

# 天然文岩渠流域土壤水分渗漏和氮素淋失模拟

李晓鹏<sup>1,2</sup>, 张佳宝<sup>1\*</sup>, 刘金涛<sup>1,3</sup>, 朱安宁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 封丘农业生态系统国家试验站, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:**应用 DNDC 模型(denitrification-decomposition model)对黄淮海平原的典型平原小流域——天然文岩渠流域的土壤水分渗漏和氮素淋失状况进行了模拟. 水氮控制田间试验的验证结果表明, 模型对 1 m 土体日储水量、下界面硝态氮浓度、土壤水日渗漏量和氮素日淋失量的模拟均较理想, 模拟值与实测值的相关系数分别达到了 0.94( $n = 40$ )、0.66( $n = 49$ )、0.89( $n = 40$ )和 0.94( $n = 39$ ), 均方根误差则分别为 15.66 mm、2.66 mg·kg<sup>-1</sup>、9.00 mm 和 0.94 kg·hm<sup>-2</sup>. 模型在流域范围的模拟结果表明, 冬小麦-夏玉米轮作农田在多年平均气象条件和常用水肥管理模式, 土壤的水分年渗漏量在 220~327 mm 之间, 氮素年淋失量在 73.1~100.6 kg·hm<sup>-2</sup> 之间. 水氮淋失的空间和时间分布不均, 淋失最严重的区域为固定细风沙土、砂土分布区, 淋失时间主要集中于施肥、灌溉或强降雨之后. 灌溉措施不当, 施肥盲目以及土壤自身保水保肥能力差, 是导致土壤水肥流失的主要原因.

**关键词:** DNDC 模型; 天然文岩渠流域; 水分渗漏; 氮素淋失

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0864-06

## Simulating Soil Water Drainage and Nitrogen Leaching in Tianranwenyanqu Basin

LI Xiao-peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-bao<sup>1</sup>, LIU Jin-tao<sup>1,3</sup>, ZHU An-ning<sup>1</sup>

(1. State Experimental Station of Agro-Ecosystem in Fengqiu, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Soil water drainage and nitrogen leaching in Tianranwenyanqu Basin was simulated using DNDC model. The model was validated by data of the water and nitrogen controlling experiment in the basin. The correlation coefficients between simulated and measured values of daily 1 m soil water storage, lower boundary NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration, soil water drainage and nitrogen leaching were 0.94( $n = 40$ ), 0.66( $n = 49$ ), 0.89( $n = 40$ ), 0.94( $n = 39$ ); and RMSEs were 15.66 mm, 2.66 mg·kg<sup>-1</sup>, 9.00 mm, 0.94 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. The validated model was then used to simulate soil water drainage and nitrogen leaching in the basin. The results show that, under multi-year average climate and conventional management condition, annual soil water drainage and nitrogen leaching of winter-wheat and summer-corn rotation fields in this basin were 220-327 mm and 73.1-100.6 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. The distribution of water drainage and nitrogen leaching were uneven in time and space, leaching happened mainly after fertilization, irrigation or heavy rainfall, and sandy soil regions were the most serious nitrogen leaching area. Unreasonable irrigation, fertilization and poor water and fertilizer preserving capability of the soils, were the major causes of soil water drainage and nitrogen leaching.

**Key words:** DNDC model; Tianranwenyanqu Basin; water drainage; nitrogen leaching

目前我国小麦、玉米的主产区——黄淮海平原面临的主要养分管理问题是施氮过量, 过量施肥使得黄淮海平原氮肥损失严重, 环境问题突出<sup>[1,2]</sup>. 农田氮肥的损失途径主要有氨挥发、硝化-反硝化、淋失和径流<sup>[3]</sup>, 其中氮素向地下水的淋失被认为是旱地农田氮素损失的主要途径, 也是引起地下水中硝态氮含量升高的主要原因<sup>[4~9]</sup>. 如何有效预测和控制农田氮肥的转化过程, 减少其向地下水的淋失是一个亟待解决的重要课题.

