

基于线性回归的农业氮磷流失比定量模型研究

蔡龙炎

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 环境科学研究中心, 福建厦门 361005)

摘要: 收集整理了 32 篇已公开发表的学术论文的 N、P 流失数据 63 组, 对我国农业 N、P 流失比进行了分析。结果表明, 自 20 世纪 90 年代以来, 我国农业 N、P 流失比存在显著下降趋势 ($p < 0.05$, $n = 63$)。我国农业 N 素流失和 P 素流失在化学计量上的变化趋势可能与我国目前频发的水体富营养化存在密切联系。通过线性回归分析, 我们发现农业 N、P 流失比与其影响因子存在良好的线性关系, 回归方程为 $Y = -12.507 + 0.063X_1 + 0.143X_2 - 1.257X_3 + 4.796X_4 - 11.060X_5$ (X_1 : 降水量; X_2 : 总 N 输入量; X_3 : 总 P 输入量; X_4 : 坡度; X_5 : TN/TP; Y : N/P), 但该定量模型仍存在一定缺陷。农业 N、P 流失比定量模型的研究, 对加强水体环境保护具有重要的现实意义。

关键词: 线性回归; N/P; 农业系统; 定量模型; 氮磷流失

中图分类号: X52; X53

近些年来, 我国水体富营养化加剧, 引发了一系列的社会和环境问题。农业 N、P 流失被认为是水体富营养化的重要污染源^[1-4]。N/P 比是水体富营养化的重要调控因素^[5-6]。因此, 如何快速准确地定量农业 N、P 流失比不仅在经济上而且在加强农业 N、P 流失管理和减少对水体营养盐的输入, 保护水体环境上都具有重要的意义。

Sogbedji 等^[7]认为农业 N、P 流失与气候因素、地形、地貌和农业活动等密切相关。降水是农业 N、P 流失比的关键影响因素, 降水径流是 N、P 流失的重要途径^[8]。地形、地貌对农业 N、P 流失也有重要影响, 如坡度^[9]。施肥量和施肥方式与 N、P 流失之间存在显著的关系^[10-11]。因此, 我们将影响农业 N、P 流失比的主要因素归纳为以下几个方面: ①气候因素, 如降雨^[12-16]; ②人类活动, 如施肥量和施肥结构^[17-21]; ③地形、地貌, 如坡度^[9, 16, 22-23]; ④其他, 如植被覆盖和土壤质地等^[24-25]。因此, 本文将根据以上影响因子来定量我国农业 N、P 流失比。

1 材料和方法

本文中我国农业 N、P 流失指标数据库的数据来源为 1993—2007 年的 32 篇^[14, 18, 24-53]已公开发表的学术论文中不同土地利用类型的农业用地 N、P 流失数据 63 组。文中统计项目包括降水量 (mm/a)、坡度 (°)、总 N 输入量、总 P 输入量、总 N 输入量与总 P 输入量比 (TN/TP)、时间 (a)、总 N 流失量与总 P 流失

量比 (N/P) 等 7 项, 总 N 输入和流失量、总 P 输入和流失量单位均为 kg/hm^2 (以纯 N、纯 P 计)。文中采用统计分析软件 SPSS 16.0 进行数据的统计分析, 分析内容主要包括线性回归分析、显著性、相关性等。

2 结果与讨论

2.1 我国农业氮磷流失比现状

自 20 世纪 90 年代以来, 我国农业 N、P 流失比存在显著下降趋势 ($p < 0.05$, $n = 63$) (图 1)。这种变化趋势可能与近 20 年来我国农业 P 肥施用量的增幅比 N 肥大有关^[54]。林忠辉等^[55]分析了我国 1980—1995 年不同区域的年化肥使用情况, 发现我国 P 肥施用量在不断上升。Gao 等^[56]研究也发现, 我国平均施用的 N 肥和 P 肥比例从 1989 的 13.7:1 下降至 1999 年的 9.8:1 (以纯 N、纯 P 计)。

