

# GLEAMS 模型在我国东南地区模拟硝氮淋失的检验

王吉苹, 曹文志, 李大朋, 徐玉裕

(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:** 利用我国东南亚热带地区农业小流域不同土地利用方式的硝氮渗漏淋失实测数据检验了 GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) 模型在该地区的适用性。通过现场试验和实地调查并结合模型手册, 获取模型所需的水文和营养盐参数, 参考模型参数的敏感性分析结果对模型进行调试。结果表明模型对水稻田除外的其它土地利用方式的硝氮渗漏淋失模拟效果较好。水稻田渗漏模拟效果差的主要原因在于模型的水分平衡方程不能反应水稻田长期淹水的实际情况。模型模拟结果的精度可以接受, 从而验证了 GLEAMS 模型在该流域的适用性。

**关键词:** 农业流域; GLEAMS 模型; 硝氮淋失; 校验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0061-06

中图分类号: X523, S143.1

## Testing GLEAMS for Nitrate Leaching Modeling in an Agricultural Catchment of Southeast China

WANG Ji-ping, CAO Wen-zhi, LI Da-peng, XU Yu-yu

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science,

Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) model was introduced to test and validate nitrate leaching in an agricultural catchment in southeast China. Field experiments were performed under different landuses such as paddy, bananas and vegetables, in Wuchuan catchment of Fujian Province with the area of 9.6 km<sup>2</sup>. Eight boreholes were drilled and monitoring pipes were installed for continuous monitoring of nitrate leaching from April to December in 2002. The hydrologic and nutrient parameters of GLEAMS model were extracted based on measurements and experiments during the main crop growing season. Model parameters were tuned to achieve desired agreements between measurements and model simulations based on sensitivity analysis. After calibration and validation, the model generally had acceptable performances in simulating nitrate leaching throughout the landuses with an exception in paddy field. The model simulations can be used to specifically establish best management practices for nutrient management and pollution mitigation in the catchment.

**Keywords:** agricultural catchment; GLEAMS model; nitrate leaching; calibration and validation

作为一个世界性环境问题, 地下水硝酸盐污染引起人们的日益关注。地下水的硝氮含量过高, 易引发高铁血红蛋白症和非典型霍奇金淋巴瘤<sup>[1]</sup>。另外过量的氮素还可造成水体富营养化并引起赤潮和水华<sup>[2]</sup>。很多研究表明氮素通过地表径流和淋溶等途径流失已经成为水体污染的主要成因, 如美国中北和东北部的“玉米带”以及西部和东南部的灌溉农业地区<sup>[3]</sup>、西班牙东部地区等<sup>[4]</sup>。

氮素淋失是我国氮素循环研究中的薄弱环节<sup>[5]</sup>, 目前主要是通过田间实测或室内土柱模拟试验研究硝态氮在土壤剖面中的迁移, 如采用排水集器

法、渗漏计法、多孔陶瓷杯取样法或离子交换树脂法等<sup>[6]</sup>, 而应用数学模型进一步揭示硝态氮淋失动态的研究则较少。模型模拟因其简便快捷被国外学者愈来愈多地应用到流域管理中模拟农业面源化学物质的迁移和转化, GLEAMS (groundwater loading effects of agricultural management systems) 模型就是其中之一。

本研究旨在应用 GLEAMS 模型对我国东南部亚热带地区典型农业小流域不同土地利用方式的硝氮渗漏淋失进行模拟, 验证 GLEAMS 模型在我国东南地区农业流域的应用情况。

收稿日期: 2006-06-21

修稿日期: 2006-12-13

资助项目: 国家自然科学基金(40671116; 40301045)

作者简介: 王吉苹(1980-), 女(汉族), 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为环境科学与管理, 水资源与水环境。E-mail: wjprose@xmu.edu.cn.

通讯作者: 曹文志(1968-), 男(汉族), 河南南阳人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为流域生态过程。E-mail: wzcao@xwu.edu.cn.

