

# 句容水库流域氮输移研究

胡小丽

(西北勘测设计研究院规划设计分院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 将 SWAT 模型应用于苏南句容水库流域, 模拟了流域内不同土地利用类型上植物吸收的氮, 有机氮和硝态氮输出。结果表明: 旱地、水田、林地上植物吸收的氮较大, 有机氮输出量从大到小依次为旱地 > 林地 > 水田 > 居民区 > 水域 > 建设用地, 旱地和水田上随地表径流、壤中流、地下径流输出的硝态氮都较其它土地利用类型多, 同时还分析了氮的年内输出规律, 结果表明氮的输出都集中在降雨较大的月份。

**关键词:** SWAT 模型; 氮输移; 土地利用; 句容水库流域

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0059-04

## Study on nitrogen transport in Jurong reservoir basin

HU Xiaoli

(Planning and Design Department, Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** SWAT model was used in Jurong Reservoir basin in this paper and the nitrogen absorbed by plant, organic nitrogen and nitrate nitrogen output were simulated. The result shows that the nitrogen absorbed by plant is relatively large in upland, paddy field and forestland, and the from sequence of organic nitrogen output from big to small is upland, forestland, paddy field, residential area, water region construction site. In upland and paddy field, the  $\text{NO}_3\text{-N}$  from surface runoff, interflow and subsurface runoff are much more than those in other land use types. Meanwhile, the annual output law is also analyzed, and the result shows that the nitrogen output mainly appears in ample flow month.

**Key words:** SWAT model; nitrogen transport; land use; Jurong reservoir catchment

目前,关于氮污染的研究已经成为土壤学家、环境学家、农学家等共同关注的热点问题之一。农业流域的水分氮素循环模拟是进行氮污染研究的基础,是作物估产、环境评价、农田管理、决策制定和长期预测的重要依据,对提高氮肥利用率、防止或减轻环境污染具有重要的理论和实践意义<sup>[1-2]</sup>。

SWAT 是由美国农业部 (USDA) 农业研究局 (ARS) 开发的一个流域尺度的物理模型,它适用于包含多种土壤、土地利用类型和农业管理措施的复杂流域,主要用来模拟和预测土地利用、土地经营管理方式等对流域水量、水质等方面的影响<sup>[3]</sup>。SWAT 模型已应用在德克萨斯州的 Bosque 流域,证实了模型能很好地模拟畜牧业生产所产生的面源污染<sup>[4]</sup>。SWAT 模型在国内的运用主要体现在径流模拟、非点源污染模拟以及产沙模拟三个方面。杨桂莲、郝芳华等以洛河流域为例,对基流进行了模拟,结果发现模拟精度较高<sup>[5]</sup>;苏保林等以密云水库流

域为研究背景,在对流域内各类污染源调查的基础上,建立了基于 SWAT 模型的密云水库流域非点源模型系统<sup>[6]</sup>;张雪松等在河南卢氏流域应用 SWAT 模型进行中尺度流域的产流产沙模拟试验,结果表明 SWAT 模型在研究区对流域长期连续径流和泥沙负荷模拟具有较好的适用性<sup>[7]</sup>。

本文将 SWAT 模型运用于苏南典型农业流域——句容水库流域,在对流域内各项氮输入进行调查的基础上,结合流域地形、土地利用、土壤、气象等数据,对流域内不同土地利用类型上的氮输移情况进行了模拟。