水体中的 N/P 比对藻类的爆发性生长具有重要的调控作用。Redfield 定律认为, 藻类细胞组成的原子比率 C:N:P = 106:16:1, 如 N/P 比超过 16:1, P 被认为是限制性因素; 反之, 当 N/P 比小于 10:1 时, N 通常被认为是限制性因素^[5]。相关研究还指出当水体的总 N 和总 P 浓度比值在 10:1 ~ 15:1 范围时, 藻类生长与 N、P 浓度存在直线相关关系, 其中湖水的最适宜总 N 和总 P 浓度比值在 12:1 ~ 13:1^[6]。我国农业 N、P 流失比变化范围大部分在 0 ~ 15 之间, 农业 N、P 流失可能是我国水体富营养化的主要原因之一。我国农业 N 素流失和 P 素流失在化学计量上的变化趋势可能与我国

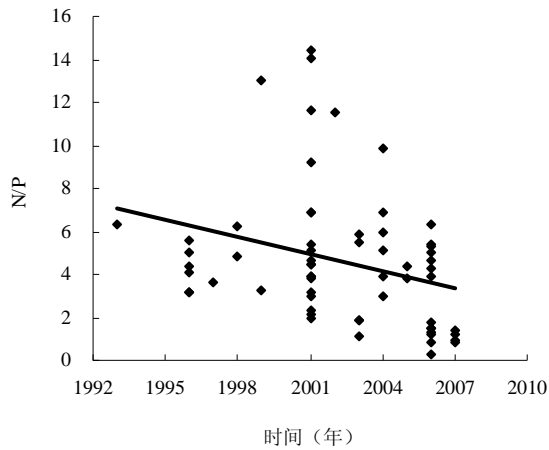


图 1 农业 N、P 流失比的时间动态 ($p < 0.05, r = -0.29, n = 63$)

Fig. 1 Temporal change in N, P loss ratios from agriculture

目前频发的水体富营养化存在密切联系。面对如此严峻形势，根据各影响因子实现对我国农业 N、P 流失比的定量分析，有利于人们作出准确快速的判断和采取针对性措施，控制农业 N、P 流失比对加强水体环境保护具有重要的现实意义。

2.2 线性回归分析

我们选取有效数据进行农业 N、P 流失比的多元线性回归分析，线性回归分析法是一种广泛用于定量预测模型分析的统计分析方法^[57-58]。其中应变量为 N/P，自变量为：降水量、坡度、总 N 输入量、总 P 输入量、总 N 输入量与总 P 输入量比 (TN/TP)。方法：选择 Enter 法。

结果显示：回归方程的复相关系数为 0.993，决定系数 (即 R^2) 为 0.987，经方差分析， $F = 109.393, p < 0.001$ ，回归方程有效 (表 1)。回归方程为 $Y = -12.507 + 0.063X_1 + 0.143X_2 - 1.257X_3 + 4.796X_4 - 11.060X_5$ (X_1 : 降水量; X_2 : 总 N 输入量; X_3 : 总 P 输入量; X_4 : 坡度; X_5 : TN/TP; Y : N/P)。这表明农业 N、P 流失比与其影响因子之间存在客观线性关系，我们只要知道农业地区的以上其中 5 个变量，就可以知道另一变量。因此，我们只要知道某一农业地区 $X_1 \sim X_5$ 5 个变量，就可以计算出该地区的农业 N、P 流失比，而这 5 个变量是相对容易得到的。

表 1 线性回归各变量参数

Table 1 Parameters of each variable

变量	B 偏回归系数	标准误差	Beta 标准回归系数	T 检验值	显著水平
X_1	0.063	0.007	0.769	8.520	<0.001
X_2	0.143	0.054	4.434	2.675	0.032
X_3	-1.257	0.391	-4.544	-3.217	0.015
X_4	4.796	1.836	0.942	2.613	0.035
X_5	-11.060	5.537	-1.141	-1.997	0.086
常数项	-12.507	25.473	-	-0.491	0.638

注: $F = 109.393, p < 0.001, X_1$: 降水量; X_2 : 总 N 输入量; X_3 : 总 P 输入量; X_4 : 坡度; X_5 : TN/TP, 下同。

2.3 模型验证

从表 1 中，我们可知 $X_1 \sim X_4$ 均达到显著性，但 X_5 和常数项并没达到显著水平 (表 1)，这可能与植被覆盖和土壤质地有关^[25-26]。因为 N、P 存在的形态不同，N 在土壤中多以溶解态存在，而 P 多以结合态存在，植被覆盖和土壤质地对 N、P 流失的影响可能存在较大差异^[59-60]。同时由于这两个变量难以量化，在确定模型时我们没有考虑在内，因此有必要对回归方