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

研究区五川流域位于福建省九龙江中上游,南靖县城的东南部,地处东经  $117^{\circ}29'$ ,北纬  $24^{\circ}26'$ 。流域面积为  $9.6 \text{ km}^2$ ,属南亚热带海洋性气候。监测年份 2002 年流域的降雨量为  $1624 \text{ mm}$ ,小于多年平均降雨量  $1720 \text{ mm}$ ,降雨主要发生在 4—9 月间。土地利用以林地(42.7%)和果园(40.2%)为主,其次是香蕉(7.5%),另有少量的水稻、蔬菜、水(渔)塘和居住地。流域施肥量高,平均施肥水平氮肥约  $500 \text{ kg/hm}^2$ ,磷肥约  $160 \text{ kg/hm}^2$ ,主要作物详细施氮量见施肥日历(图 1)。耕作土壤主要是潴育性水稻土中的灰沙泥田和沙质土壤等,土壤的 pH 值在 5 左右,平均含有有机质 0.818%,全氮 0.042%,全磷 0.068%,此类土壤易漏水漏肥,土壤肥力低下。该流域已经积累有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的流失特征分析、流域氮收支的估算、氮素污染关键源区的识别等<sup>[7-9]</sup>。

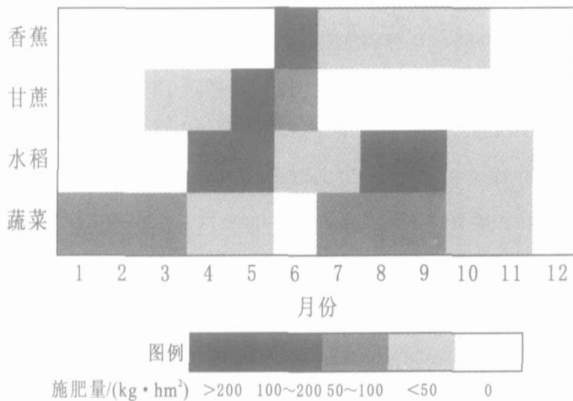


图 1 五川流域氮肥施用日历

## 1.2 实验方法

沿溪流不同土地利用方式埋设渗漏装置(表 1)。渗漏装置由 PVC 管制成,直径  $11 \text{ cm}$ ,上部开口,配有螺口管盖方便采样,底部密封。离底部约  $20 \text{ cm}$  桶壁穿有小孔,浅层地下水通过小孔渗滤进入管内供采样分析,装置埋设深度在  $1.5\sim 2.5 \text{ m}$  之间,低于枯水期时地下水位(表 1)。水样每月采集一次,采集水样前测量 PVC 管内水位高度,读取地下水位,然后用压水泵抽干管内积水,24 h 内再抽取新鲜水样,经  $0.45 \mu\text{m}$  的滤膜过滤后进行水质分析。

## 1.3 GLEAMS 模型简介

GLEAMS 模型是美国农业局开发的用来预测和模拟农业管理措施对土壤侵蚀、地表径流、氮磷渗漏

淋失等所产生影响的一维确定性机理性模型<sup>[10-11]</sup>。该模型的优点在于能够反映不同土地利用方式下硝态氮的渗漏淋失特征。模型一般包括水文、侵蚀、化学营养物质和农药 4 个子模型。与本文研究密切相关的是水文和化学物质子模型。

表 1 采样点所对应的土地利用、肥料施入情况与采样深度

编号	所处位置	土地利用	施肥情况	埋管深度/m
A	下游	荒地	无肥料施入	1.5
B	上游	香蕉地	有机肥、复合肥、尿素、碳氮、磷酸钾	2.0
C	上游	蔬菜地	有机肥、复合肥、尿素、碳氮	2.0
D	中游	甘蔗地	碳氮、磷酸镁钙	2.5
E	中游	蔬菜水稻轮作	有机肥、复合肥、磷酸镁钙	1.7
F	中游	香蕉地	尿素、碳氮	2.5
G	上游	蔬菜地	有机肥	1.5
H	下游	水稻连作	碳氮	1.7

模型的水文部分基于对植物根际区每日水量平衡的模拟。Penman—Monteith 方程或 Priestly—Taylor 用于计算日潜在蒸散量<sup>[12-13]</sup>;径流量估算采用修正土壤保持径流曲线数值法<sup>[14]</sup>;Storage—Routine 方法用来计算渗漏水量<sup>[15]</sup>。土壤剖面饱和水流只涉及单向流,田间持水量(FC)、凋萎系数(BR15)等参数反映土壤的持水能力,叶面积指数(LAI)反映作物的蒸腾作用。

侵蚀子模型主要是基于颗粒物的分离、沉降和运移过程。土壤侵蚀与沉积物流失量的计算采用修正的通用土壤流失方程<sup>[16]</sup>,并考虑了沉积物在坡面、水塘、梯田和沟渠等不同下垫面的沉积和迁移能力。

