

# 应用 GLEAMS模型评估我国东南地区农业小流域硝态氮的渗漏淋失

王吉苹, 曹文志 (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:** 应用 GLEAMS模型估算我国东南亚热带地区农业小流域硝态氮的渗漏淋失。在五川流域 8种不同土地利用方式的农田中埋设渗漏监测装置, 每月采集水样分析硝态氮含量。用 2002年 4—12月作物生长季节的实测数据进行模型校验的结果表明, 模型对水稻田以外的其他土地利用方式下硝态氮渗漏淋失模拟效果较好。五川流域 2002年硝态氮淋失模拟计算结果表明, 不同土地利用方式下硝态氮淋失时空差异显著, 全年渗漏量(以氮计)为  $4.6438 \sim 38.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 流域面积加权平均为  $29.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。甘蔗地、香蕉地和蔬菜地的年硝态氮渗漏量最高, 渗漏峰值一般出现在 7—8月。降雨、土地利用和化肥施用等人类活动是影响硝态氮渗漏淋失的主要因素。

**关键词:** GLEAMS模型; 硝态氮; 渗漏; 农业流域; 五川流域

**中图分类号:** X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673 - 4831(2007)01 - 0028 - 05

**Assessing Nitrate Leaching With GLEAMS Model in an Agricultural Small Catchment in Southeast China** WANG Ji-ping, CAO Wen-zhi (State Key Laboratory of Marine Environmental Science/Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** GLEAMS model was introduced to calculation of nitrate leaching in an agricultural small catchment in Southeast China. Field experiments were carried out in farmlands under different land uses, such as paddy, banana, and vegetable cultivation, at Wuchuan catchment, Fujian Province. Lysimeters were set up in 8 plots different in land use to monitor nitrate leaching from April to December in 2002. After calibration and validation, the model displayed an acceptable performance in simulating nitrate leaching in all plots, except for the plot of paddy field. Results of the simulations show that nitrate leaching in the catchment varied from 4.64 to 38.39  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with land uses. Sugarcane, banana and vegetable fields had maximum nitrate leaching and peaked in July and August. Rainfall, land uses and management were significant factors influencing nitrate leaching in the catchment. The model simulations can be used to specifically establish best management practices for nutrient management and pollution mitigation in the catchment.

**Key words:** GLEAMS model; nitrate; leaching; agricultural catchment; Wuchuan catchment

我国已进行了大量有关氮素渗漏、淋失和迁移的研究, 主要是集中于田间尺度<sup>[1]</sup>, 而针对流域尺度、不同土地利用方式下硝态氮渗漏淋失特征的研究较少。由于大量实验监测工作量大、费用昂贵且费时较长, 因此模型被愈来愈多地应用到流域管理中, 以模拟农业面源化学物质的迁移和转化等过程。本研究应用 GLEAMS (groundwater loading effects of agricultural management systems)<sup>[2]</sup>模型对我国东南亚热带地区典型农业小流域不同土地利用方式下硝态氮渗漏淋失进行模拟和估算, 分析硝态氮渗漏淋失的特征, 为控制和削减流域农业面源污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

五川流域位于福建省九龙江中上游南靖县城东南部, 地处东经 117°29', 北纬 24°26'。流域面积 9.6  $\text{km}^2$ , 属亚热带海洋性季风气候区。2002年流域降雨量为 1 624 mm, 小于多年平均降雨量 1 720 mm。土地利用以林地 (42.7%) 和果园 (47.7%) 为

基金项目: 国家自然科学基金 (40301045, 40671116)

收稿日期: 2006-06-17

通讯联系人

主,另有少量水稻、蔬菜、水(渔)塘和居住用地(图 1)。在该流域曾开展过较多的定位研究工作,如对流域大气干湿沉降和地表降雨径流氮磷流失特征的分析、流域氮收支的估算、氮素污染关键源区的识别等<sup>[3-6]</sup>。