## 1 研究区域概况

### 1.1 研究区域概况

句容市地处长江下游南岸,江苏中部,东连镇江,西接南京。句容水库则位于句容市东部丘陵山区的句容河上游,属秦淮河水系,距句容城区 4 km

收稿日期:2012-02-18; 修回日期:2012-04-10

基金项目:国家自然科学基金国际合作项目(40610173)资助

作者简介:胡小丽(1985-),女,陕西安康人,硕士研究生,助理工程师,主要从事水资源规划与利用方面的工作。

处,水库总库容量为 2 668 万  $\text{m}^3$ ,集水面积为 45.8  $\text{km}^2$ 。区内气候湿润,土地肥沃,年平均降雨量为 1 066 mm。该区以水稻种植为主,属于典型的农业流域,主要的土壤类型为水稻土和黄棕壤。为了获得连续稳定的高产,该区农药化肥施用量一直呈增长趋势。过量施用化肥使得土壤营养盐含量出现盈余,氮作为最重要的营养盐之一,其流失既可造成土壤生产力衰退,又可引起水体富营养化,为此有必要对氮的收支情况进行定量研究,从而为控制和减少农业流域的氮污染提供一定的依据。

## 1.2 研究区域氮的输入

农村非点源调查分析的主要对象为农业人口数量、农村综合污水、化肥农药使用和分散式饲养禽畜废水等<sup>[8]</sup>。句容流域主要的氮输入来源如下:

(1)大气氮沉降。大气氮沉降包括两种形式,干沉降和湿沉降。由于资料的缺乏,本文仅考虑湿沉降,通过实验观测,计算得句容水库流域氮的平均沉降为 32  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2)农业化肥。农业氮肥被大量的用作提高农作物的产量,但农作物对氮肥的利用率很低,相当大一部分氮肥通过氨挥发、径流、淋失等损失排放到大气和水中。据统计,流域水田施入尿素中的总 N 量为 707.5 t,施入复合肥中的总氮量为 153.8 t;流域旱地施入尿素中的总氮量为 945.8 t,施入复合肥中的总氮量为 305.5 t。

(3)人畜粪便。据统计,流域总人口 42 297 人,家禽数量分别为鸡 35 503 只,羊 239 只,流域养猪的数量约为 3 443 头,养牛 400 头。然后按照每人每年排放的氮为 3.5 kg,单位数量的鸡、羊、猪、牛每年排放的氮分别为 0.6、50 675、8.1、95.9 kg,最终流域总的有机氮输入约为 180 t。

## 2 句容水库流域数据库的构建

### 2.1 模型数据库的建立

(1)空间数据库。为了进行模拟,需要输入的基础空间数据库为 DEM 图,土地利用图和土壤类型图,在本研究中,所有的空间数据均采用 Transverse-Mercator 下的 Krasovsky-1940 投影系统。

在句容流域模拟中,使用国家基础地理信息系统全国 1:25 万地理坐标 DEM,本研究建立的句容水库流域数字高程模型(DEM)如图 1 所示。

为适应污染负荷模拟的要求,根据土地利用类型原来的分类情况,将区域土地利用类型图转化为 grid 格式,并对土地利用类型进行重新分类与编码,

最终分为水田,旱地,林地,建设用地等 7 种类型。

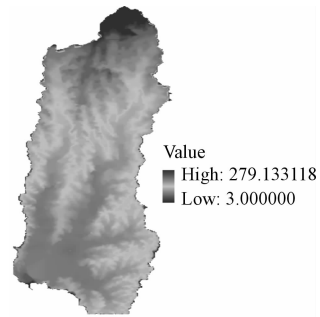


图 1 句容水库流域 DEM 图

土壤类型对于氮的模拟也是非常重要的,为适合 SWAT 模型污染物质模拟的需要,将土壤类型概化为黄棕壤、淹育型水稻土、侧渗型水稻土、潜育型水稻土等 7 类<sup>[9]</sup>。

(2)属性数据库。模型中用到的土壤数据分为物理属性数据和化学属性数据两大类。根据我国土壤分类系统,参考江苏土壤和江苏土种志,确定土壤土层厚度等参数值。土壤化学属性数据包括土壤中  $\text{NO}_3^-$ 、有机氮的起始浓度等,通常取实测值为参数初值。

模型所需要的气象数据包括流域的日降水量,最高、最低气温、太阳辐射和相对湿度。本研究采用 2005-2007 年的逐日降水,日最高、最低气温数据,由于缺乏观测资料,其余气象数据均采用 SWAT 的气象发生器自动生成。