模型的化学营养物质子模型的氮循环部分包括矿化、固定、反硝化、氮挥发、豆科植物氮的固定、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,降雨和灌溉水中的氮也作为氮输入的一部分。模拟过程中考虑了土壤温度以及翻耕的频率和方式对氮循环的影响。

## 1.4 模型参数的输入和敏感性分析

建立参数录入表,将模型参数大致分为 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。大部分参数通过田间调查与现场试验获取。

为了有针对性地找出影响渗漏水量和硝氮淋失量的参数因子,并减少调试过程中试差法的繁琐工作,对模型的输入参数做一敏感性分析必不可少。另外,在未来的工作中利用校验后的 GLEAMS 模型对提出有关减缓氮磷渗漏淋失的最佳管理措施进行模拟时,参数的敏感性对模型的模拟结果至关重要。

敏感性分析采用 James 等提出的相对敏感度方法<sup>[17]</sup>。即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。其值愈大,说明敏感度愈高。

$$S_r = (\partial R / \partial P) \times (P / R) \quad (1)$$

式中:  $S_r$  —— 相对敏感度;  $R$  —— 模型输出结果;  $P$  —— 模型参数输入值。本次研究中,  $R$  就是渗漏水量与硝氮淋失量的输出结果,  $P$  为影响前者变化的任意参数输入值。

相对敏感度的提出得以使不同尺度和单位的参数进行直接比较。主要过程就是先将各影响参数确定一基值,在此基础上分别上调下调一个百分数,分析结果的变化程度和方向。但是有些参数的取值有限制,比如径流曲线数法(CN)和土壤蒸发参数(CONA)和孔隙度(POR)等,这种情况下,一般取到模型限制的最大和最小值。由于相对敏感度的引入,每个参数上调和下调的百分比不影响结果分析。

### 1.5 模型的校验

模型校验分为参数校正与验证 2 个过程。荒地(A),香蕉(B),蔬菜(C),甘蔗(D),蔬菜水稻轮作(E) 5 种土地利用方式的 2002 年 4 到 12 月(作物生长季节)的月实测数据用来对模型参数进行校正。校正过程如下:采用试差法,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,再微调其它参数。香蕉(F),蔬菜(G),水稻田连作(H) 3 种土地利用方式的同期实测数据用来对模型进行验证。同种土地利用方式的水文条件、土壤类型都比较类似,因此保持多数参数不变,而仅调整种植日期、翻耕次数、施肥等作物管理参数。采用 Nash—Sutcliffe 效率系数 E 来衡量模型模拟性能<sup>[18]</sup>,具体公式和计算方法见 Chen 等人的描述<sup>[19]</sup>。该系数介于 0~1 之间,1 表明模拟结果与实测值完全吻合,数值越大则说明模拟效果越好。

## 2 结果分析

### 2.1 模型参数的敏感性分析

敏感性分析结果表明(表 2),径流曲线数(CN2)为影响渗漏水量的最敏感参数,其次为土壤剖面层数(NOSOHZ)和土壤剖面第一层的田间持水量[FC

(a)],植株最大高度(CRPHTX)在下调时也为较敏感参数。而影响硝氮渗漏淋失的敏感性参数依次为作物吸收氮素系数(C1),肥料中硝氮的含量(FN),肥料中氨氮的含量(FNH),径流曲线数(CN2),干物质比率(DMY)和作物潜在产量(PY),尤其是参数 C1 相对敏感度大于 20,为最敏感参数。在接下来模型调试之中,可在允许范围内重点微调这些敏感性参数。

### 2.2 硝氮渗漏淋失的校验结果

模型校正结果表明香蕉地(b)、蔬菜地(c)和甘蔗地(d)的模拟值与实测值拟合度较好[图 2(b) — (d)],Nash—Sutcliffe 系数也均大于 0.94。蔬菜与水稻轮作(e)的模拟结果不太理想[图 2(e)],Nash—Sutcliffe 系数仅为 0.12,尤其是在渗漏峰值的 7—8 月,模拟与实测值差别较大。荒地(a)因在枯水期渗漏水量少且位于坡地[图 2(a)],实测值较少,使得几个月份的模拟值无法与实测值相比较,Nash—Sutcliffe 系数也较低(0.28),模型模拟精度不够好。

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[图 2(f),(g)],Nash—Sutcliffe 系数分别为 0.95 和 0.57。与蔬菜水稻轮作(e)类似,水稻田连作(h)的模拟值与实测值一致性较差[图 2(h)],Nash—Sutcliffe 系数仅为 0.33。