建立数学模型, 进行计算机模拟是目前研究尺度氮素淋失问题常用的方法<sup>[10~12]</sup>. Li<sup>[13]</sup> 所建 DNDC 模型是目前国际上最成功的农田生态系统生物地球化学模型之一, 可以与 GIS 耦合, 模拟区域尺度的土壤碳氮循环. 近年来, 已有众多研究者将 DNDC 模型

经用作土壤碳氮循环中各种问题的模拟研究, 该模型在世界范围内得到了广泛的验证和应用<sup>[14~20]</sup>. 本研究主要应用 DNDC 模型在黄淮海平原的典型性农业小流域——天然文岩渠流域冬小麦-夏玉米轮作模式下, 对土壤的水分渗漏和氮素淋失分布情况进行模拟, 以期能对当地农业生产进行指导. 天然文岩渠流域在黄淮海地区具有典型的代表性, 该地区的研究结果对黄淮海平原乃至中国北方农业生产区的农田水氮管理都有很好的借鉴作用.

收稿日期: 2008-03-19; 修订日期: 2008-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB121100); 国家科技支撑计划项目(2006BAD10A06-03); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-406)

作者简介: 李晓鹏(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域土壤水分溶质运移模拟, E-mail: lixp@issas.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天然文岩渠流域地处黄淮海平原顶端部分, 滨临黄河北岸, 流域面积2 514 km<sup>2</sup>, 属于黄河中下游的典型平原区农业小流域. 流域内地形平坦, 由西南向东北缓斜, 坡度一般为 1/4 000 ~ 1/6 000. 黄河的沉积物厚度为 300 ~ 400 m, 土壤类型以潮土等轻质土壤为主, 并伴有黄河冲积形成的粘土条带和砂土条带.

本流域属于太平洋季风气候影响下的暖温带. 年平均气温在 14℃, 全年日照时数为 2 300 ~ 2 500 h, 多年平均降雨量由西向东稍有递增, 一般为 550 ~ 650 mm, 其中 70% ~ 80% 集中于植物生长盛期的 7 ~ 9 月. 流域内农业气候条件优越, 几乎适宜所有暖温带喜温作物的生长, 雨、热、光照条件十分有利于作物的光合作用和获得高产. 该区耕地资源占陆地面积的 76% 左右, 且土层深厚, 耕作方便, 丰富优质的土地资源为农业生产提供了重要保证. 本流域最主要农业种植模式为冬小麦-夏玉米模式<sup>[21]</sup>.

1.2 DNDC 模型简介

DNDC 模型主要由土壤水热子模块、作物生长子模块、好氧分解作用和厌氧反硝化作用子模块构成. 模型以天或小时为时间步长, 首先根据日气温、降雨和土壤物理性质参数计算土壤剖面温度和湿度变化, 结果用作其他子模块的输入变量; 作物生长模块计算作物每日的碳氮吸收量, 以及收获后秸秆还田量; 好氧分解作用和厌氧反硝化作用模块分别模拟有机质的分解和硝化作用等过程和反硝化过程. 针对土壤氮素淋失模拟, 模型考虑了土壤粘粒对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 等物质的吸附作用, 用 Langmuir 方程模拟吸附-解吸过程<sup>[15]</sup>. DNDC 模型对流域尺度土壤水渗漏和氮素淋失情况的模拟, 还需要结合研究区的气象、土壤性质、农业管理和作物种植分布等输入参数数据库. 本研究采用的模型为 9.1 版本, DNDC 模型的详细结构、参数需求和使用方法等请参见 DNDC 模型的用户指南<sup>[13]</sup>.

1.3 数据库建立

GIS 软件的主要作用为管理模型输入、输出数据, ArcView 等 GIS 软件负责将天然文岩渠流域的各种输入数据空间分布状况转化为 DNDC 模型可识别的文件格式, 并负责输出土壤水分渗漏和氮素淋失量的空间分布结果.

DNDC 模型所需数据大致可以分为以下几类:

一类为流域范围内的气象数据, 包括日降雨量、日最高/最低气温等参数, 主要数据来源为河南省气象局的乡镇降雨量自动采集网络系统和中科院封丘农业生态试验站的气象站. 另一类数据为土壤类型数据及其理化性质. 土壤分类数据源自 1983 年原阳、延津、封丘和长垣土壤及土地地貌分类图, 利用 GIS 软件对天然文岩渠流域的土壤类型分布图进行数字化(图 1). 以流域内封丘县为例, 全县土壤主要分为 2 土类: 即潮土土类和风沙土土类, 其中潮土是该地区分布最广、面积最大的耕作土壤. 潮土是发育在黄河冲积母质上, 经过人为耕作熟化而形成的土壤. 风沙土是由黄河主流沉积颗粒较粗的砂粒, 经风力再搬运顺风向于河床旁、古河道旁堆积发育形成的土壤, 在该地区多呈断续条带状的沙丘或沙垄存在. 按土壤质地分类, 本流域土壤质地介于壤土与砂土之间, 并伴有部分风沙土及盐渍化土等<sup>[22]</sup>. 根据各种土壤的分布状况, 田间实测各种类型土壤的物理性质(表 1). 模型所需的农业管理和作物参数等来自于研究区内的调查统计.