(3)亚流域划分。应用 SWAT 模型对流域水系进行模拟。然后根据设定的亚流域面积阈值和亚流域出水口与进水口的位置,进行亚流域的划分,最终将句容水库流域划分为 6 个亚流域。

(4)水文响应单元的划分。在亚流域划分好的基础上,继续将每个亚流域划分为多个水文响应单元(HRU)。本研究中,土地利用和土壤面积的最小阈值均定为 10%,从而把子流域划分为多个不同土地利用和土壤类型的组合,即 69 个 HRUs。

### 2.2 模型的率定与验证

在本次研究中,在月模拟的基础上,利用句容水库 2005、2006 年的实测流量资料对模型进行率定,2007 年的实测资料进行验证。同时 2007 年的氮浓度监测数据对氮负荷模型进行验证,选用相关系数 ( $R$ )以及 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数 ( $E_{ns}$ )为指标来评价模型的适用性。其中率定期 2005 年的  $R^2$ 、 $E_{ns}$  分别为 0.97、0.85;2006 年的  $R^2$ 、 $E_{ns}$  分别为 0.84、0.63;率定期的实测流量与模拟流量的对比如图 2、图 3。验证期 2007 年的  $R^2$ 、 $E_{ns}$  分别为 0.92,

0.84, 验证期的实测流量与模拟流量的对比如图 4。实测与模拟的  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度对比如图 5, 计算出的  $R^2$  和  $E_{ns}$  分别为 0.89 和 0.88。

根据前述模型评估标准, 模拟效果都是令人满意的。从模拟值和实测值流量过程线来看, 二者也比较吻合, 模拟效果较为理想。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同土地利用类型氮的输出

不同的土地利用类型有着不同的自身特性, 因此每种土地利用类型的氮输移特性也各不相同。各种不同土地利用类型面积比例如表 1, 由于园地所

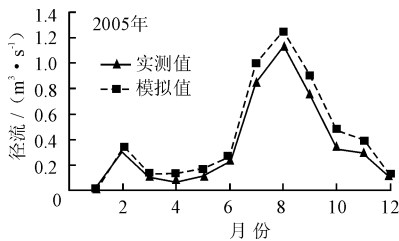


图 2 率定期实测与模拟的月径流

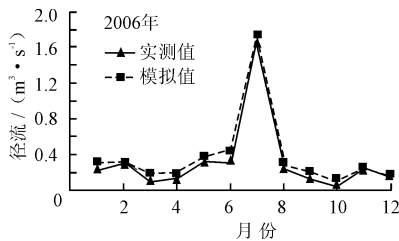


图 3 率定期实测与模拟的月径流

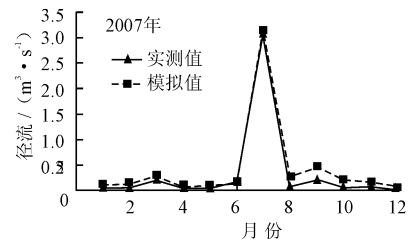


图 4 验证期实测与模拟的月径流

表 1 主要土地利用类型所占比例

土地利用类型	水域	林地	旱地	建设用地	居民区	水田	园地
面积	399.4	1269.5	1148.4	731.6	261.2	107.8	25.8
面积百分比	10.1	32.2	29.1	18.6	6.6	2.7	0.7

表 2 不同土地利用类型上氮的输出  $\text{kg}/\text{hm}^2$

土地利用类型	植物吸收氮	有机氮输出	随地表径流输出的硝态氮	随壤中流输出的硝态氮	随地下径流输出的硝态氮
水域	1.21	3.78	0.28	0.01	7.95
林地	1.35	7.10	1.26	0.01	8.02
旱地	2.90	14.42	1.36	0.02	14.29
建设用地	1.17	2.61	1.07	0.01	3.80
居民区	1.10	4.41	1.01	0.02	3.42
水田	2.15	6.59	0.87	0.02	7.90