## 3 分析与讨论

为了进一步验证模型的效率,将所有校验的实测和模拟数据绘制在 1:1 连线图上(图 3)。模型模拟值与实测值在硝氮低淋失量时分布相对较散,随着淋失量的增大,两者也较好地分布在 1:1 连线图上。这是因为 GLEAMS 模型模拟的是土壤硝氮的渗漏淋失,而实验测得的实际上是浅层地下水的硝氮,两者的差别就是当前者的淋失量足够大时,硝氮才会继续沿土壤剖面向下迁移,而在低淋失量的情况下,硝氮会滞留在土壤上中层,不会淋洗到浅层地下水,因此模拟值与实测值在低硝氮淋失量时吻合度不够好。

综合 Nash—Sutcliffe 系数和模拟值与实测值的 1:1 连线,GLEAMS 模型可以模拟流域大部分土地利用方式的硝氮渗漏淋失,但对水稻田的模拟效果不好。由于模型模拟渗漏时采用的 Storage—Routine 方法考虑当土壤上层剖面水含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水稻生长期一直处于淹水环境,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,模型所采用的水量平衡方程并不适宜于水稻田的模拟。Chung 等将 GLEAMS 模型改进为 GLEAMS—

PADDDY 模型<sup>[20]</sup>, 考虑了水稻田的持水深度, 并改进其水量平衡方程, 结果证明改进后的 GLEAMS —

PADDDY 模型可更好地模拟水稻田的氮素渗漏, 但是该模型还没有得到大范围内推广和应用。

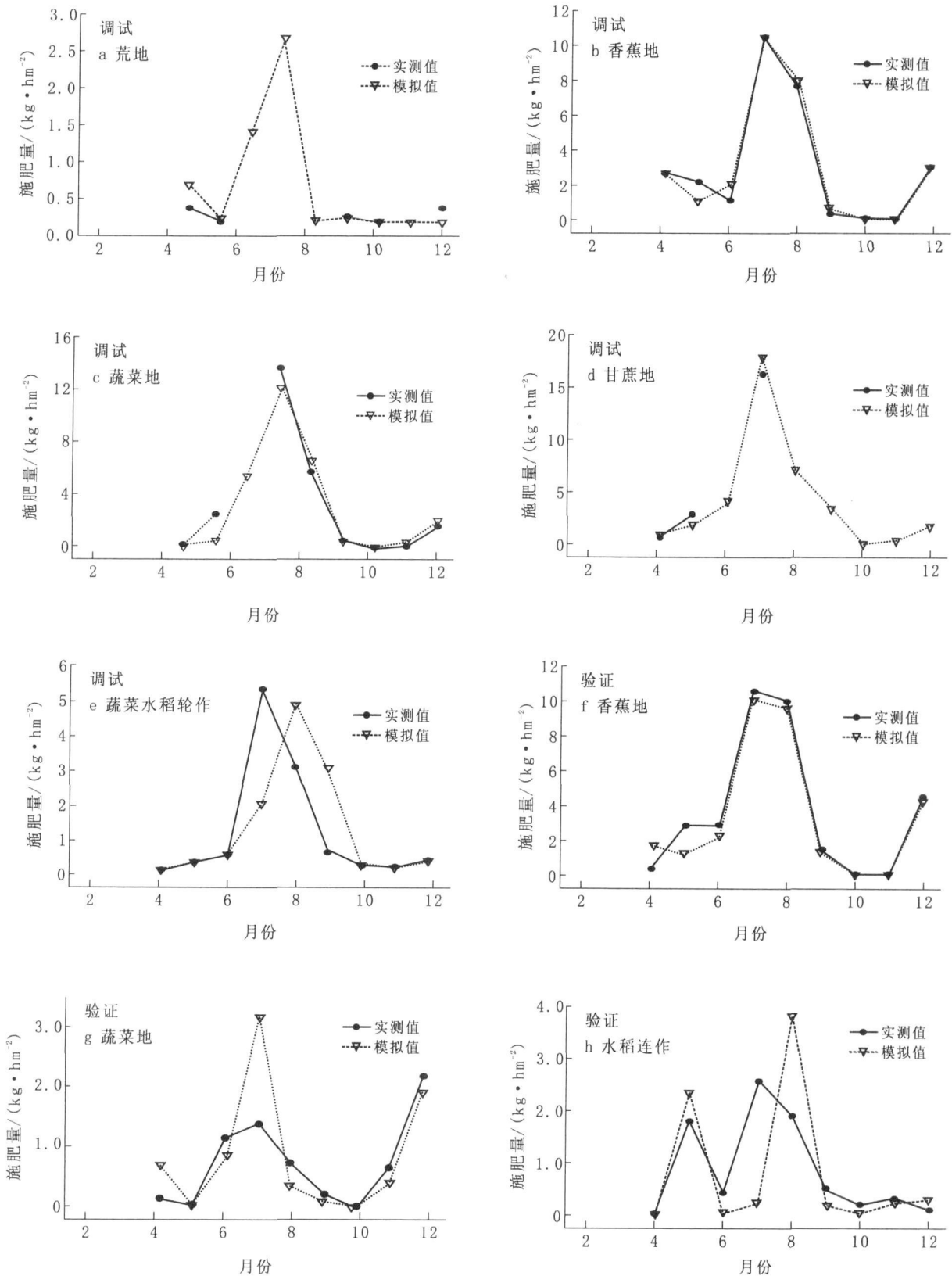


图 2 不同土地利用方式模型的校验

## 4 结论

除水稻田外, GLEAMS 模型的模拟结果较好, 总体上验证了 GLEAMS 模型在五川流域的适用性, 表明了 GLEAMS 模型在我国东南亚热带地区的农业

非点源污染物硝氮淋失负荷估算及评价的应用潜力。未来研究应通过 GIS 技术与模型相结合, 对大尺度流域农业非点源污染物做评估, 以及改善水稻田水循环模块, 利用模型模拟结果制定控制和削减不同土地利用方式的流域农业面源化学物质污染的措施。

表 2 模型参数敏感性分析结果

输入参数	输入参数值增加或减少的百分比/ %	月平均渗漏水量增加或减少的百分比/ %	相对敏感度	月平均硝氮淋失量增加或减少的百分比/ %	相对敏感度	