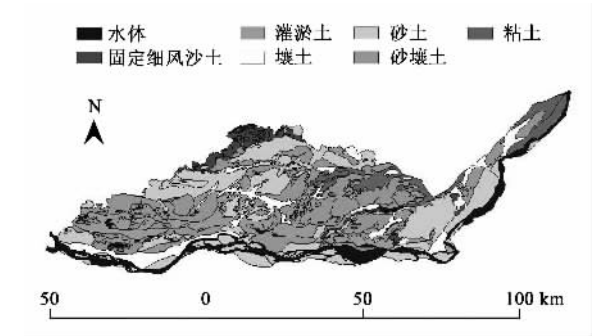


图 1 天然文岩渠流域土壤类型  
Fig. 1 Distribution of soil types in Tianranwenyanqu Basin

表 1 天然文岩渠流域土壤物理性质  
Table 1 Basic physical properties of soils in Tianranwenyanqu Basin

| 类型   | 饱和体积含水量 | 田间持水量 /WFPS | 容重 /g·cm <sup>-3</sup> | 粘粒含量 /% | 饱和导水率 /cm·h <sup>-1</sup> |
|------|---------|-------------|------------------------|---------|---------------------------|
| 细风沙土 | 0.40    | 0.40        | 1.48                   | 4       | 5.00                      |
| 淤积土  | 0.62    | 0.70        | 1.44                   | 30      | 0.09                      |
| 壤土   | 0.45    | 0.81        | 1.47                   | 18      | 0.10                      |
| 砂土   | 0.41    | 0.44        | 1.48                   | 6       | 1.00                      |
| 砂壤土  | 0.44    | 0.63        | 1.46                   | 12      | 2.26                      |
| 粘土   | 0.58    | 0.72        | 1.42                   | 31      | 0.09                      |

1.4 模型参数的敏感性分析

参数敏感性分析采用保持其他变量不变, 增加或减少单个变量值 10% 的方法. 分析的对象包括输入数据中的主要土壤性质(初始条件及土壤水力学参数)和农业管理(施氮量、灌水量)两方面, 影响的输出变

量为土壤水分年渗漏量和土壤氮素年渗漏量。

根据表 2 的分析结果, DNDC 模型中影响土壤水分渗漏和氮素淋失的敏感因素为降雨和灌溉值, 其他参数如土壤田间持水量值、pH 值和饱和导水率

的变化对 2 项输出变量的影响依次减小。另外, 土壤中初始  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度对淋失结果的影响较大, 因此模拟过程需要设定一定的“预热期”, 以减少初值设定不当对结果的影响。

表 2 模型参数的敏感性分析/%

| Table 2 Sensitivity analysis on parameters and variables of the model/% |                                      |       |        |       |      |       |      |         |      |                       |        |       |        |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|--------|-------|------|-------|------|---------|------|-----------------------|--------|-------|--------|------|-------|
| 项目                                                                      | 标准值                                  | 降雨    |        | 田间持水量 |      | 饱和导水率 |      | 初始 pH 值 |      | 初始 $\text{NO}_3^-$ -N |        | 灌水量   |        | 施氮量  |       |
|                                                                         |                                      | 10%   | -10%   | 10%   | -10% | 10%   | -10% | 10%     | -10% | 10%                   | -10%   | 10%   | -10%   | 10%  | -10%  |
| 氮素年淋失量                                                                  | 89.69 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ | 24.25 | -15.51 | -8.83 | 7.93 | 0.00  | 0.00 | -1.79   | 0.60 | 9.10                  | -11.11 | 19.00 | -29.20 | 1.33 | -1.06 |
| 水分年渗漏量                                                                  | 201 mm                               | 24.44 | -17.54 | -9.24 | 8.64 | 0.00  | 0.00 | 0.00    | 0.00 | 0.00                  | 0.00   | 19.60 | -30.52 | 0.00 | 0.00  |