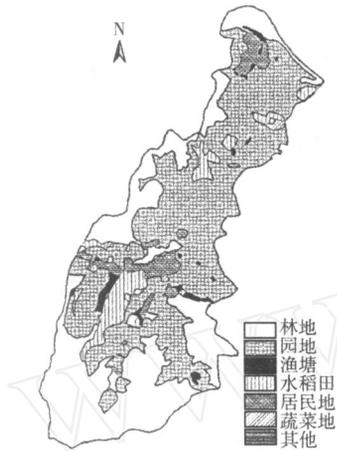
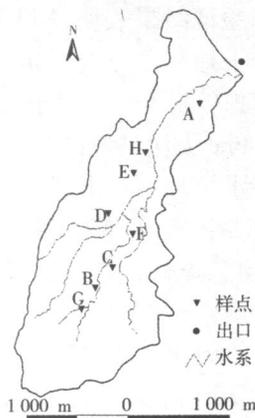


图 1 五川流域土地利用情况

Fig 1 Land uses in Wuchuan catchment

## 1.2 试验方法

选取流域主要的农业土地利用方式,在 8 种不同土地利用方式的地块中埋设渗漏装置,具体位置详见图 2。



A: 荒地; B: 香蕉地; C: 蔬菜地; D: 甘蔗地;  
E: 蔬菜水稻轮作地; F: 香蕉地; G: 蔬菜地; H: 水稻连作地

图 2 样点分布

Fig 2 Distribution of sampling holes in the catchment

渗漏装置由 PVC 管制成,直径 11 cm,上部开口,下部桶壁有小孔,装置埋设深度 1.52.5 m,低于枯水期时地下水位(表 1)。渗漏装置的埋设、原状土的复原等均按照 CAO 等<sup>[6]</sup>描述的方法进行。每

月采集 1 次水样,采集水样前读取地下水位,然后用泵抽干管内积水,24 h 后再抽取水样,进行水质分析。硝态氮的测定采用镉柱还原法(CB 17378.4—1998)。

表 1 各采样点的土地利用、施肥情况与采样深度

Table 1 Land use, fertilization management of sample sites and depth of sampling holes across the catchment

样点	土地利用方式	施肥情况	采样深度 /m
A	荒地	无肥料施入	1.5
B	香蕉地	有机肥、复合肥、尿素、碳氮、磷酸钾	2.0
C	蔬菜地	有机肥、复合肥、尿素、碳氮	2.0
D	甘蔗地	碳氮、磷酸镁钙	2.5
E	蔬菜水稻轮作	有机肥、复合肥、磷酸镁钙	1.7
F	香蕉地	尿素、碳氮	2.5
G	蔬菜地	有机肥	1.5
H	水稻连作	碳氮	1.7

## 1.3 GLEAMS 模型简介

GLEAMS 模型完善改进了美国农业局 (USDA) 20 世纪 80 年代中期开发的 CREAMS 模型<sup>[7]</sup>,综合考虑了气候、土壤和管理措施等因素的相互作用,用于模拟不同土地利用方式下植物根际区的水、沉积物、农药和氮磷等化学元素的迁移和转化<sup>[8-9]</sup>。GLEAMS 模型包括水文、侵蚀、化学物质和农药 4 个子模型。本研究仅涉及水文、侵蚀和化学物质 3 个子模型。模型的水文部分基于对植物根际区每日水量平衡的模拟,日潜在蒸散量计算采用 Penman-Monteith 方程<sup>[10]</sup>,径流量估算采用修正土壤保持径流曲线数值法<sup>[11]</sup>,渗漏水量计算采用 Storage-Routine 方法<sup>[12]</sup>。土壤侵蚀与沉积物流失量计算采用修正的通用土壤流失方程 (MUSLE)<sup>[13]</sup>。模型中化学营养物质子模型的氮循环包括矿化、固定、反硝化、氨挥发、豆科植物的氮固定、化肥和家畜粪肥的施用、植物吸收、径流、侵蚀和渗漏损失等过程;土壤有机氮分为可矿化氮和稳定氮,其中矿化考虑了氨化和硝化 2 个过程,速率取决于可矿化氮的数量,并受土壤温度和湿度的影响。

