

《物质循环过程虚拟仿真实验》

实验手册

学分：2 | 学时：36 | 指导老师：袁增伟

一、实验教学方法

本实验教学项目的实施过程如图 1 所示。从图中可以看出，整个实验教学过程包括实验前、实验中和实验后 3 个部分。实验前学生需要进行实验准备，主要是通过课堂讲授教会学生环境系统分析原理，让学生熟练掌握物质流分析、生命周期分析、清单分析等方法，熟悉物质循环过程机理，在此基础上通过演示实验让学生掌握物质循环过程模拟的基本技能，包括主要过程、参数、方法等。相关资料可以在实验教学项目的网站下载或在线视频学习（如图 2 所示）。

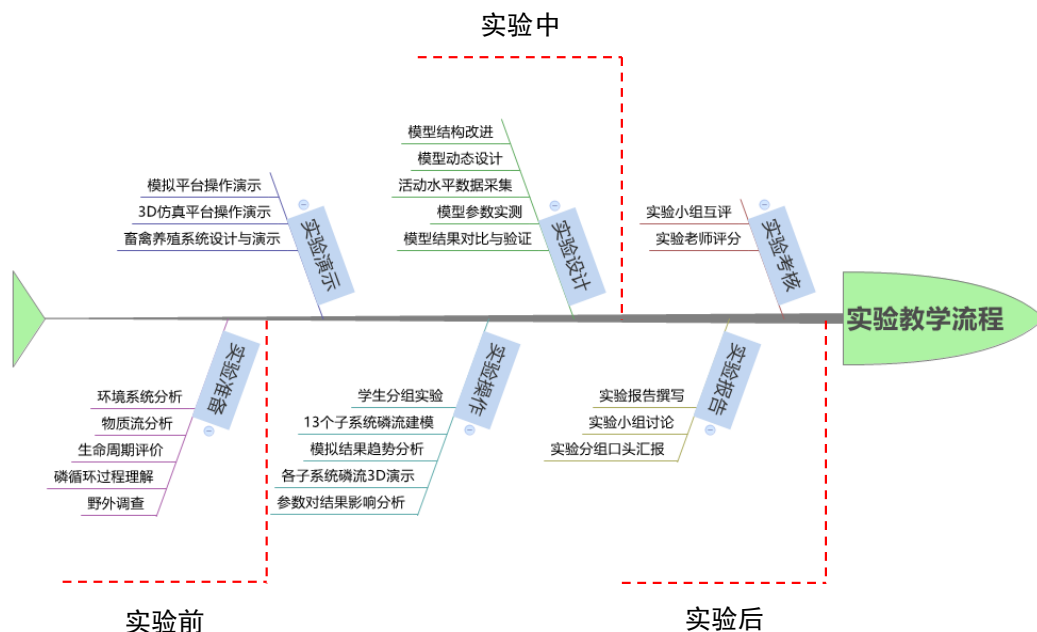


图 1 实验教学实施过程

本实验教学团队通过对课堂讲授、野外考察与观测、演示实验、虚拟仿真、创新实验、课堂汇报等多种教学方法的混合运用，实现对环境系统分析课程中抽象教学内容的具体化、简单化、模块化、体验化，进而大大提高教学效果。

课堂讲授。通过课堂讲解让学生了解人类活动将自然资源加工成各种产品满足人类使用，并向环境中排放污染物的生命周期过程。同时，也教会学生学习物质流分析、清单分析、生命周期分析等环境系统分析方法和数学建模原理，让学生了解物质的迁移转化过程机理。

野外考察与观测。通过实地调查、访谈、监测等手段，让学生对校园内的水资源消耗、能源消耗及食物消费等活动开展实地调研，了解具体活动类型、每一类人类活动的资源消耗和污染物排放强度，观察每一类人类活动时空变化规律，加深学生对人类活动资源消耗和污染排放过程的直观理解和感受。

演示实验。运用具体案例，通过对系统边界界定、系统人类活动类别细分、物质种类、物质流动强度的设置，考察物质流动路径和强度变化，学会运用模型进行物质循环过程模拟的技能和方法。通过实验演示，教会学生使用模拟平台及 3D 仿真平台的基本操作，同时基于磷循环过程中的畜禽养殖系统整个建模过程的设计进行详细的演示，让学生学会如何自己在这个实验平台上建立模型并且进行 3D 仿真。

虚拟仿真。依据前面对校园水资源、能源、食物等人类活动调查的结果，在虚拟仿真系统中进行模型设计，确定系统人类活动过程、物质种类、物质流动强度、污染物种类和排放强度等，通过改变人类活动强度、资源消耗强度和污染物排放强度，考察物质流动路径和强

度变化，体验人类活动如何影响资源流动路径和强度。对于实验操作而言，首先让学生进行分组实验，每一组通过分工协作建立 14 个子系统磷流模型，开展验证性研究并分析模拟结果趋势，同时将各个子系统磷流的模拟结果在 3D 平台上进行系统演示，并通过参数调节实现参数对结果的影响分析。

创新实验。该实验模块是在前面既有的人类活动类型基础上提供的一种创新模块，即学生可以根据自己的兴趣提出新的虚拟仿真需求，并自主创建人类活动类别，设置新的物质种类和流动过程，进而开发出新的物质循环虚拟仿真模型。该类试验主要是针对有自主创新能力的学生设计的，它有助于激发学生的创新热情并开展相关科学创新实践。原则上，在实验操作的过程中，学生如果对实验本身提出一些疑问，这时就有模型的改进空间，该模块主要是支持具有创新能力的学生进行模型改进，提升模型精度，并将其改进后的模型结果与改进前进行比较，分析模拟结果的差异性，激发学生科研创新热情。

课堂汇报。要求学生在物质循环过程虚拟仿真的基础上，将实验目的、实验设计、实验过程、实验结果等信息做成 PPT，并在课堂上逐一口头汇报。口头报告首先是实验小组内部讨论，制定一个报告流程，然后通过分工协作的方法设计口头汇报方案，并最终分组进行汇报，通过这种方式，能够提升学生的组织能力、团队精神和口头表达能力，同时也有助于发现学生在实验过程中存在的问题，并给出改进建议。



图 2 实验教学网站

一个典型的例子是在南京大学大地学实验班（包括地理与海洋科学学院、地球科学学院、大气科学学院和环境学院）的认知实习实验教学。当时本实验教学团队提供的实验课程之一就是在“南京大学环境虚拟仿真实验软件”上开发的 BOD-DO 耦合模型。该模型的数学原理为：

$$\frac{dL}{dt} = A - k_1 L$$

$$\frac{dD}{dt} = k_2 (D_{sat} - D) - k_1 L$$

式中，L 表示 BOD 的浓度（单位：mg/L），A 表示 BOD 的排放速率（单位：mg·L⁻¹·d⁻¹），k₁ 表示 BOD 的降解速率常数（单位：d⁻¹），D 表