1.5 田间试验验证

1.5.1 田间试验方法

为验证 DNDC 模型对该地区土壤水分渗漏和氮素淋失的模拟效果, 于 2006 年 6 月~2007 年 9 月在中国科学院封丘农业生态试验站内进行了水氮控制田间试验。该站位于天然文岩渠流域内河南省封丘县潘店乡(北纬  $34^{\circ}53'$ ~ $35^{\circ}14'$ , 东经  $114^{\circ}14'$ ~ $114^{\circ}45'$ ), 土壤类型为潮土, 土壤质地为砂壤土。

试验单元为  $8\text{ m}\times 6\text{ m}$  面积的冬小麦-夏玉米轮作田块, 共设置 3 个试验重复。试验期间的气象数据来自于试验站内的气象站。农田管理(灌溉量/频率, 施肥量/频率)参考当地农民通常的管理习惯, 试验期内的总降雨量为  $1\,011.2\text{ mm}$ , 灌溉 4 次, 总灌水量为  $462\text{ mm}$ , 施肥 6 次, 氮肥种类为尿素, 折合纯氮后总量为  $570\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。单元四周埋设  $80\text{ cm}$  深的混凝土板防止土壤水氮的侧向交换。单元内分别布设中子管、溶液采集器(suction cups)和张力计, 用以监测土壤含水量、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度和土壤水势。

中子管的监测范围为  $0\sim 170\text{ cm}$ , 利用中子仪每隔  $10\text{ cm}$  测定 1 个含水量数据<sup>[23]</sup>, 周期为 5 d 或 1 周(降雨、灌溉后加测)。土壤储水量  $V$  的表示方法为:

$$V = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot z_i \tag{1}$$

式中,  $n$  为研究土体分层数,  $\theta_i$  为第  $i$  层土壤的体积含水量,  $z_i$  为第  $i$  层土壤厚度。

溶液采集器的埋设深度分别为  $20$ 、 $40$  和  $80\text{ cm}$ , 吸取土壤溶液, 用以测定  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度, 观测频率同中子法含水量观测。 $\text{NO}_3^-$ -N 的测定方法为紫外分光光度法。采用分光光度计直接测定土壤溶液(或稀释溶液)在  $220$  和  $275\text{ nm}$  波长处的吸光度值, 利用吸光度与  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度的工作曲线, 算出溶液中的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度<sup>[24]</sup>。 $\text{NH}_4^+$ -N 的测定方法为靛酚蓝比色法, 吸取  $1\sim 5\text{ mL}$  土壤溶液, 放入  $50\text{ mL}$  容量瓶中, 稀释至  $30\text{ mL}$  后依次加入  $5\text{ mL}$  酚溶液和  $5\text{ mL}$

次氯酸钠碱性液, 摇匀, 在室温下放置  $1\text{ h}$  后, 加入  $1\text{ mL}$  掩蔽剂以溶解可能生成的沉淀物, 定容后测定  $625\text{ nm}$  波长处的吸光度值, 利用工作曲线算出溶液中的  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度<sup>[25]</sup>。

张力计的埋设深度为  $20$ 、 $40$ 、 $80$ 、 $170$  和  $190\text{ cm}$ , 用以测定不同深度处的土壤基质势, 观测频率与含水量观测相同。根据试验结果, 土壤第  $i$  层的基质势梯度  $\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_i$  可表示为:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta z_i} \tag{2}$$

式中,  $h_i$  和  $h_{i-1}$  分别为第  $i$  层下界面和上界面处的基质势的观测值,  $\Delta z_i$  为第  $i$  层土壤的厚度。取向上为正向, 根据非饱和流 Darcy 定律, 由下界面处的基质势梯度  $\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_n$  和导水率  $K(h)$  可得土体每日下渗的水量  $Q$ :

$$Q = -K(h) \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_n + 1 \right] \tag{3}$$

再由下界面处的土壤氮素浓度  $\rho$  则可以求得土体的氮素淋失量  $N$ :

$$N = \rho \cdot Q \tag{4}$$

1.5.2 模型校验

利用上述田间试验对 DNDC 的模拟效果进行了检验。以相关系数( $r$ )和均方根误差(RMSE)来衡量模拟值与实测值之间的拟合程度, 各项模拟结果与田间试验结果的对比见图 2~5。图 2 中  $1\text{ m}$  土体田间储水量模拟值与实测值的相关系数达到了  $0.94$  ( $n=40$ ), RMSE 为  $15.66\text{ mm}$  ( $n=40$ )。图 3 中下界面硝态氮含量实测结果与 DNDC 模拟结果的相关系数达到了  $0.66$  ( $n=49$ ), RMSE 为  $2.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $n=49$ )。图 4 中土壤水日渗漏量模拟值与实测值间的相关系数为  $0.89$  ( $n=40$ ), RMSE 为  $9.00\text{ mm}$  ( $n=40$ )。图 5 中氮素日淋失量模拟值与实测值间的相关系数为  $0.94$  ( $n=39$ ), RMSE 为  $1.68\text{ mg/L}$  ( $n=39$ )。由以上