## 1.4 资料收集与模型参数准备

模型参数大致可分为 2 类。一类是在流域范围内固定不变的降雨量、日平均温度、每月最高和最低温度、月平均太阳辐射、月平均风速等参数,一般从当地气象站获取;一类是在不同地块之间可能会发生变化的径流曲线数、土地坡度、坡长、地表覆盖和作物因子、措施因子等参数,大部分通过田间调查与

现场试验并结合模型手册获取。有些参数如坡度、坡向等由数字高程模型(10 m精度)通过GIS软件提取,并根据实地核对后录入模型参数表中。

SCS径流曲线数CN的确定分为3个步骤,首先根据土壤质地确定土壤水文类别;然后根据土地利用和土壤水文类别查找模型手册所列出的对照表,确定一般湿度条件下的SCS-CN数值;最后再根据模拟前的土壤湿度条件和模型手册,调节SCS-CN值。田间持水量、孔隙度、饱和导水率等反映土壤湿度的参数通过田间试验确定。作物吸收氮素系数和指数根据模型手册并查阅相关文献选取。施肥水平与肥料可利用因子根据实际调查结果确定。

### 1.5 模型参数的敏感性分析方法

敏感性分析采用JAMES等<sup>[14]</sup>提出的相对敏感度方法。将模型结果输出变化的百分率与参数取值变化百分率的比值定义为相对敏感度,相对敏感度值愈大,说明敏感度愈高。相对敏感度的提出可以使不同尺度和量纲的参数直接进行比较。

### 1.6 模型的校验

模型校验分为参数校正与验证2个过程。用荒地A、香蕉地B、蔬菜地C、甘蔗地D和蔬菜水稻轮作地E5种土地利用方式2002年4—12月的月实测数据对模型参数进行调试,在合理的范围内微调部分敏感性高的参数,直至模型结果与实测值相近。香蕉地F、蔬菜地G、水稻连作地H3种土地利用方式同期的实测数据用来对模型进行验证。在土地利用方式类似时,保持多数参数不变,仅调整种植日期、翻耕次数、施肥等作物管理参数。

采用Nash-Sutcliffe<sup>[15]</sup>效率系数 $E$ 来衡量模型模拟值与实测值之间的拟合度。 $E$ 值介于0与1之间。 $E$ 值为1,表明模拟结果与实测值完全吻合; $E$ 值越接近于1,表明模拟效果越好。 $E$ 值计算公式为:

$$E = [ \sum (x_i - \bar{x})^2 - \sum (x_i - x_i)^2 ] / \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式(1)中, $x_i$ 为模拟值, $x_i$ 为实测值, $\bar{x}$ 为 $x_i$ 的平均值, $i=1, 2, \dots, n_0$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型参数的敏感性分析

模型参数敏感性分析表明,径流曲线数、植株最

大高度、田间持水量、作物有效根深和当前作物根深依次为影响渗漏水量的敏感参数;作物吸收氮素系数、肥料中硝态氮含量、肥料中铵态氮含量、径流曲线数、干物质比率和作物潜在产量依次为影响硝态氮渗漏淋失的敏感性参数。

### 2.2 模型校验结果

模型的校验结果见图3。由于采样和实验中存在着一些不确定因素,如枯水期的渗漏水量少(荒地A)、实验中剔除个别异常的数据(蔬菜地C)和因天气条件和地形(甘蔗地D位于上游的山坡地)等原因,使采集水样存在一定困难。因此,有些样点实测数据较少(如荒地A和甘蔗地D)。

模型调试结果表明:香蕉地B、蔬菜地C和甘蔗地D的Nash-Sutcliffe系数均大于0.94,模拟值与实测值拟合度较好;蔬菜与水稻轮作地E模拟结果不太理想,Nash-Sutcliffe系数仅为0.12,尤其是在渗漏峰值的7—8月,模拟值与实测值不符;荒地A因在枯水期渗漏水量少且位于坡地,实测值较少,使Nash-Sutcliffe系数较低,为0.28。