有机氮通常是吸附在土壤颗粒上随径流迁移的, 这种形式的氮的迁移与土壤流失密切相关。从图 7 可知, 有机氮输出量从大到小依次为旱地 > 林地 > 水田 > 居民区 > 水域 > 建设用地。其中从旱地输出的有机氮最多, 主要原因是一方面旱地广泛施用农家肥, 土壤中有机氮含量相对较高, 另一方面旱地上人为影响频繁, 因而其土壤流失量较其它土壤类型上的大。

硝态氮主要随地表径流、壤中流或地下水在水中迁移, 见图 8 ~ 图 10, 从图可以看出, 随地表径流输出量大小依次为旱地 > 林地 > 建设用地 > 居民区 > 水田 > 水域, 因为旱地施肥量大, 其次旱地上耕

占面积仅为 0.7%, 因此主要针对旱地、林地、建设用地和水田等作分析。通过对流域上 29 个水文响应单元的模拟计算, 得到 2005 - 2007 年不同土地利用类型氮的输出, 通过统计分析, 得到年平均状况下不同土地利用类型氮的输出。其结果见表 2。

不同作物对氮素的吸收量不同, 水稻、小麦、高粱、玉米等禾谷类作物, 以及棉花、蔬菜、果树是需氮较多的作物, 氮肥的施用量应大些。旱地粮食作物小麦、玉米、高粱等都属于深根作物, 一般都有着庞大的根系, 一般均能吸收较多的氮肥, 水田这两种土地利用类型上, 植物吸收的氮较其它的土地利用类型多。不同土地利用上植物吸收的氮的对比如图 6。

作频繁, 土壤经常受到扰动, 所以旱地产生的地表径流较大, 从而随地表径流迁移的硝态氮较多。林地、建设用地区表面紧密坚实且裸露, 增加雨水径流侵蚀, 加速营养物质循环, 进而导致地表水营养物质富集, 因此林地和建设用地上随地表径流输出的氮也相对较高。尽管水田施肥量大, 但其持水量高而且地势低平, 土壤中硝态氮的含量不高, 且不容易随径流发生迁移。

#### 3.2 氮输出的时间分布

由于氮的迁移特征是污染物以水土流失为主要输移途径, 而降雨与径流是土壤流失的主要动力。因此, 每年的雨季是氮迁移和扩散的重要时段, 氮的输出见表 3。

综合以上分析可以看出: 两种形态氮的产出都几乎集中在降雨较大的月份。降雨量越大, 径流量越大, 泥沙量也越大, 因而随着大量水流和泥沙必然同时也携带大量的氮的输出。对上面 3 年的分析可以看出, 在降雨较多的月份氮的产出较降雨较少的月份多, 这一点也验证了氮的产生是伴随着降雨径流过程生成的。

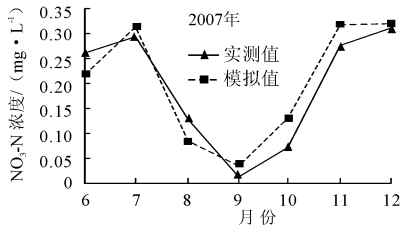
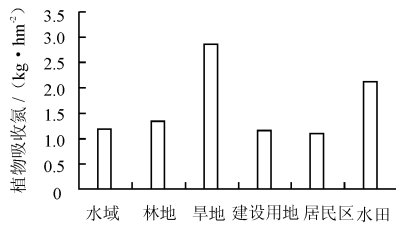
图5 实测与模拟的 NO<sub>3</sub>-N 浓度