水文参数	CN2	+ 13.3	- 29.1	2.19	- 6.5	0.49
		- 13.3	14.8	1.12	1.7	0.13
	RD	+ 50.0	- 23.7	0.47	- 10.0	0.20
		- 16.7	8.8	0.53	2.4	0.15
	NOSOZH	+ 33.3	- 46.7	1.40	- 30.2	0.91
		- 33.3	29.2	0.88	7.1	0.21
	FC(a)	+ 50.0	- 53.9	1.08	- 19.1	0.38
		- 50.0	35.7	0.72	6.9	0.14
	FC(b)	+ 50.0	- 12.3	0.25	- 5.8	0.12
		- 50.0	14.5	0.29	4.0	0.08
营 养 参 数	FC(c)	+ 50.0	- 17.3	0.34	- 5.9	0.12
		- 50.0	24.1	0.48	5.2	0.10
	CCRD	+ 50.0	0.0	0.00	0.0	0.00
		- 50.0	20.7	0.42	- 0.7	0.01
	CRPHTX	+ 25.0	- 8.8	0.35	- 1.9	0.07
		- 25.0	28.3	1.13	1.7	0.07
营 养 参 数	FN	+ 50.0	0.0	0.00	29.6	0.59
		- 50.0	0.0	0.00	- 29.3	0.59
	FNH	+ 50.0	0.0	0.00	25.6	0.51
		- 50.0	0.0	0.00	- 28.8	0.58
	PY	+ 50.0	0.0	0.00	- 13.1	0.26
		- 50.0	0.0	0.00	14.5	0.29
	DMY	+ 50.0	0.0	0.00	- 13.1	0.26
		- 50.0	0.0	0.00	16.0	0.32
营 养 参 数	C1	+ 47.1	0.0	0.00	- 11.6	24.56
		- 52.9	0.0	0.00	14.2	26.75

注: (a): 土壤剖面的第一层; (b): 土壤剖面的第二层; (c): 土壤剖面的第三层。CN2: 径流曲线数; RD: 作物有效根深; NOSOZH: 土壤剖面层数; FC: 田间持水量; CCRD: 当前作物根深; CRPHTX: 植株最大高度; FN: 肥料中硝氮的含量; FNH: 肥料中氨氮的含量; PY: 作物潜在产量; DMY: 干物质比率; C1: 作物吸收氮素系数。