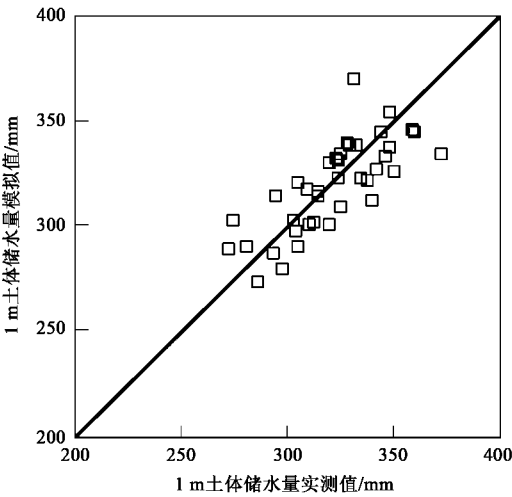


图 2 土壤储水量的实测值与模拟值

Fig.2 Measured and simulated values of soil water storage

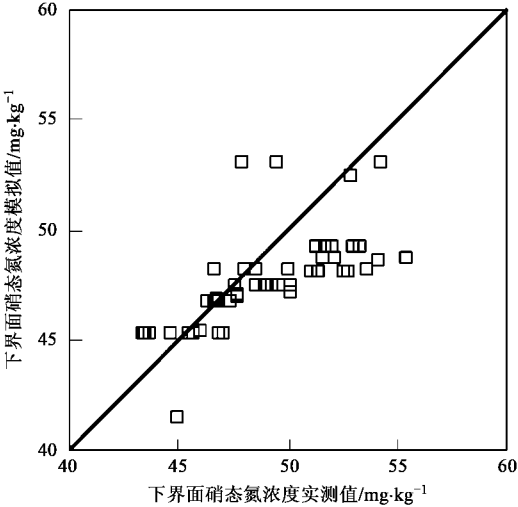


图 3 土壤下界面 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度实测值与模拟值

Fig.3 Measured and simulated values of lower boundary  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration

统计分析可见,DNDC 模型对土壤水氮循环过程的模拟效果较好,虽然部分数据存在误差,但原因是多方面的,除模型因素外,田间测定方法的精确性,降雨、灌溉的观测误差等都可能影响两者的吻合程度.

DNDC 模型经田间试验验证,能够反映该地区土壤水分渗漏和氮素淋失的实际变化趋势.将 DNDC 应用于该地区进行土壤水分渗漏和氮素淋失模拟是可靠、可行的.