示 DO 的浓度（单位：mg/L）， k_2 表示 DO 的复氧速率常数（单位： d^{-1} ）， D_{sat} 表示饱和溶解氧的浓度（单位：mg/L）。其中， $D_{sat}-D$ 表示氧亏（单位：mg/L）。

本质上讲，这就是一个求解微分方程组的模型。但是，如果按照求解微分方程组的方式来教授这个模型，就会将实验课程变成数学课或者计算机课，这样就偏离了实验教学本身的目的。当时，我们是通过如图 3 所示图解法的方式来刻画这个模型的。

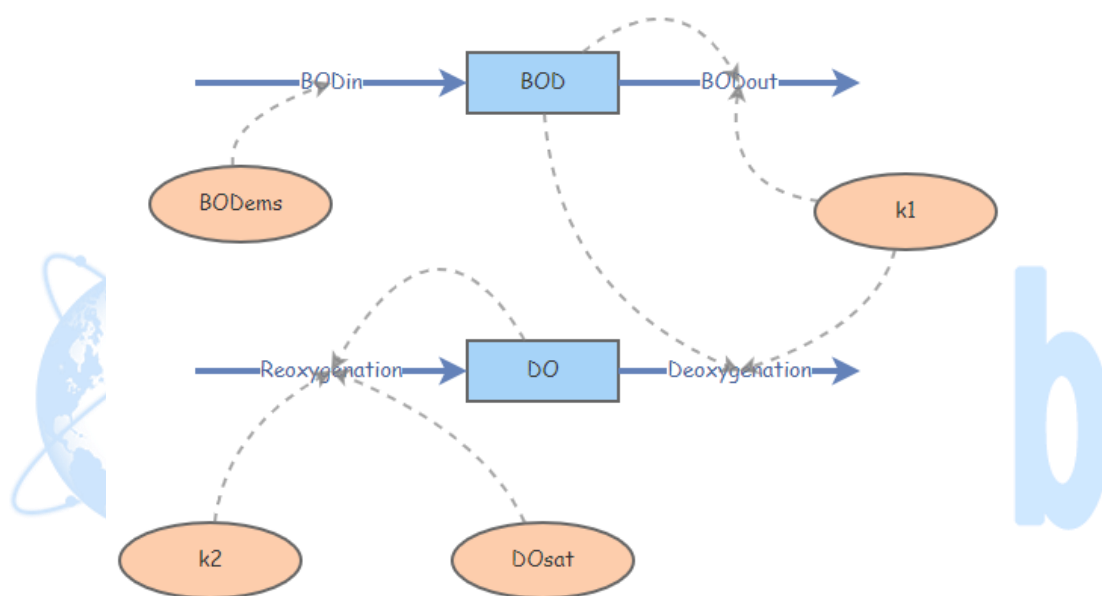


图 3 BOD-DO 耦合模型的图解法

事实上，图 3 的方法与上述的微分方程组是等价的。但是，我们通过图 3 的呈现方式，能够更好地让学生理解微分方程的含义：如果我们把求微分的变量看作是一个水库，使水库水增加的就是其输入流，使其减少的就是输出流。

通过代入数据，编辑好公式，运行模型，学生自己就可以得到之前在教科书上看到的以示意图呈现的氧垂曲线图（如图 4 所示）。

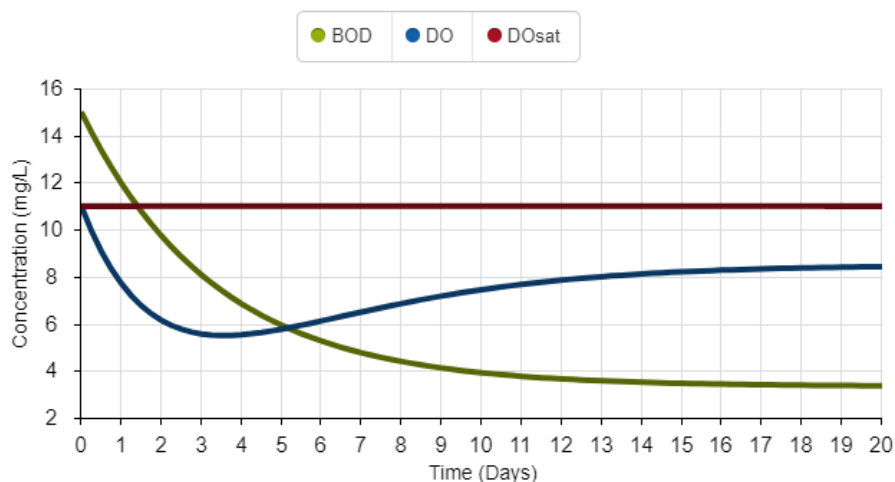


图 4 BOD-DO 耦合模型模拟结果

在实验过程中，有学生提出模型参数可能会受到温度的影响，能否设置温度这个变量的问题。这说明实验本身已经激发了学生的兴趣，从而充分调动学生的主观能动性 with 想象力，最终培养学生的原创性思维。

二、实验方法与步骤要求

1. 实验方法描述：

①熟悉实验环境

熟悉实验环境的过程类似于真实实验中学习仪器设备的使用过程。本实验教学项目的开发环境是“南京大学环境虚拟仿真实验平台”，主要应用的是 SD 计算模块。本实验过程中涉及库、变量、转换器、流、链接、影子图元等图元的操作。

②构建实物模型

在开展区域物质循环动态模拟模型建模之前，首先需要从物理层面思考模型的现实意义，包括物质循环的具体过程、途径和方式，这样有助于我们建立对物质循环动态过程的直观认知，从而有助于我们

开展进一步的环境系统分析。

③环境系统分析

环境系统分析就是将我们设定的环境系统边界内的要素、层次结构及其相互联系进行定性刻画,对于开放系统还需要考虑要素与外界的相互作用。本实验中将区域磷循环系统划分为 13 个子系统(图中 $N1 \sim N13$)和 1 个边界条件(图中 $N14$),之所以做这样的划分是为了将复杂磷循环问题进行简化,从而各个击破。同学们可以通过分工协作完成整个系统构建。

④物质循环过程分解

以磷循环为例,大体上可以将其分为 3 个部分:自然过程、生产过程及消费与处置过程。

自然过程主要包括大气子系统($N1$)、非耕地子系统($N2$)、内陆子系统水体($N3$)和海洋子系统($N4$),这些子系统与其他的子系统都存在物质上的交换,我们需要分别对这些过程进行识别,并且提出定量计算的方法。