程做检验。为了分析模型实际应用的适用性以及由模型模拟而造成的误差，我们进行反演验证。结果显示，虽存在一定的误差，但原始和反演线性回归方程均达到显著水平 (表 2)，该定量模型是合理和有效的，能够较好地描述农业 N、P 流失比与其影响因子的关系。该模型对于农业 N、P 流失比的快速估算，将为农业管理部门更好控制 N、P 流失提供指导和依据。

表 2 原始和反演方程

Table 2 Original and inversion equations

项目	回归方程	显著水平
原始数据	$Y = -12.507 + 0.063X_1 + 0.143X_2 - 1.257X_3 + 4.796X_4 - 11.060X_5$	<0.001
反演数据	$Y = -13.793 + 0.066X_1 + 0.136X_2 - 1.176X_3 + 4.295X_4 - 10.802X_5$	<0.05

2.4 优点和不足

优点：本研究对我国农业 N、P 流失比定量模型的探析，总体上效果比较理想，这为今后我国农业 N、P 流失比的统计研究和管理提供了基础。它克服了传统试验的缺点，具有快速、经济、准确的优点。

不足：若考虑植被覆盖，则在同一地方，施肥状况一样的不同土地利用方式农业用地 N、P 流失比计算上存在一些问题，因为根据定量模型计算出来的值只有一个，但实际上不同植被覆盖，N、P 流失能力也不同^[61-63]。这主要是我们在确定模型时没有考虑植被覆盖和土壤质地引起的。这是该模型存在的一个缺陷，我们将在下一步的工作中进行补充分析，对模型进行完善。

农业 N、P 流失比定量模型虽存在一定的问题，但是该定量模型在流域或区域的大尺度上是农业系统（植被覆盖可不计）N、P 流失比的一个很好的量度。该模型可对我们的农业活动作出预测和评价，将为我们优化农业系统管理和加强水体环境保护提供指导，有利于促进社会和环境的协调发展。

3 结论

自 20 世纪 90 年代以来，我国农业 N、P 流失比存在显著下降趋势（ $p < 0.05$ ， $n = 63$ ）。这种变化趋势可能与近 20 年来我国农业 P 肥施用量的增幅比 N 肥大有关。我国农业 N 素流失和 P 素流失在化学计量上的变化趋势可能与我国目前频发水体富营养化存在密切联系。通过线性回归分析，农业系统 N、P 流失比与其各影响因子存在较好的线性关系，回归方程为 $Y = -12.507 + 0.063X_1 + 0.143X_2 - 1.257X_3 + 4.796X_4 - 11.060X_5$ （ X_1 ：降水量； X_2 ：总 N 输入量； X_3 ：总 P 输入量； X_4 ：坡度； X_5 ：TN/TP； Y ：N/P）。但此回归方程仍存在缺陷，需要我们在实践中进一步补充分析。我们对农业 N、P 流失比定量模型的探索，有利于人们对农业 N、P 流失比作出判断和预测，有利于更好地控制农业 N、P 流失比，对加强水体环境保护具有重要的现实意义。

参考文献：

- [1] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299
- [2] Bechmann ME, Berge D, Eggstad HO, Vandsemb SM. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes—two long-term integrated studies from Norway. Journal of Hydrology, 2005, 304: 238-250
- [3] Nørring NPE. Eutrophication and agriculture in Denmark: 20 years of experience and prospects for the future. Hydrobiologia, 2009, 629: 65-70
- [4] Withers PJA, Haygarth PM. Agriculture, phosphorus and eutrophication: A European perspective. Soil Use and Management, 2007, 23 (Suppl. 1): 1-4
- [5] Li RX, Zhu MY, Chen S, Lu R, Li B. Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 603-607
- [6] 代堂刚. 渔洞水库氮磷趋势分析. 水资源研究, 2008, 29(3): 29-30
- [7] Sogbedji JM, van Es HM, Yang CL, Geohring CD, Magdoff FR. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(6): 1813-1820
- [8] Sharpley AN, Hedley MJ, Sibbesen E, Hillbricht A, House WA, Ryszkowski L. Phosphorus transfers from terrestrial to aquatic ecosystems // Tiessen H. Phosphorus and the Global Environment. Chichester: John Wiley and Sons (UK), 1995: 171-199
- [9] 李高明, 铁柏清, 李杰峰, 谢可军, 杨余维. 湖南典型土壤类型和耕作方式的氮磷损失特征研究. 湖南农业科学, 2009(4): 52-54
- [10] 马保国, 刘永朝, 薛进军. 冀南稻麦轮作区化肥施用与氮磷流失状况分析. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 72-74
- [11] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝煊. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响. 水土保持学报, 2008, 22(5): 5-10
- [12] 方楠, 吴春山, 张江山, 王菲凤, 郭树宏. 天然降雨条件下典型小流域氮流失特征. 环境污染与防治, 2008, 30(9): 51-54, 59
- [13] 郭伦, 李佩武. 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究. 环境科学学报, 1996, 16(1): 111-116
- [14] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 尤力. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19
- [15] Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL, Howarth RW, Sharley AN, Smith VH. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559-568
- [16] Haggard BE, Moore Jr PA, Chaubey I, Stanley EH. Nitrogen and phosphorus concentrations and export from an Ozark Plateau catchment in the united states. Biosystems Engineering, 2003, 86 (1): 75-85
- [17] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究. 土壤, 2005, 37(1): 48-51
- [18] 胡志平, 郑祥民, 黄宗楚, 茅国芳, 陈振楼. 上海地区不同施