2 模型应用

2.1 模型条件设定

DNDC 模型需要天然文岩渠流域的气象、土壤

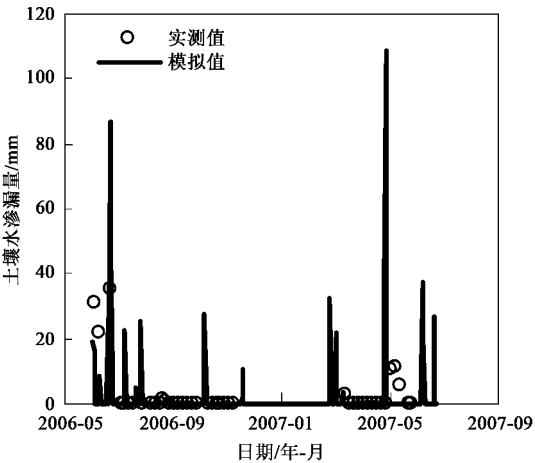


图 4 土壤水渗漏量的实测值与模拟值

Fig.4 Measured and simulated values of soil water drainage values

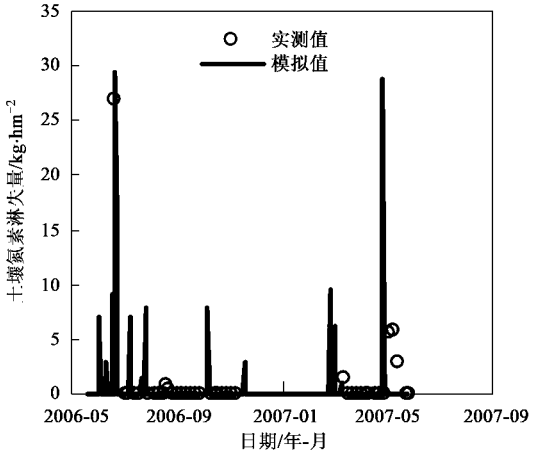


图 5 土壤氮素淋失量的实测值与模拟值

Fig.5 Measured and simulated values of nitrogen leaching values

性质和农业管理措施三方面的数据<sup>[13]</sup>.模拟所需的气象数据采用该流域的多年平均降雨、气温数据,土壤属性数据采用上文所述土壤属性数据库,农业管理措施设定参见表 3.其中的农业管理措施设定参考了当地生产习惯,小麦和玉米在播种同时进行耕作、施肥和灌溉,生长期再追肥 1 次,冬小麦还要灌“返青水”和“灌浆水”.为减少初值设定对结果造成的影响,模拟时间设为 2 a,第 1 a 为“预热期”,第 2 a 的模拟值用作结果分析.

2.2 结果与分析

2.2.1 天然文岩渠流域土壤水分渗漏和氮素淋失的模拟结果

由图 6 可以看出,在多年平均气温、降水及表 3 所示的农业管理措施条件下,该流域土壤的水分年渗漏量大多在 220 ~ 327 mm 之间,且不同土壤间差

| 表 3 DNDC 模拟过程所采用的农业管理措施                                |            |            |            |                             |              |
|--------------------------------------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------|--------------|
| Table 3 Agricultural management used in the DNDC model |            |            |            |                             |              |
| 生长季                                                    | 灌溉         |            | 施肥         |                             | 耕作日期<br>/月-日 |
|                                                        | 日期<br>/月-日 | 灌溉量<br>/mm | 日期<br>/月-日 | 施肥量<br>/kg·hm <sup>-2</sup> |              |
| 玉米<br>(6~9月)                                           | 06-13      | 120        | 06-13      | 76                          | 06-13        |
|                                                        |            |            | 07-22      | 114                         |              |
| 小麦(10~次年6月)                                            | 03-05      | 24         | 10-15      | 114                         | 10-14        |
|                                                        | 10-15      | 100        | 03-05      | 76                          |              |
|                                                        | 05-02      | 220        |            |                             |              |

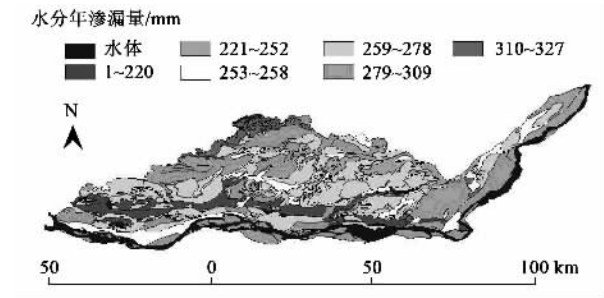


图 6 天然文岩渠流域土壤水分年渗漏量分布  
Fig.6 Distribution of annual soil water drainage in Tianranwenyanqu Basin

别明显:流域内分布最广的砂壤土的水分年渗漏量为 278 mm,约占输入水量的 24%;黏土、灌淤土的导水能力差,水分渗漏较少,年渗漏量分别为 220 mm 和 252 mm;细风砂土、砂土等导水能力较好,年渗漏量超过了 327 mm,占了降雨和灌溉总和的 28%.

由图 7 可见,在模型设定条件下,该流域的氮素年淋失量在 70~100 kg·hm<sup>-2</sup>之间,其中,砂壤土的氮素年淋失量为 91.5 kg·hm<sup>-2</sup>,占氮肥年施用量的 24%;固定细风沙土的淋失量则达到 100.6 kg·hm<sup>-2</sup>,占氮肥年施用量的 26.5%.在目前的农业管理模式 下,该流域内各种土壤均存在明显的氮肥淋失.