生产过程是人类活动的主要方式之一,它承载了大量资源的直接消耗以及污染的直接排放,是环境问题的产生的直接原因,因此是物质循环及其环境效应研究的一个重点内容。对于区域磷循环而言,首先需要考虑的是磷矿采选子系统($N5$),这是磷资源的主要来源,然后就是磷化工生产子系统($N6$),这是磷资源得以被人类利用的主要途径。区域磷循环中最重要的部分就是农业种植子系统($N7$)和畜禽养殖子系统($N8$),这两个子系统之所以重要是因为一方面它直接关系到粮食安全问题,是磷资源的重要使用途径,同时在这两个过程中产生了大量的磷排放,进而导致水体富营养化问题的产生。另外,这

两个系统也比较复杂，涉及各种农作物产品和畜禽产品的定量刻画。水产养殖子系统（N9）是直接能够导致水体污染乃至富营养化的一个人类活动子系统，目前也受到越来越多人的关注。农产品加工子系统（N10）是对所有的农产品的进一步精加工，其中加工过程中可能存在粮食浪费和环境污染问题，这也是本实验项目需要刻画的。

消费与处置过程与生产过程不同，一方面，其本身也是重要的环境污染源；另一方面，对于消费过程而言，每一个消费者都需要承担产品全生命周期过程中的环境污染，因为消费是产品的最终目的。消费与处理处置过程主要是由居民消费子系统（N11）、和废物处理子系统组成，其中废物处理子系统又可以分为废水处理子系统（N12）和固废处置子系统（N13）。这3个子系统构成区域磷循环生命周期的终端，而它们也可以成为生命周期的起点。这里我们需要做的就是实现物质“从摇篮到坟墓”向“从摇篮到摇篮”的转变。

⑤演示案例操作

为了让学生能够理解上述环境系统分析的原理及区域磷循环分析的建模思路，在实验过程中提供了一个演示案例，即畜禽养殖系统的磷流核算模块（具体参见学生交互性操作步骤说明）。通过这个演示案例，学生能够进一步了解区域物质循环的建模思路及操作方法。

⑥分组实验

为了保证整个项目能够完成，需要将学生进行分组，每组4~5人，每人负责2~3个模块的建模工作，最后将所有人的建模工作汇总并在此基础上构建一个完整的区域磷循环动态虚拟仿真系统模拟模型。

⑦模型改进

为了让模型更加趋近于反映真实情况，并且挖掘出各个影响因素

之间的内在联系，可以让学生通过对模型结构、输入条件、模型参数等方面进行系统修改，这个可以结合现场调研和采样实测的数据进行改进。

⑧案例分享

最终，不同的实验小组可能演绎出不同的实验模型和实验结果，通过组织口头汇报的方式，让不同的实验小组进行案例分享。一方面锻炼学生的逻辑思维，另一方面锻炼学生的口头表达能力。



图 5 实验方法流程图

2. 学生交互性操作步骤说明：

本实验教学项目是开放式实验，因此除了演示实验外，其余的实验都由学生自己设计、操作。那么，交互性的操作贯穿于整个实验过程中。这里以演示实验为例，简单地介绍一下演示实验过程中学生交互性操作步骤。演示实验分为两个部分：畜禽养殖系统磷循环模拟和3D 动态仿真演示。具体操作步骤如下：

①通过实验项目网站 <https://www.njumce.com/envirlab/> 进入

登录界面（如图 6 中 A 图所示）。点击“登录&注册”按钮即可以进入用户名和密码的输入界面（如图 6 中 B 图所示），然后点击“Login”，当用户名和密码输入无误时，就可以进入“南京大学环境虚拟仿真实验平台”界面（如图 6 中 C 图所示）。这样，学生就可以在这个界面上开展实验分析。



图 6 虚拟仿真实验登入界面与操作平台

②根据模型框图，在实验平台上构建畜禽养殖系统磷循环概念模型。在构建概念模型的过程中，需要用到操作界面任务栏上“添加图元”中“添加库”（用来表示磷循环子系统）、“添加变量”（用来表示模型参数）和“添加转换器”（用来表示人类活动水平大小的时间序列变化），以及“流/转换”（用来刻画磷流）和“链接”（用来表示流与变量之间的关系）。所有的图元都可以替换成图片，这样可以提高概念模型的展示度。最后构建好的概念模型可以参考图 7 给出的样例。