模型验证结果表明:香蕉地F和蔬菜地G的模拟值与实测值比较吻合,Nash-Sutcliffe系数分别为0.95和0.57;与蔬菜水稻轮作地E类似,水稻连作地H的模拟值与实测值不一致,Nash-Sutcliffe系数仅为0.33。

### 2.3 GLEAMS模型模拟效果分析

模型调试和验证结果表明,GLEAMS模型可以模拟流域大部分土地利用方式下硝态氮渗漏淋失,而对水稻田的模拟效果不好。由于模型模拟渗漏时采用Storage-Routine方法是考虑当土壤上层剖面含水量大于田间持水量时,多余的水才会向下层渗漏,而水稻田的实际情况是土壤在生长期处于淹水环境,全剖面处于饱和状态。另外,由于犁底障碍土层的存在使实际渗漏水量较少,田面多余的水一般通过地表径流排走。因此,模型采用的水量平衡方程并不适用于水稻田的模拟。CHUNG等<sup>[16]</sup>将GLEAMS模型改进为GLEAMS-PADDY模型,考虑了水稻田的持水深度,改进了水量平衡方程,改进后的GLEAMS-PADDY模型可更好地模拟水稻田的氮素渗漏。

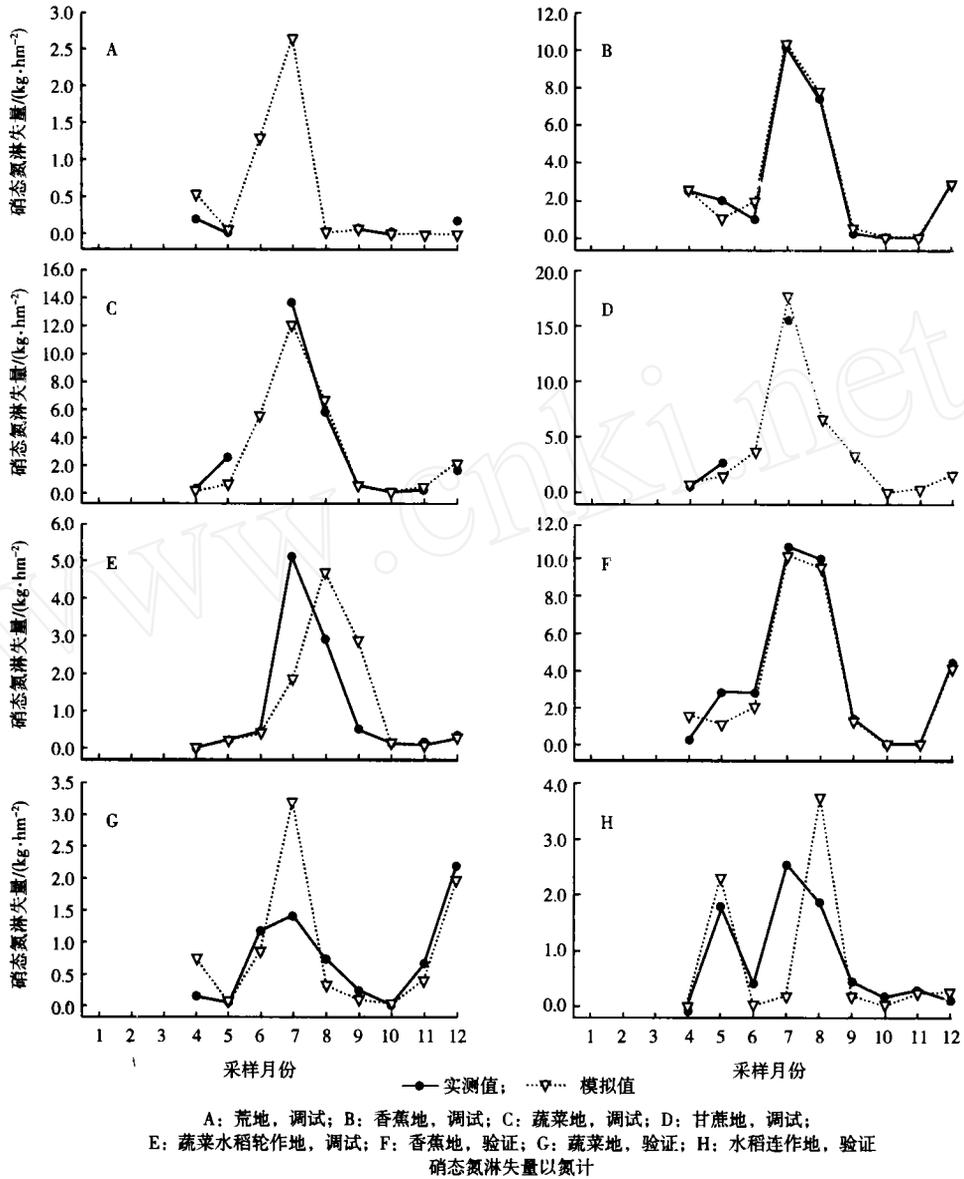


图 3 不同土地利用方式模型的校验

Fig 3 Model calibration and validation for different land uses

2.4 不同土地利用方式下硝态氮的渗漏淋失特征

采用校验后的 GLEAMS模型模拟计算了该农业流域 2002年硝态氮的渗漏淋失状况,计算结果见表 2。在作物生长季节,硝态氮渗漏淋失渐次升高,然后逐渐降低。不同土地利用方式下硝态氮的年渗漏量(以氮计)为 4.6438 39 kg·hm<sup>-2</sup>,变化较大,而流域面积加权平均为 29.99 kg·hm<sup>-2</sup>。甘蔗地、香蕉地和蔬菜地的渗漏淋失最高,且峰值出现在降雨量和强度均较大的 7、8月(表 2)。硝态氮最高月渗漏量占全年渗漏量的 34.2% 57.1%。2002年 7、8月降雨量分别占全年的 21%和 31%。高强度的降雨加剧了水的渗透,使硝态氮渗漏量增多,在没有