**2.2.2 模拟结果分析**

表 4 反映了水分渗漏和氮素淋失在不同季节 (小麦季和玉米季)、不同土壤中的分布情况.可见,天然文岩渠流域土壤水分渗漏和氮素淋失的时间

| 表 4 水分渗漏和氮素淋失的模拟结果                                            |       |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Table 4 Simulated water drainage and nitrogen leaching amount |       |      |      |      |      |      |
| 项目                                                            | 细风沙土  | 灌淤土  | 壤土   | 砂土   | 砂壤土  | 粘土   |
| 水分年渗漏量/mm                                                     | 327   | 220  | 258  | 309  | 278  | 252  |
| 氮素年淋失量/kg·hm <sup>-2</sup>                                    | 100.6 | 73.1 | 79.8 | 96.7 | 91.5 | 81.5 |
| 玉米季氮素淋失量/kg·hm <sup>-2</sup>                                  | 31.8  | 26.9 | 22.4 | 29.1 | 26.4 | 26.9 |
| 小麦季氮素淋失量/kg·hm <sup>-2</sup>                                  | 68.8  | 46.2 | 57.4 | 67.6 | 65.1 | 54.6 |

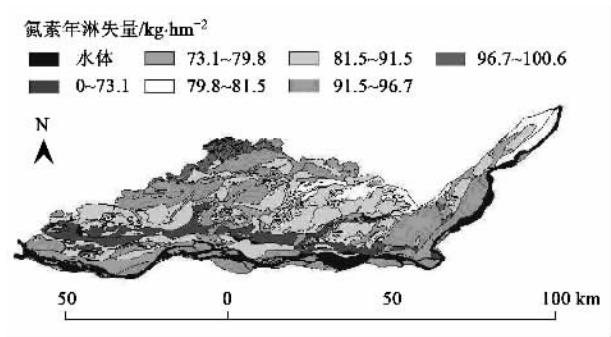


图 7 天然文岩渠流域土壤氮素年淋失量分布  
Fig.7 Distribution of annual soil nitrogen leaching in Tianranwenyanqu Basin

和空间分布不均.水分渗漏和氮素淋失集中于某些时期,且不同土壤间水氮损失差别较大.小麦季的淋失要多于玉米季,砂质土壤的淋失则要多于壤土和粘质土壤.

传统农业管理中高施肥量、大水漫灌的方式,存在严重缺点,不但降低了水肥利用效率,而且会引起了严重的水分渗漏和氮素淋失问题.根据 DNDC 的模拟结果,若小麦、玉米生长期间采用高肥、漫灌的方式,该流域的各种土壤均会产生明显的水氮淋失.小麦季的氮素淋失主要集中于 10 月播种期施肥、灌溉后及次年 5 月灌浆期追肥、灌溉后,而玉米季的氮素淋失则主要在播种期施肥、灌溉后及生长期间的强降雨后.可见,不合理的灌溉、施肥以及暴雨是造成土壤水氮淋失的因素之一.在满足作物生长的前提下,注意施肥、灌溉方式,控制水肥量,将能有效减少土壤水氮淋失.

土壤保水保肥能力的不同造成了土壤水氮淋失空间分布的明显差异,砂质土壤更易发生水肥流失.从图 6 和图 7 可以看出,在相同的环境下,固定细风沙土、砂土区的损失量更大,氮素年淋失量达到了 100.6 kg·hm<sup>-2</sup>和 96.7 kg·hm<sup>-2</sup>.可见,土壤质地较粗,保水保肥能力差也是造成某些土壤中水氮淋失的重要原因.若为追求高产在砂质土壤中盲目灌溉、施肥,将会造成更加严重的水氮损失.

总体看来,灌溉措施不当、施肥盲目和土壤自身的保水保肥能力差是导致天然文岩渠流域土壤水肥流失的主要原因.氮肥对地下水的污染分布面广,一旦对环境造成影响,治理将非常困难.因此,需要引起人们的高度重视,加强预测与监管力度.以模型为工具,针对不同土壤、不同时期进行科学预测,合理规划水肥施用方案,是减少该流域土壤水分渗漏和氮素淋失的有效手段.

3 结论

(1)以 DNDC 模型为基础,根据天然文岩渠流域的气象、土壤和农业管理资料,建立了该流域冬小麦-夏玉米轮作下的农田土壤水分渗漏和氮素淋失模拟系统.经水氮控制田间试验的验证,模型对土壤储水量、下界面处的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度、土壤水分渗漏量和土壤氮素淋失量的模拟均达到了较好的水平.该模型应用于该流域的土壤水氮淋失研究是可靠、可行的.