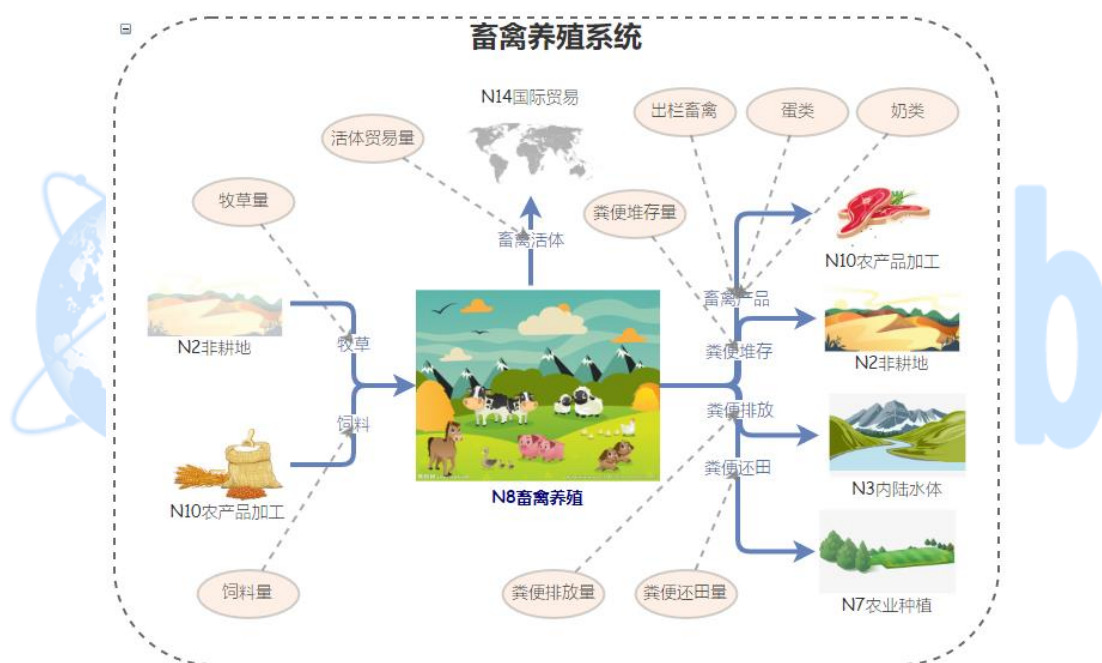


图 7 畜禽养殖系统演示案例

③建立畜禽养殖系统磷循环的数学模型，该数学模型主要是通过作图的方法来实现的，对于畜禽养殖系统而言，大体可以分为以下 10 个步骤：

第 1 步：构建畜禽活体贸易含磷量核算模型，该模型主要用来计算每年净出口畜禽含磷量（如图 8 所示）。

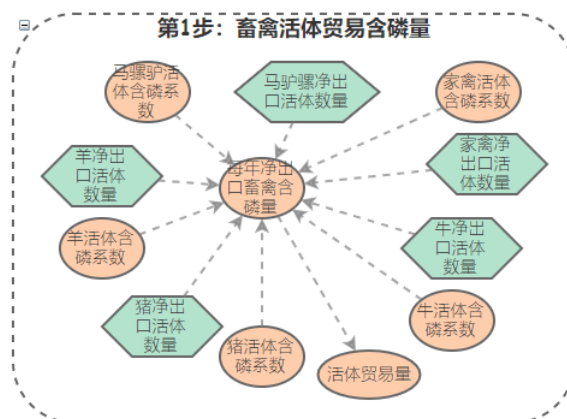


图 8 畜禽活体贸易含磷量计算

第 2 步：构建出栏畜禽含磷量核算模型，该模型主要用来计算每年出栏畜禽含磷量（如图 9 所示）。

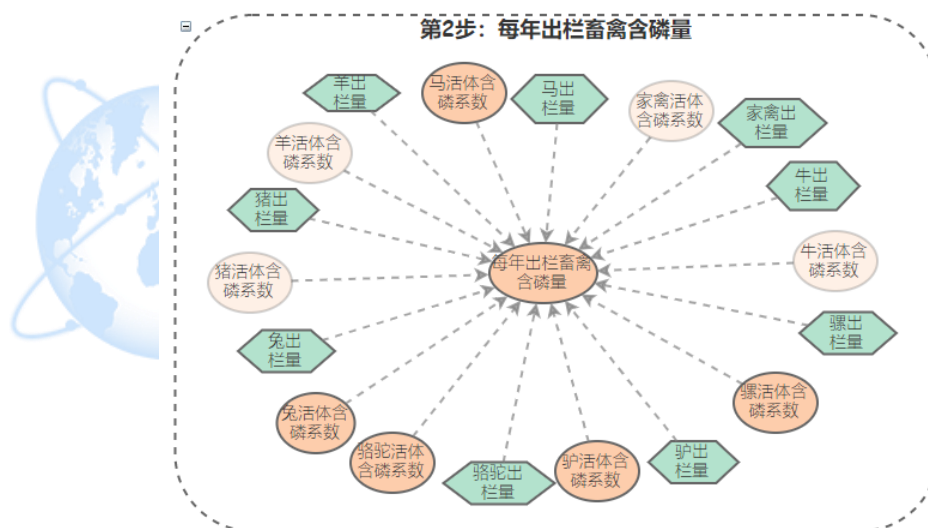


图 9 出栏畜禽含磷量计算

第 3 步：构建存栏畜禽含磷量年际变化核算模型，该模型主要用来计算存栏畜禽含磷量年际变化（如图 10 所示）。

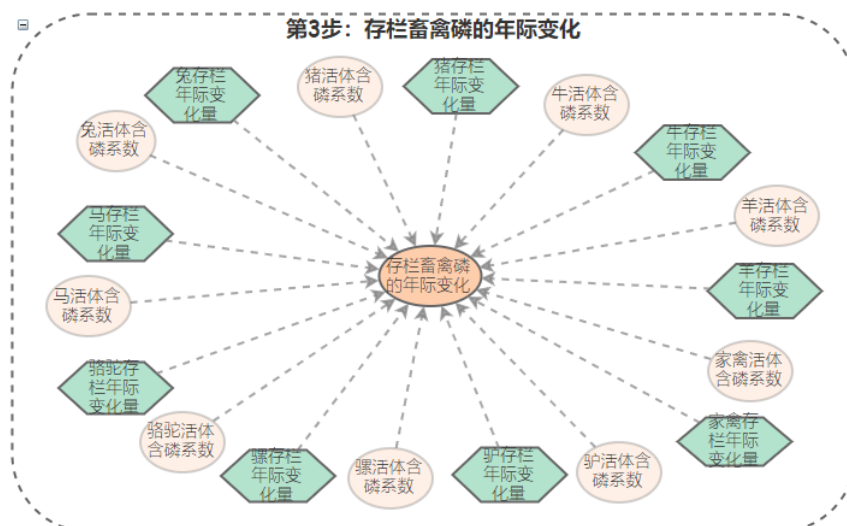


图 10 存栏畜禽含磷量年际变化

第 4 步：构建畜禽粪便含磷量核算模型，该模型主要用来计算畜禽粪便含磷量（如图 11），为后续计算其他待定变量做准备。