新氮源的情况下,随后的降雨会稀释渗漏的硝态氮。因此,除水稻田外,其他土地利用方式下硝态氮渗漏量最高值均出现在 7月。而蔬菜水稻轮作地和水稻连作地的峰值则出现在 8月,并且水稻连作地的硝态氮渗漏量在 5月还出现了另一峰值(图 3 H)。这主要是因为 4—5月和 7—8月为流域双季稻的主要施肥季节(基肥)。C和 G均为蔬菜地,但年均施肥量不同,分别为 345和 215 kg·hm<sup>-2</sup>(以氮计),尽管蔬菜地 C只比 G多施 60.5%,但年均硝态氮渗漏量却是 G的 3.5倍,说明施肥量是影响硝态氮渗漏量的重要因素。

**表 2 五川流域硝态氮模拟的月最高渗漏量和年渗漏量**  
**Table 2 Simulated monthly maximum and annual nitrate N leaching in Wuchuan catchment**

样点 土地利用方式	施氮量 / (kg · hm <sup>-2</sup> )	月最高渗 漏氮量 / (kg · hm <sup>-2</sup> )	年渗漏 氮量 / (kg · hm <sup>-2</sup> )	月最高渗漏量 占年渗漏量 %
A 荒地	0	2.65 (7)	4.64	57.1
B 香蕉地	380	10.36 (7)	27.17	38.1
C 蔬菜地	345	12.18 (7)	29.28	41.6
D 甘蔗地	350	17.71 (7)	38.39	46.1
E 蔬菜水稻轮作	195	4.71 (8)	10.47	45.0
F 香蕉地	395	10.13 (7)	29.66	34.2
G 蔬菜地	215	3.23 (7)	8.43	38.3
H 水稻连作	206	3.77 (8)	6.91	54.6

