流液和渗漏液中各形态磷浓度( mg/L)

Table 4 Concentration of different P forms in runoff and leaching water

| 地点<br>Site     | 作物类型<br>Crop type | 施肥量<br>Manure rate<br>( t/hm <sup>2</sup> ) | DRP 浓度<br>DRP concentration |                 | DTP 浓度<br>DTP concentration |               | TP 浓度<br>TP concentration |               |
|----------------|-------------------|---|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
|                |                   |   | 径流液<br>Runoff               | 渗漏液<br>Leaching | 径流液<br>Runoff               | 径流液<br>Runoff | 渗漏液<br>Leaching           | 径流液<br>Runoff |
|                |                   |   | 呈贡县<br>Chenggong            | 花卉<br>Flower    | 0                           | 0.368         | 0.177                     | 0.519         |
|                |                   | 15  | 0.521                       | 0.397           | 0.608                       | 0.479         | 3.541                     | 1.787         |
|                |                   | 30  | 0.600                       | 0.356           | 0.953                       | 0.611         | 5.330                     | 2.271         |
|                |                   | 75  | 3.929                       | 0.419           | 4.372                       | 0.748         | 8.808                     | 2.356         |
|                |                   | 150   | 4.911                       | 0.766           | 6.219                       | 1.295         | 10.435                    | 2.370         |
| 晋宁县<br>Jinning | 蔬菜<br>Vegetable   | 0   |                             | 1.959           |                             | 2.080         |                           | 4.672         |
|                |                   | 75  |                             | 5.911           |                             | 6.219         |                           | 10.435        |
| 晋宁县<br>Jinning | 粮食<br>Cereal      | 0   | 0.112                       | 0.089           | 0.226                       | 0.135         | 1.412                     | 0.443         |
|                |                   | 75  | 1.076                       | 0.139           | 1.654                       | 0.212         | 3.211                     | 0.895         |

DRP—水溶性无机磷 Dissolved reactive phosphorus ; DTP—水溶性总磷 Dissolved total phosphorus ; TP—总磷 Total phosphorus .

表 5 不同形态磷在径流液和渗漏液中所占比例( % )

Table 5 Proportion of different P forms in runoff and leaching water

| 地点<br>Site     | 作物类型<br>Crop type | 施肥量<br>Manure rate<br>( t/hm <sup>2</sup> ) | 颗粒态磷比例<br>Proportion of PP |                 | 水溶性磷比例<br>Proportion of WEP |                 | 水溶性无机磷比例<br>Proportion of DRP |                 | 水溶性有机磷比例<br>Proportion of DOP |                 |
|----------------|-------------------|---|----------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
|                |                   |   | 径流液<br>Runoff              | 渗漏液<br>Leaching | 径流液<br>Runoff               | 渗漏液<br>Leaching | 径流液<br>Runoff                 | 渗漏液<br>Leaching | 径流液<br>Runoff                 | 渗漏液<br>Leaching |
|                |                   |   | 呈贡县<br>Chenggong           | 花卉<br>Flower    | 0                           | 75.40           | 77.82                         | 24.60           | 22.18                         | 70.94           |
|                |                   | 15  | 71.16                      | 66.46           | 28.84                       | 33.54           | 85.60                         | 82.99           | 14.40                         | 17.01           |
|                |                   | 30  | 82.11                      | 36.92           | 17.89                       | 63.08           | 62.90                         | 58.23           | 37.10                         | 41.77           |
|                |                   | 75  | 50.36                      | 37.78           | 49.64                       | 62.22           | 89.86                         | 56.01           | 10.14                         | 43.99           |
|                |                   | 150   | 59.60                      | 36.83           | 40.40                       | 63.17           | 78.97                         | 59.11           | 21.03                         | 40.89           |
| 晋宁县<br>Jinning | 蔬菜<br>Vegetable   | 0   |                            | 65.92           |                             | 34.08           |                               | 63.60           |                               | 36.40           |
|                |                   | 75  |                            | 30.81           |                             | 69.19           |                               | 81.88           |                               | 18.12           |
| 晋宁县<br>Jinning | 粮食<br>Cereal      | 0   | 83.96                      | 69.57           | 16.04                       | 30.43           | 49.57                         | 65.79           | 50.43                         | 34.21           |
|                |                   | 75  | 48.50                      | 23.69           | 51.50                       | 76.31           | 65.08                         | 65.60           | 34.92                         | 34.40           |