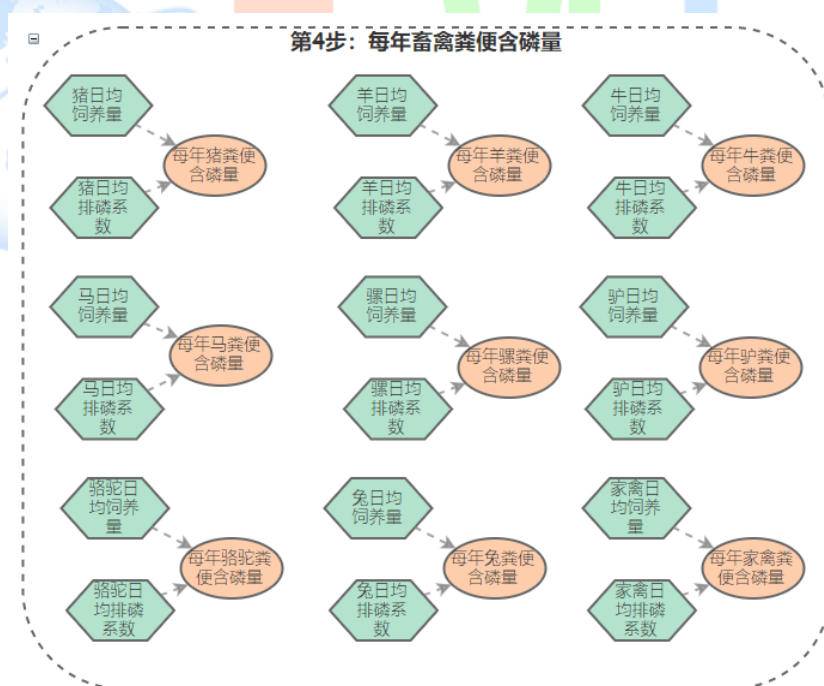


图 11 畜禽粪便含磷量计算

第 5 步：构建畜禽产品含磷量核算模型，分别用来计算出栏畜禽、蛋类、奶类的含磷量（如图 12 所示）。

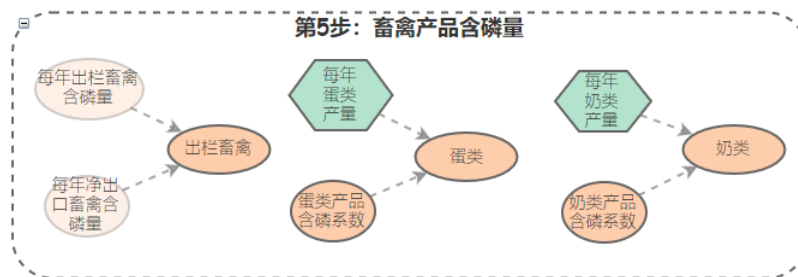


图 12 畜禽产品含磷量计算

第 6 步：构建畜禽粪便堆存含磷量核算模型，该模型主要用来计算排入非耕地畜禽粪便含磷量（如图 13 所示）。

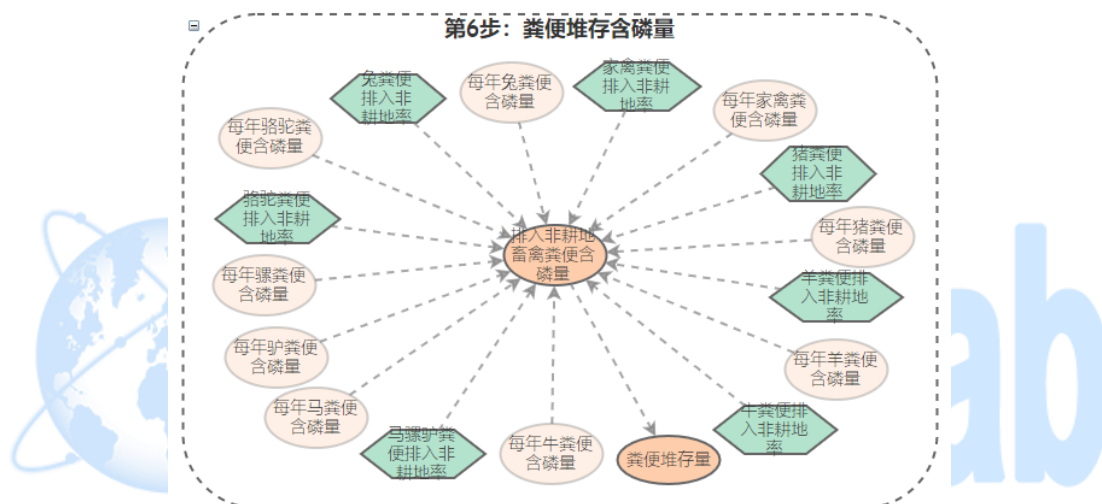


图 13 畜禽粪便堆存含磷量计算

第 7 步：构建畜禽粪便排放含磷量核算模型，该模型主要用来计算排入水体的畜禽粪便含磷量（如图 14 所示）。

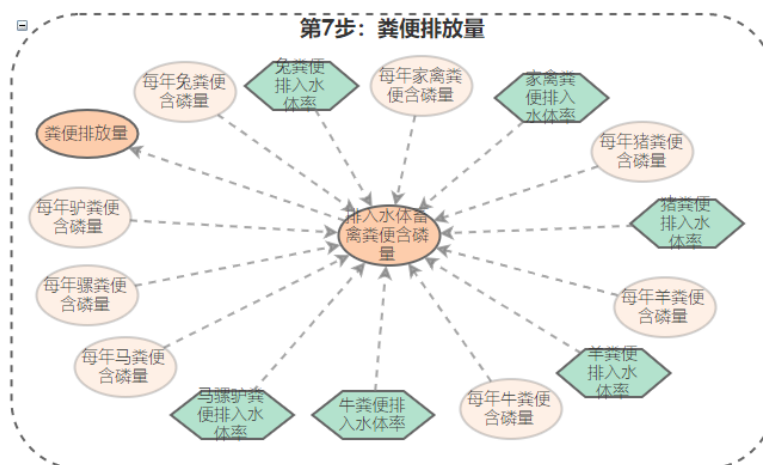


图 14 畜禽粪便排放含磷量计算

第 8 步：构建畜禽粪便还田含磷量核素模型，该模型主要用来计算排入农田中的畜禽粪便含磷量（如图 15 所示）。

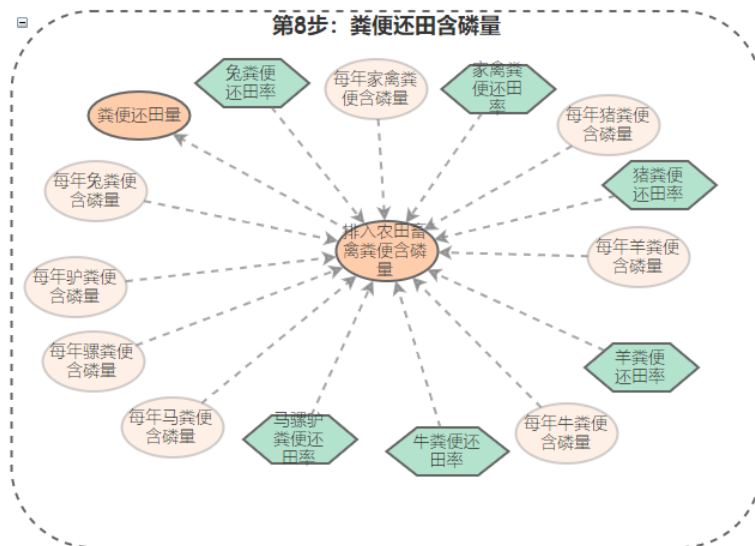


图 15 畜禽粪便还田含磷量计算