括号里的数字代表月份。

荒地人为干扰较少,但其全年硝态氮渗漏量也达 4.64 kg · hm<sup>-2</sup>,说明在近自然状况下土壤氮素本身也存在一定的淋溶。如将此值作为该流域的背景渗漏量,其他土地利用方式下硝态氮的渗漏量与该背景值相比,可以得出人类活动所带来的影响。不同土地利用方式下硝态氮渗漏量扣除背景渗漏量后占总施氮量的比例为 1.1%~9.6%,反映了渐次增强的人类活动影响。

### 3 结论

将 GLEAMS 模型应用于我国东南亚热带地区的农业小流域,经过校验,该模型可以模拟大部分土地利用方式(水稻田除外)下硝态氮渗漏淋失。不同土地利用方式下硝态氮渗漏量时空差异显著,为 4.64~38.39 kg · hm<sup>-2</sup>(以氮计),而流域面积加权平均值为 29.99 kg · hm<sup>-2</sup>。甘蔗地、香蕉地和蔬菜地硝态氮年均渗漏淋失量较大,并且月渗漏淋失最高值出现在 7—8 月。综上所述,降雨、土地利用和化肥施用等人类活动是影响硝态氮渗漏淋失差异的主要因素。

### 参考文献:

[1] ZHU J G, HAN Y, LU G Nitrogen in Percolation Water in Paddy Fields with a Rice/Wheat Rotation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57(1): 75 - 82.

[2] KNISEL W G, TURTOLA E. GLEAMS Model Application on a Heavy Clay Soil in Finland[J]. Agricultural Water Management, 2000, 43(3): 285 - 309.

[3] 曹文志, 洪华生, 张玉珍, 等. AGNPS 在我国东南亚热带地区的检验[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 537 - 540.

[4] CAO W, HONG H, YUE S, *et al* Nutrient Loss From an Agricultural Catchment and Landscape Modeling in Southeast China[J]. Bulletin of Environmental Toxicology, 2003, 71(4): 761 - 767.

[5] CAO W, HONG H, ZHANG Y, *et al* Nutrient Export Patterns From an Agricultural Catchment in Southeast China[C]. Wallingford: AHS Press, 2004: 336 - 342.

[6] CAO W, HONG H, ZHANG Y, *et al* Nutrient Export Patterns From an Agricultural Catchment in Southeast China[C]. GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment Wallingford: AHS Press, 2004: 336 - 342.

[7] KNISEL W G. CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems[R]. Science and Education Administration Conservation Research Report No 26. Washington DC: US Department of Agriculture, Science and Education, 1980: 640.

[8] LEONARD R A, KNISEL W G, STALL D A. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems[J]. Transaction of American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1403 - 1418.

[9] KNISEL W G. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, Version 2.10[K]. Georgia: University of Georgia, Coastal Plain Experiment Station, Biological and Agricultural Engineering Department, 1993.

[10] MONTEITH J L. Evaporation and the Environment[C]. Proceeding of 19th Symposium of the Society for Experimental Biology. Swansea: Cambridge University Press, 1965: 205 - 234.

[11] WILLIAMS J R, LASEUR W V. Water Yield Model Using SCS Curve Numbers[J]. Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 1976, 102(HY9): 1241 - 1253.

[12] WILLIAMS J R, NICKS A D. CREAMS Hydrology Model Option 1[C]. Proceeding of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling Mississippi. Mississippi State University, 1982: 69 - 86.

[13] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting Rainfall Erosion Losses[M]. Agriculture handbook, No 537. Washington DC: US Department of Agriculture, 1978: 56.

[14] JAMES L D, BURGESS S J. Selection Calibrations and Testing of Hydrologic Models[M]. Hydrologic Modeling of Small Watersheds Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982: 437 - 470.

[15] NASH J E, SUTCLIFFE V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models: A Discussion of Principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 280 - 292.

[16] CHUNG S O, KIM H S, KIM J S. Model Development for Nutrient Loading From Paddy Rice Fields[J]. Agricultural Water Management, 2003, 62(1): 1 - 17.

作者简介:王吉苹(1980—),女,山东济南人,硕士生,主要研究方向为环境科学与管理。