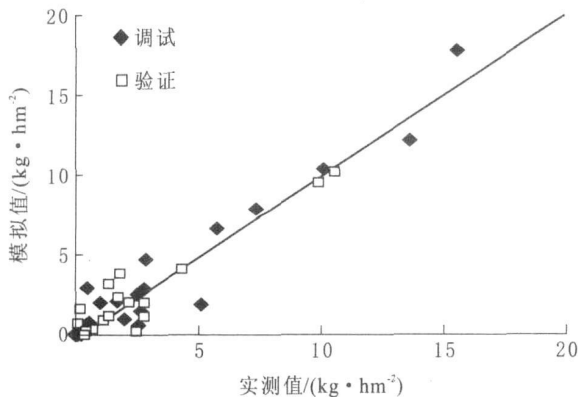


图 3 模型模拟值与实测值 1:1 连线

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Ward M H, Mark S D, Cantor K P, et al. Drinking water nitrate and the risk of non-Hodgkin Lymphoma[ J]. Epidemiology, 1996, 7(5): 465—471.

[ 2 ] Carpenter S R, Caraco N F, Correl D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [ J]. Ecol Appl, 1998, 8(3): 559—568.

[ 3 ] Hallberg G R. From hoes to herbicides: Agriculture and groundwater quality[ J]. J Soil Water Cons, 1986, 41( 6): 357—364.

[ 4 ] De Paza, J M, Ramos C. Linkage of a geographical information system with the GLEAMS model to assess nitrate leaching in agricultural areas[ J]. Environ Pollut, 2002, 118: 249—258.

- [ 5 ] Webster C P, Shepherd M A, Goulding K W T, et al. Comparisons of methods for measuring the leaching of mineral nitrogen from arable land[J]. *J Soil Sci*, 1993, 44( 1 ): 49—62.
- [ 6 ] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 212—249.
- [ 7 ] Cao W, Hong H, Yue S, et al. Nutrient loss from an agricultural catchment and landscape modeling in southeast China[J]. *Bull Environ Toxicol*, 2003, 71(4): 761—767.
- [ 8 ] Cao W, Hong H, Zhang Y, et al. Nutrient export patterns from an agricultural catchment in southeast China[C]. Chen Y, Takarra K, Cluckie I, et al. GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment, IAHS Publ. 289, UK: IAHS Press, 2004. 336—342.
- [ 9 ] Cao W, Hong H, Zhang Y, et al. Anthropogenic nitrogen sources and exports in a village-scale catchment in southeast China[J]. *Environ Geochem Health*, 2006, 28(1/2): 45—51.
- [ 10 ] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems[J]. *Trans Amer Soc of Agri Engrs*, 1987, 30(5): 1403—1418.
- [ 11 ] Knisel W G. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems, Version 2. 10[R]. BAED Publication No 5. Georgia, USA: University of Georgia, Coastal Plain Experiment Station, Tifton, 1993.
- [ 12 ] Monteith J L. Evaporation and the environment [C]. *Proceeding of 19th Symposium of the Society for Experimental Biology*. Swansea, U K: Cambridge University Press, 1965. 205—234.
- [ 13 ] Priestly C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. *Mon Weather Rev*, 1972, 100(2): 81—92.
- [ 14 ] Williams J R, LaSeur W V. Water yield model using SCS curve numbers[J]. *J Hydraul Division, American Society of Civil Engineers*, 1976, 102(HY9): 1241—1253.
- [ 15 ] Williams J R, Nicks A D. CREAMS hydrology model—Option 1[C]. *Proceedings of the International Symposium Rainfall—Runoff Modeling*. Mississippi, USA: Mississippi State University, 1982. 69—86.
- [ 16 ] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[M]. *Agriculture handbook*, No 537, Washington DC, USA: US Department of Agriculture, 1978. 56.
- [ 17 ] James L D, Burges S J. Selection calibrations and testing of hydrologic models[M]. *Hydrologic Modeling of Small Watersheds Michigan*, USA: American Society of Agricultural Engineers, 1982. 437—470.
- [ 18 ] Nash J E, Sutcliffe V. River flow forecasting through conceptual models: A discussion of principles[J]. *J Hydrol*, 1970, 10(3): 280—292.
- [ 19 ] Chen N, Hong H, Cao W, et al. Assessment of management practices in a small agricultural watershed in southeast China[J]. *J Environ Sci Health*, 2006, 41(7): 1257—1269.
- [ 20 ] Chung S O, Kim H S, Kim J S. Model development for nutrient loading from paddy rice fields[J]. *Agric Water Manage*, 2003, 62(1): 1—17.