第 9 步：构建牧草含磷量核算模型，在本实验中，牧草含磷量是通过食草畜禽投入产出量进行平衡计算出来的（如图 16 所示）。

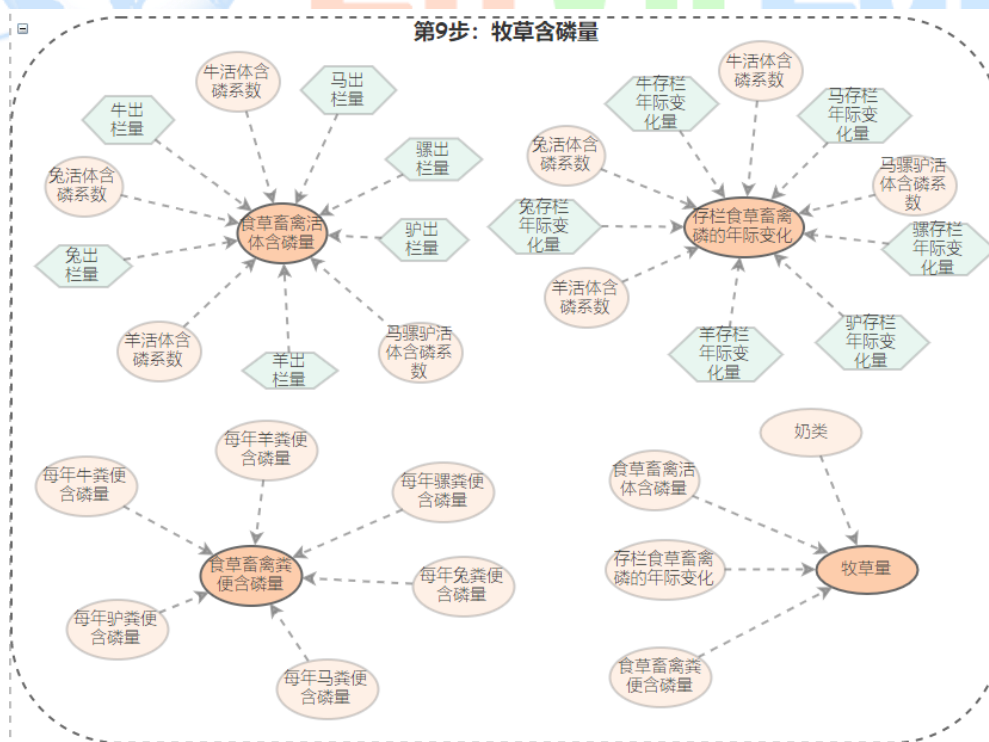


图 16 牧草含磷量计算

第 10 步：构建饲料含磷量核算模型，饲料含磷量也是通过系统平衡然后扣除牧草含磷量计算得到的（如图 17 所示）。

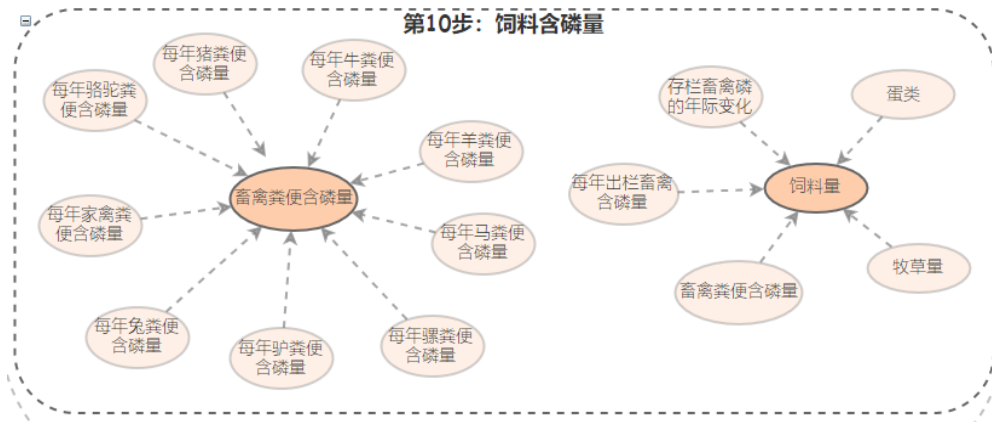


图 17 饲料含磷量计算

④设定模型表达式、模型参数和活动水平时间序列。操作方式是通过点击变量上面的“=”跳出的窗口来设定（分别如图 18、图 19、图 20 所示）。

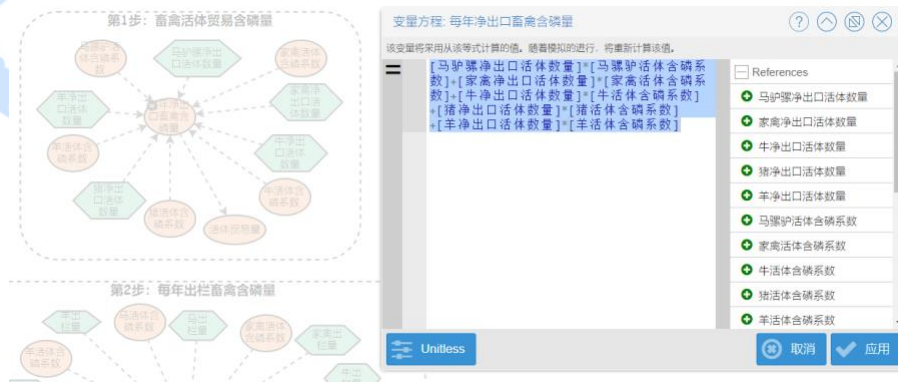


图 18 模型表达式设定



图 19 模型参数设定

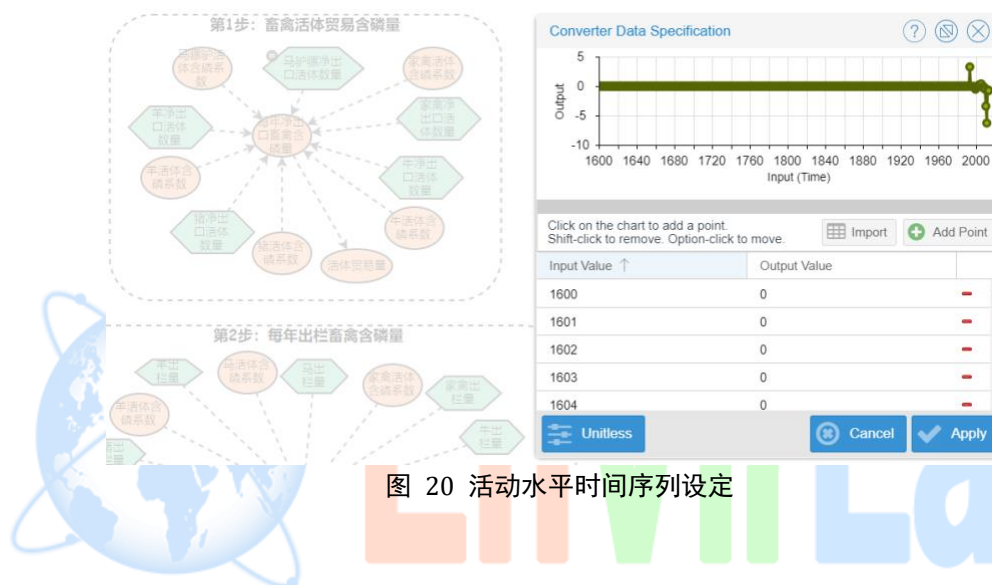


图 20 活动水平时间序列设定

⑤为了实现交互式模拟，可以对关键变量设置滑块，同时设置滑块的最大值和最小值（具体可以参考 Error! Reference source not found. 中给出的关键参数范围），设置滑块的方法及设置的结果如图 21 和图 22 所示。