图6 不同土地利用类型植物吸收的氮

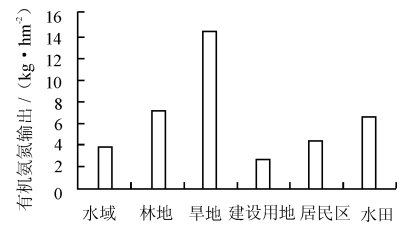


图7 不同土地利用类型有机氮输出

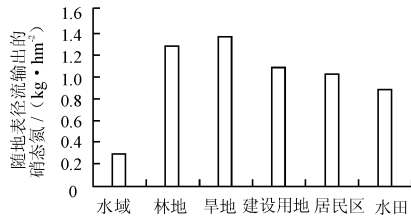


图8 随地表径流输出的硝态氮

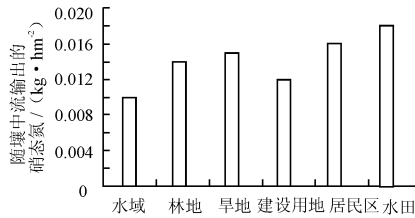


图9 随壤中流输出的硝态氮

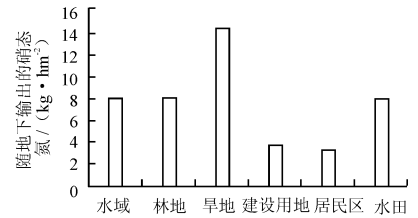


图10 随地下径流输出的硝态氮

表3 逐月氮负荷贡献率

mm, kg/km<sup>2</sup>

月份	降雨量			有机氮			硝态氮		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
1	27.0	75.0	13.0	0.00	7.21	1.25	0.07	29.69	26.97
2	55.0	46.6	52.1	97.38	57.97	41.62	99.96	36.38	10.11
3	29.5	13.0	67.6	37.51	7.32	82.05	248.04	32.53	33.06
4	56.0	92.6	55.0	139.06	140.31	34.50	103.82	32.01	38.10
5	46.0	109.0	24.5	98.91	252.84	17.08	59.02	34.35	12.11
6	81.0	100.0	139.0	224.67	662.01	277.51	14.21	34.78	19.24
7	182.0	236.0	344.0	695.20	522.71	1176.20	42.29	48.36	79.35
8	165.5	68.0	71.5	510.04	22.27	14.68	60.90	65.63	76.09
9	84.0	56.0	104.7	87.77	22.40	56.99	55.59	33.45	68.23
10	54.0	4.0	35.0	23.38	0.12	16.55	56.44	0.65	61.38
11	35.0	65.0	22.0	84.21	128.84	9.31	49.56	16.36	15.37
12	10.0	5.0	24.5	0.00	0.18	6.36	1.45	1.55	0.23

## 4 结 语

本文将 SWAT 模型运用于苏南典型农业流域——句容水库流域,并利用句容水库 2005-2007 流量资料及 2007 年氮浓度监测数据对模型进行了率定和验证,评价系数达到规定的精度要求,从而验证了模型在该地区的适用性。利用该模型,计算了不同土地利用类型上植物吸收的氮,有机氮的输出,及随地表径流、壤中流、地下径流输出的硝态氮;同时还分析了流域有机氮和硝态氮在年内的时间分布,揭示出了流域的有机氮和硝态氮降雨、径流的年内流失规律。今后应加强野外观测试验,收集更多的有关氮的数据,进一步验证和完善模型的适用性。

### 参考文献:

- [1] 朱兆良, 邢光熹. 氮循环 - 维系地球生命不息的一个自然过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 唐国勇, 黄道友, 童成立. 土壤氮素循环模型及其模拟研

究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 204-208.

- [3] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 24-120.
- [4] Saleh A, Arnold J G, Gassman P W, et al. Application of SWAT for the upper north Bosque River watershed[J]. Transactions of the American Society of Agriculture and Biological and Biological Engineers, 2000, 43(5): 1077-1087.
- [5] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 463-470.
- [6] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源模型系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 355-359.
- [7] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42.
- [8] 王鹏, 高超, 姚琪, 等. 太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1671-1675.
- [9] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤[M]. 中国农业出版社, 1996.