- 肥方式氮磷随地表径流流失研究. 土壤通报, 2007, 38(2): 310-313
- [19] Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737-750
- [20] Diebel MW, Maxted JT, Robertson DM, Han S, Vander Zanden MJ. Landscape planning for agricultural non-point source pollution reduction III: assessing phosphorus and sediment reduction potential. *Environmental Management*, 2009, 43: 69-83
- [21] 黄东风, 王果, 李卫华, 邱孝煊. 施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及模拟土柱氮磷淋失的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(2): 68-73
- [22] 苑韶峰, 吕军, 俞劲炎. 氮、磷的农业非点源污染防治方法. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 122-125
- [23] Tang JL, Zhang B, Gao C, Zepp H. Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment. *Catena*, 2008, 72: 374-385
- [24] 王晓燕, 王一响, 王晓峰, 王振刚, 汪清平, 胡秋菊, 蔡新广. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 30-33
- [25] 梁新强, 田光明, 李华, 陈英旭, 朱松. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 59-63
- [26] 陆轶峰, 李宗逊, 雷宝坤. 滇池流域农田氮、磷肥施用现状与评价. *云南环境科学*, 2003, 22(1): 34-37
- [27] 黄宗文, 孙风华, 肖立国. 东北农田林网区林农牧生态系统物质流分析. *延边大学农学学报*, 2002, 24(1): 5-9
- [28] 曹宁, 曲东, 陈新平, 张福锁, 范明生. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(7): 127-133
- [29] 曹慧, 杨浩, 赵其国. 太湖丘陵地区典型坡面土壤侵蚀与养分流失. *湖泊科学*, 2002, 14(3): 243-246
- [30] 朱普平, 常志州, 郑建初, 陈留根. 太湖地区稻田主要种植方式氮磷径流损失及经济效益分析. *江苏农业科学*, 2007(3): 216-218
- [31] 黄宗楚, 郑祥民, 姚春霞. 上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究. *云南地理环境研究*, 2007, 19(1): 6-10
- [32] 武杰, 李宝珍, 谌利, 唐章林, 王正银, 李加纳. 不同施肥水平对甘蓝型黄籽油菜含油量的效应研究. *中国油料作物学报*, 2004, 26(4): 59-62
- [33] 田平. 基于 GIS 杭嘉湖地区农田氮磷径流流失研究(硕士学位论文). 杭州: 浙江大学, 2006
- [34] 李凌浩. 武夷山甜槠林生态系统的养分平衡研究. *植物生态学*, 1998, 22(3): 193-201
- [35] 董舟, 蔡强国, 张光远. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 8-13, 21
- [36] 易小平, 唐树梅, 余雪标, 漆智平. 海南坡地芒果园间作体系水土流失养分损失初步研究. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 93-96
- [37] 吴士章, 朱文孝, 苏维词, 李坡, 贺卫, 周庆珍. 喀斯特地区土壤侵蚀及养分流失定位试验研究—以贵阳市修文县久长镇为例. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 202-205
- [38] 窦培谦, 王晓燕, 房孝铎, 王丽华. 石匣小区氮磷坡面流失特征研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(4): 19-24
- [39] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 韩小勇, 夏首先. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程. *应用生态学报*, 1996, 10(3): 312-316
- [40] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 况福虹. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 30-36
- [41] 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. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 18-22
- [42] 王兴祥, 张桃林, 张斌. 红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡. *生态学报*, 1999, 19(3): 335-341
- [43] 吴志峰, 卓慕宁, 王继增, 匡耀求, 程炯. 珠海正坑小流域土壤与氮、磷养分流失估算. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 101-102, 114
- [44] 吴雪彪, 陈士银. 旱耕赤红壤氮、磷流失污染研究. *湛江海洋大学学报*, 1999, 19(2): 58-62
- [45] 严登峰. 果园不同水土保持措施控制氮磷流失效果的研究(硕士学位论文). 福州: 福建农林大学, 2007
- [46] 庄舜尧, 孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡. *土壤*, 1997, 29(2): 80-83
- [47] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 吴卿. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究. *土壤学报*, 1999, 36(4): 536-543
- [48] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 71-74
- [49] 张燕, 张洪, 彭补拙, 杨浩. 不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 23-26
- [50] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 庞良玉. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2241-2249
- [51] 刘经荣, 张德远, 周卫, 沈润平, 吴建富. 不同肥料结构对稻田水流中养分平衡的影响. *江西农业大学学报*, 1994, 16(4): 328-331
- [52] 罗专溪, 朱坡, 江涛, 唐家良, 王冬, 辛伟. 紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(3): 379-383