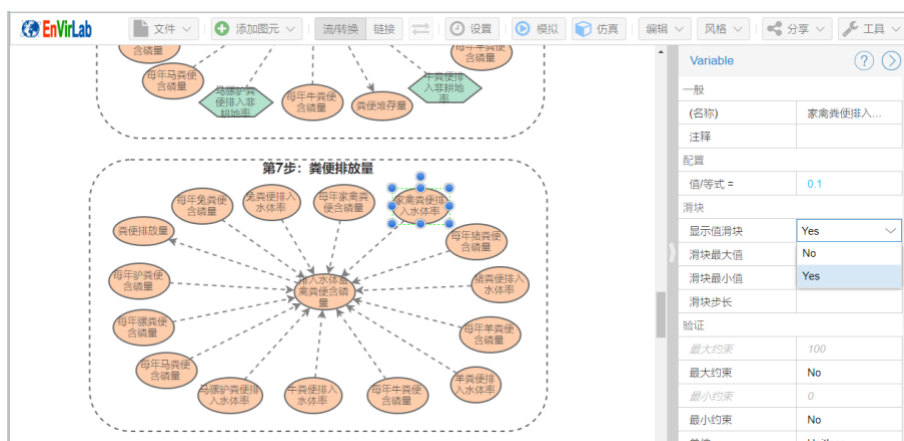


图 21 关键变量滑块的设定

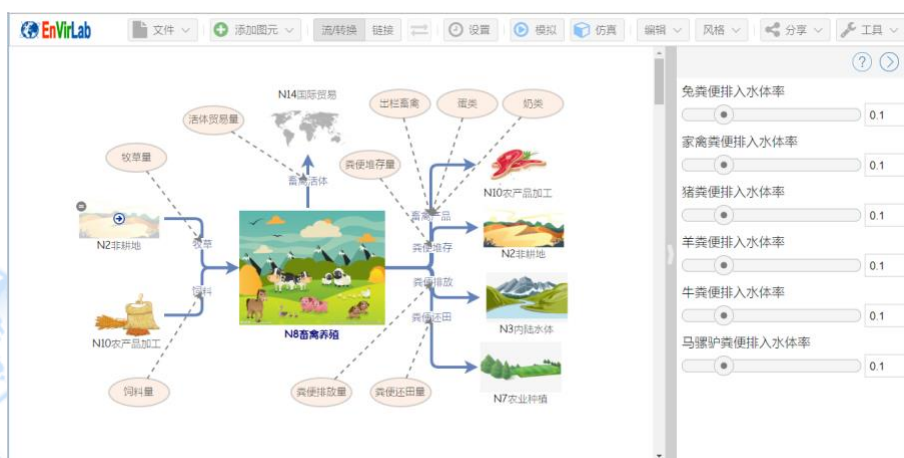


图 22 滑块设定后的界面

⑥点击模拟按钮进行系统模拟，绘制模拟曲线。畜禽养殖系统的模拟结果如图 23 所示。

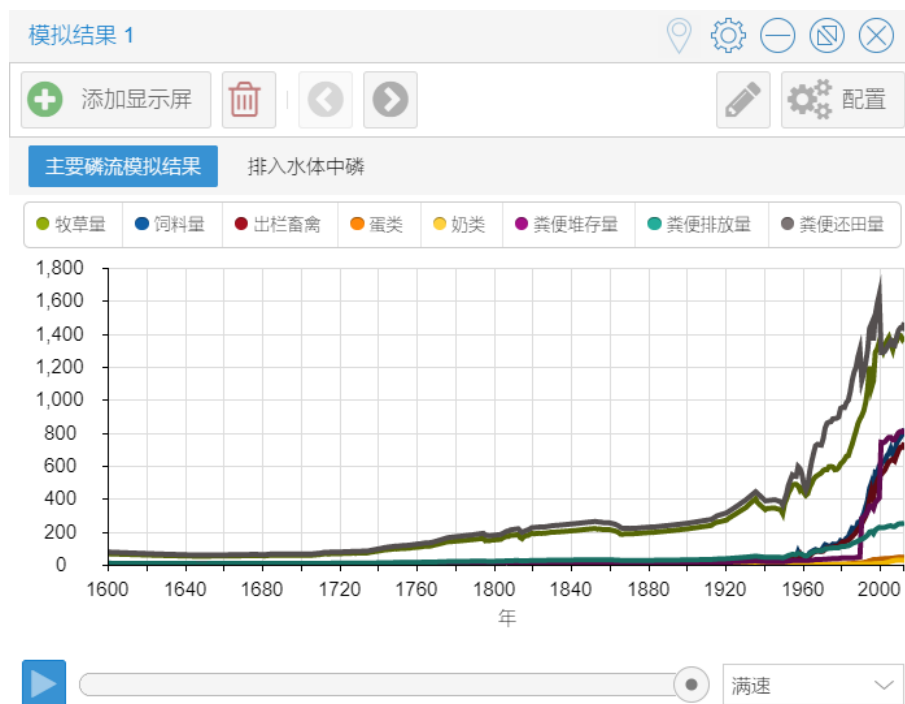
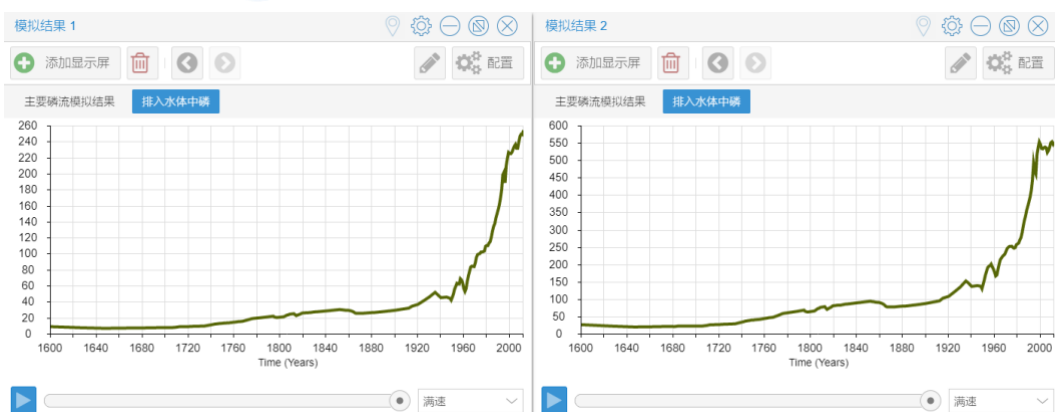