PP—颗粒态磷 Particulate phosphorus ; WEP—水溶性磷 Water extracting phosphorus ; DRP—水溶性无机磷 Dissolved reactive phosphorus ; DOP—水溶性有机磷 Dissolved organic phosphorus

磷所占比例也较大,与有机肥施用量亦无相关性。Novak 等<sup>[13]</sup>研究证实,DRP 在垂直方向上有渗漏积累现象,是水溶性磷渗漏流失的主要形态。

### 3 结论

本试验结果表明,有机肥施用量越高,DRP、DTP、TP 流失浓度越大;在径流和渗漏两种流失方式下 DRP、DTP 浓度与施肥量均呈显著正相关。相同施肥水平下,径流液中各形态磷浓度均大于渗漏液中相对应形态磷浓度。可见在滇池流域地区按照当地农民习惯采用的有机肥施用方式,若农田施入大量有机肥后即遇一定强度雨水,则可能引起各种形态磷素迁移进入水体,进而加剧水体富营养化程

度。本试验研究所得初步结果可为今后预测农田有机肥磷流失量以及其他深入研究提供实证性依据。

### 参考文献:

- [1] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.  
Zhang W L, Xu A G, Ji H J et al. Estimation of agricultural no-point source pollution in china and the alleviating strategies III. A review of policies and practices for agricultural no-point source pollution control in China[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(7): 1026-1033.
- [2] Walter M T, Brooks E S, Walter M F et al. Evaluation of soluble phosphorus loading from manure-applied fields under various spreading strategies[J]. J. Soil Water Conserv., 2001, 56(4): 329-335.

- [ 3 ] Vadas P A , Kleinman P J A , Sharpley A N . A simple method to predict dissolved phosphorus in runoff from surface-applied manures[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2004 , 33( 2 ) : 749 - 756 .
- [ 4 ] Hadi T . Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2003 , 32 : 1044-1052 .
- [ 5 ] Vadas P A , Haggard B E , Gburek W J . Predicting dissolved phosphorus in runoff from manured field plots[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2005 , 34( 4 ) : 1347-1353 .
- [ 6 ] Butler J S , Coale F J . Phosphorus leaching in manure-amended coastal plain soils[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2005 , 34( 1 ) : 370 - 381 .
- [ 7 ] McDowell R. W , Sharpley A N . Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures , composts or inorganic fertilize[ J ]. *Agric. Ecosyst. Environ.* , 2004 , 102 : 17-27 .
- [ 8 ] Sharpley A N . Rainfall frequency and nitrogen and phosphorus runoff from soil amended with poultry litter[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 1997 , 26( 4 ) : 1127-1132 .
- [ 9 ] 武淑霞 . 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[ D ]. 北京 : 中国农业科学院博士论文 , 2005 .
- Wu S X . The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[ D ]. Beijing : PhD thesis , CAAS , 2005 .
- [ 10 ] 张维理 , 武淑霞 , 冀宏杰 , 等 . 中国农业面源污染形势估计控制对策 I . 21 世纪初中国农业面源污染的形势估计[ J ]. *中国农业科学* 2004 , 37( 7 ) : 1008-1017 .
- Zhang W L , Wu S X , Ji H J *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I . Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[ J ]. *Sci. Agric. Sin.* , 2004 , 37( 7 ) : 1008-1017 .
- [ 11 ] Uusi-kamppa J , Braskerud B , Jansson H *et al.* Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2000 , 29 : 151-158 .
- [ 12 ] Pote D H , Reed B A , Daniel T C *et al.* Water-quality effects of infiltration rate for soils receiving swine manure[ J ]. *J. Soil Water Conserv.* 2001 , 56 : 32-37 .
- [ 13 ] Kleinman P J A . , Sharpley A N . Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events[ J ]. *J. Environ. Qual.* , 2003 , 32 : 1072-1081 .