- [53] 何园球, 王兴祥, 胡锋, 陈家宙. 红壤丘岗区人工林土壤水分、养分流失动态研究. 水土保持学报, 2002, 16(4): 91-97
- [54] Bennett EM, Carpenter SR, Caraco NF. Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: A global perspective. *Bio. Science*, 2001, 51(3): 227-234
- [55] 林忠辉, 陈同斌, 周立祥. 中国不同区域化肥资源利用特征与合理配置. 资源科学, 1998, 20(5): 26-31
- [56] Gao C, Sun B, Zhang TL. Sustainable Nutrient management in Chinese agriculture: Challenges and perspective. *Soil Society of China*, 2006, 16(2): 253-263
- [57] 张毅川, 李传霞. 多元线性回归在行道树景观吸引力定量评价中的应用. 科学技术与工程, 2008, 8(22): 1671-1819
- [58] 薛文博, 易爱华, 张增强. 基于线性回归的环境质量评价普适指数公式. 环境监测管理与技术, 2006, 18(6): 41-43
- [59] Fang YT, Zhu WX, Gundersen P, Mo JM, Zhou GY, Yoh M. Large loss of dissolved organic nitrogen from nitrogen-saturated forests in subtropical China. *Ecosystems*, 2009, 12: 33-45
- [60] Sharpley AN, Gburek WJ, Folmar G, Pionke HB. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania. *Agricultural Water Management*, 1999, 41: 77-89
- [61] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 郭新波, 张如良. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究. 生态学报, 2003, 23(1): 188-198
- [62] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化. 土壤, 2000, 32(4): 188-193
- [63] 黄云凤, 张璐平, 洪华生, 陈能汪, 黄金良, 曾悦. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 735-739

Quantitative Model for Nitrogen and Phosphorus Loss Ratios from Agriculture in China Based on Linear Regression

CAI Long-yan

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Centre, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Based on nationwide 63 data of nitrogen and phosphorus losses from 32 formally-published papers, the nitrogen and phosphorus loss ratios from agriculture in China were analyzed. The results showed a significant decline in N, P loss ratios values ($p < 0.05$, $n = 63$) since 1990s. The changes in N and P losses from agricultural systems might be closely connected with widespread eutrophication nationwide. By linear regression analysis, we found that there is a good linear relationship between nitrogen and phosphorus loss ratios from agriculture and their impact factors, the regression equation is $Y = -12.057 + 0.063X_1 + 0.143X_2 - 1.257X_3 + 4.796 X_4 - 11.060X_5$ (X_1 : precipitation, X_2 : total nitrogen input, X_3 : total phosphorus input, X_4 : slope, X_5 : TN/TP, Y : N/P). However, there are still some defects in the quantitative model. The quantitative model is of important and realistic in strengthening water environment protection.

Key words: Linear regression, N/P, Agricultural system, Quantitative model, Nitrogen and phosphorus losses