图 23 畜禽养殖系统的模拟结果

⑦拖动滑块（比如将“牛粪便排入水体率”从 0.1 增加到 0.5），这时可以比较两次模拟出来的排入水体中的磷的量，看二者发生了怎样变化。



⑧当全部模拟结束后，点击工具栏上的“仿真”按钮就可以对模拟的结果进行系统 3D 仿真，对于畜禽养殖系统而言，其 3D 演示效果如图 24 所示。



图 24 畜禽养殖系统磷流 3D 效果

⑨点击系统 3D 仿真系统中的面板按钮，选取不同的参数，分析参数对其他结果的影响（如图 25 所示）。

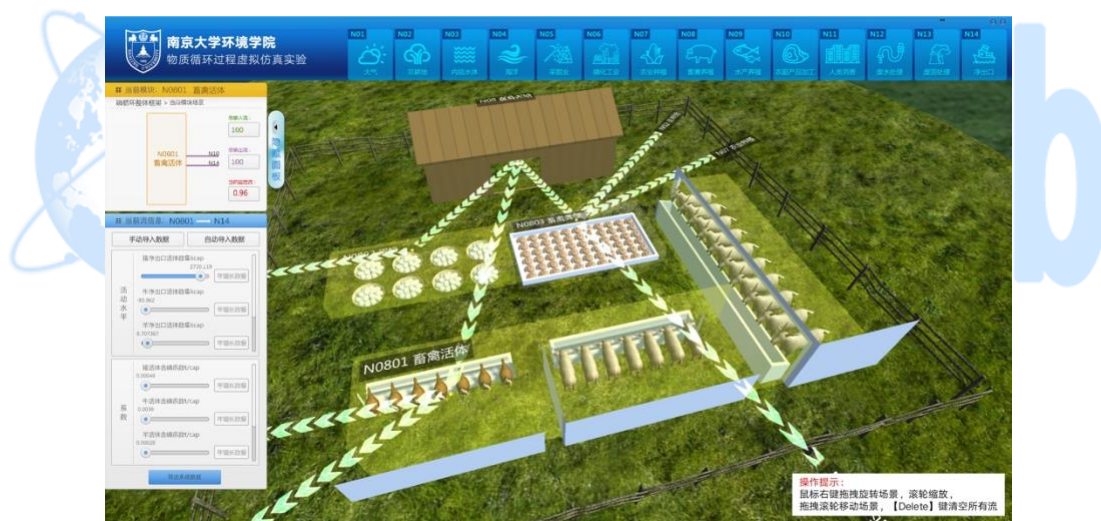


图 25 参数对模拟结果的影响

⑩重复以上步骤，对磷循环的 13 个子系统进行逐一模拟，最后得到完整的磷循环 3D 图谱（如图 26 所示）。

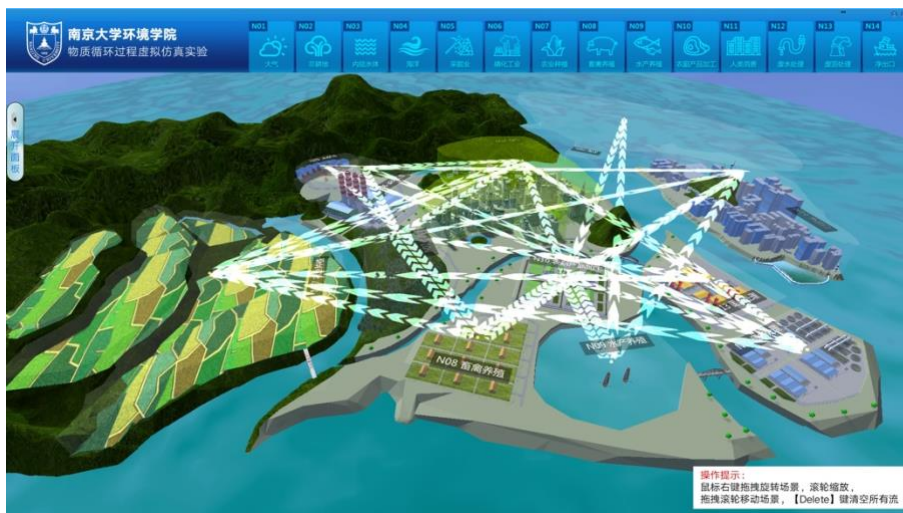


图 26 磷循环全局模拟图谱

三、实验结果与结论要求

(1) 是否记录每步实验结果: ☒是 ☐否

(2) 实验结果与结论要求: ☒实验报告 ☒心得体会 其他 ☐分享交流

(3) 其他描述:

实验教学项目要求学生记录每一步的实验结果, 并且按照标准化的实验报告格式进行整理 (如图 27 所示)。实验报告要求包含以下内容: 实验目的与要求、实验原理与内容、实验设计与步骤、实验结果与讨论、实验改进与创新、实验结论与体会。由于是分组实验, 所以并不要求每个学生把 13 个子系统的实验内容全部完成, 只需要在实验报告中写明自己完成的部分, 以及对模型结果的理解与模型改进的讨论。但是在口头汇报的时候, 要求以小组的形式完整汇报 13 个子系统的内容。

实验步骤和实验结果都可以通过南京大学环境虚拟仿真实验平台导出, 并且通过“讲述”这个模块实现对实验过程的说明和分享。

《物质循环过程虚拟仿真实验》实验报告

学号		姓名		专业班级	
实验地点		指导老师		时间	
<p>一、实验目的与要求</p> <p>二、实验原理与内容</p> <p>三、实验设计与步骤</p> <p>四、实验结果与讨论</p> <p>五、实验改进与创新</p> <p>六、实验结论与体会</p>					
<p>教师评语：</p> <p>签名：</p> <p>日期： 年 月 日</p>					

图 27 实验教学项目实验报告样表

四、考核要求

考核采用“加分制”的规则，不限定分数上限，通过所有参与学生的成绩排序采用正态分布的算法来将最终得分转化为百分制。

具体得分点如下：

（1）基础实验分：系统理解分（5分）、模型框架分（5分）、模型美化分（5分）、模型操作分（5分）、模拟结果分（5分）、结果解释分（10分）、故事演绎分（10分）、口头汇报分（5分）

（2）实践检验分：问卷调查分（10分）、参数实测分（10分）、企业访谈分（10分）、文献调研分（10分）

（3）模型改进分：补充数据（5分）、补充计算公式（5分）、结果验证与比较（5分）、增加模型反馈（15分）、颠覆模型分（30分）

（4）组织协作分：团队队长分（5分）、分工协作分（5分）、互帮互助分（5分）