(2)DNDC 模型对天然文岩渠流域土壤水氮淋失的模拟结果显示,在目前的农业种植、管理模式下,流域内大多数地区的土壤水分渗漏和氮素淋失问题都较为严重.分布最广的砂壤土地区的氮素年淋失量达  $91.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占氮肥年施用量的 24%,固定细风沙土甚至达到了  $100.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,超过了氮肥年施用量的 26.5%.氮肥淋失不仅受土壤结构影响,灌溉措施不当、盲目施肥也是造成土壤水氮损失的重要原因.

(3)天然文岩渠流域要保持农业持续高产稳产和生态环境的健康发展,需要提高水肥利用效率,减少水分和氮肥向地下水的流失.以模型为工具,针对易淋失土壤和易淋失时期寻求最优化的水肥施用方案,将是一种简便、有效的方法.

参考文献:

[ 1 ] 张福锁,马文奇,陈新平.养分资源综合管理理论与技术概论[M].北京:中国农业大学出版社,2006. 38-40.

[ 2 ] 陈子明.氮素-产量-环境[M].北京:中国农业科技出版社,1996.

[ 3 ] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.

[ 4 ] 邓建才,陈效民,卢信,等.封丘地区主要土壤中硝态氮运移规律研究[J].农业环境科学学报,2005,24(1):128-133.

[ 5 ] 朱安宁,张佳宝.黄潮土的土壤水渗漏及硝态氮淋溶研究[J].农村生态环境,2003,19(1):27-30.

[ 6 ] 张云贵,刘宏斌,李志宏,等.长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):

711-716.

[ 7 ] 李晓欣,胡春胜,Herbert S J.太行山山前平原冬小麦生长季硝态氮的淋失研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):83-85.

[ 8 ] 张维理,田哲旭,张宇,等.我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J].植物营养与肥料学报,1995,1(2):80-87.

[ 9 ] Spalding R F, Exer M E. Occurrence of nitrate in groundwater-a review [J]. J Environ Qual, 1993, 22(3): 392-402.

[ 10 ] 刘翔,刘兆昌,朱琨.氮对地下水的污染预测模型[J].环境科学,1991,12(6):8-11.

[ 11 ] 曹巧红,龚元石.应用 Hydrus-1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2):139-145.

[ 12 ] 毕经纬,张佳宝,陈效民,等.应用 HYDRUS-1D 模型模拟农田土壤水渗漏及硝态氮淋失特征[J].农村生态环境,2004,20(2):28-32.

[ 13 ] Li C S. User's Guide for the DNDC Model [EB/OL]. <http://www.dnnc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC91.pdf>. 2007-04-15.

[ 14 ] Li C S, Frolking S E, Harriss R C, et al. Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: A Florida case study [J]. Chemosphere, 1994, 28(7): 1401-1415.

[ 15 ] Li C S, Farahbakhshazad N, Jaynes D B, et al. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa[J]. Ecological Modelling, 2006, 196: 116-130.

[ 16 ] Zhang Y, Li C S, Zhou X J, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture [J]. Ecological Modelling, 2002, 151: 75-108.

[ 17 ] Wang Y P, Meyer C P, Galbally I E. Comparisons of field measurements of carbon dioxide and nitrous oxide fluxes with model simulations for a legume pasture in southeast Australia [J]. J Geophys Res, 1997, 102: 28013-28024.

[ 18 ] Tang H J, Qiu J J, Van Ranst E, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model [J]. Geoderma, 2006, 134(1-2): 200-206.

[ 19 ] Cai Z C, Sawamoto T, Li C S, et al. Field validation of the DNDC model for greenhouse gas emissions in East Asian cropping systems [J]. Global Biogeochem Cycles, 2003, 17(4): 1107, doi: 10. 1029/2003GB002046, 2003.

[ 20 ] Sagar S, Giltrap D L, Li C S, et al. Modelling nitrous oxide emissions from grazed grasslands in New Zealand [J]. Agric Ecosyst Environ, 2007, 119: 205-216.

[ 21 ] 王遵亲.天然文岩渠流域农业发展战略和综合治理研究[M].北京:科学出版社,1987. 1-6.

[ 22 ] 刘金涛.平原流域水文循环的分布式模型理论及方法研究[D].南京:中国科学院南京土壤研究所,2007.

[ 23 ] 周凌云.中子法和重量法测定土壤含水量的比较[J].核农学通报,1993,14(6):276-279.

[ 24 ] 宋歌,孙波,教剑英.测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J].土壤学报,2007,44(2):288-293.

[ 25 ] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000. 159-160.