

夏玉米生长期黄淮海平原土壤水氮利用效率模拟分析

高如泰^{1,2}, 陈焕伟¹, 李保国¹, 黄元仿^{1*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 农业部土壤和水重点实验室, 北京 100094;
2. 河北农业大学资源与环境学院, 保定 071001)

摘要: 以黄淮海平原为研究区域, 建立并验证了基于地理信息系统(GIS)的土壤水、热、氮和作物生长联合模型。在 1999 年黄淮海平原的农村社会经济条件和土壤、气候等条件背景下, 运用基于 GIS 的联合模型对夏玉米生长期土壤水氮利用效率和氮素损失量的区域分布规律进行评价。结果表明, 由于自然条件和农田管理措施差异, 水分利用效率(WUE)、氮素利用效率(NUE)及土壤氮素淋失情况的空间分布在各地貌区划区之间有明显差异。多元线性逐步回归分析表明: 1 m 土体的氮素淋失量与施氮量、饱和导水率(K_s)、积温、降水和灌水量均呈极显著的正相关; WUE 与施氮量呈极显著的正相关, 而与积温呈极显著的负相关; NUE 与降水和灌水量呈极显著的正相关, 而与施氮量和土壤有机质含量呈极显著的负相关。

关键词: 黄淮海平原; 土壤水分利用效率; 氮素利用效率; 模拟; 地理信息系统

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)06-0033-06

高如泰, 陈焕伟, 李保国, 等. 夏玉米生长期黄淮海平原土壤水氮利用效率模拟分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 33-38.
Gao Rutai, Chen Huanwei, Li Baoguo, et al. Simulation and analysis of soil water and nitrogen behaviors in Huang-Huai-Hai Plain in summer-maize growing season[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 33-38. (in Chinese with English abstract)

0 引言

农田土壤氮素行为包括土壤氮素的转化、运移及作物的吸收利用, 这些过程与土壤水的动态运动直接相关, 因此, 区域农田土壤水氮行为的模拟主要是结合土壤-作物系统中氮素行为建立模型进行定量研究^[1-3]。近年来, 随着地理信息系统(GIS)技术的发展, 应用 GIS 和模拟模型相结合研究区域水、氮行为越来越受到关注, 根据 GIS 和模型的结合程度, 可分为松散结合、紧密结合和完全结合^[4]。目前国内外研究区域溶质运移问题, 以紧密结合方式居多, 并向完全结合方向发展。

黄淮海平原是中国主要粮食产区之一, 目前面临着水资源严重短缺、水氮利用效率不高和农业面源污染加剧等一系列问题, 有关该区域水氮运移的研究, 特别是结合作物生长过程对区域土壤水氮行为进行研究的报道较少^[5-7]。本文拟以黄淮海平原为研究区域, 以田间试验资料为基础, 建立并验证土壤水、热、氮和作物生长联合模拟模型, 实现联合模型与 GIS 的紧密结合, 并对 1999 年在黄淮海平原自然和农村社会经济条件下夏玉米生长期区域农田土壤水氮利用效率进行模拟和分析。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域概况

黄淮海平原位于东经 112°29' 至东海岸线, 北纬 32°17' ~ 40°26' 之间, 面积约 30 万 km², 属暖温带半湿润季风气候。该区年平均气温 8~15℃, 热量适于一年二熟。年降水量 500~950 mm, 受季风的影响空间分布上由东南向西北减少, 且 60%~70% 集中在夏季, 春季易发生干旱。

该区域土壤类型主要是潮土和褐土, 此外, 还分布有少量棕壤和水稻土, 障碍性土壤主要是砂土、盐土和砂姜黑土^[8]。

1.2 土壤水、热、氮和作物生长联合模型的建立和验证

由于土壤氮素行为与土壤水分运移密切相关, 同时有关参数受温度的影响较大, 此外, 作物根系对水分和氮素的吸收也会引起土壤中水、氮的再分布。因此, 本研究将作物生长发育、土壤水分运移、氮素运移和土壤温度四者的模拟联合起来, 建立联合数学模型。图 1 是反映 4 个模块之间关系的框图。

1.2.1 作物生长发育模型

利用同化和呼吸过程来描述作物的光温生产潜力。其中, 同化生产过程为光辐射、温度及作物生理特性的函数; 呼吸过程包括维持呼吸和生长呼吸^[9]。在此基础上, 引进水分胁迫因子 k_w 和氮素胁迫因子 k_n 对作物的干物质质量进行修正^[10]。

1.2.2 土壤水分运移模型

应用一维土壤水动力学方程对土壤水分状况进行模拟, 控制方程和定解条件如下

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(h) \frac{\partial H}{\partial Z} \right] + S \quad (1)$$

$$h = h_0(Z) \quad 0 \leq Z \leq 100 \quad t = 0 \quad (2)$$

收稿日期: 2005-07-01 修订日期: 2006-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40201023); 国家高技术研究发展计划(2003AA209020; 2001AA245021); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0412)

作者简介: 高如泰(1972-), 男, 河北滦南人, 博士生, 研究方向为土地利用与信息技术。保定 河北农业大学资源与环境学院, 071001。Email: grthu@vip.sina.com

*通讯作者: 黄元仿(1968-), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤水分、养分模型与水土资源管理。北京 中国农业大学资源与环境学院, 100094。Email: yfhuang@china.com

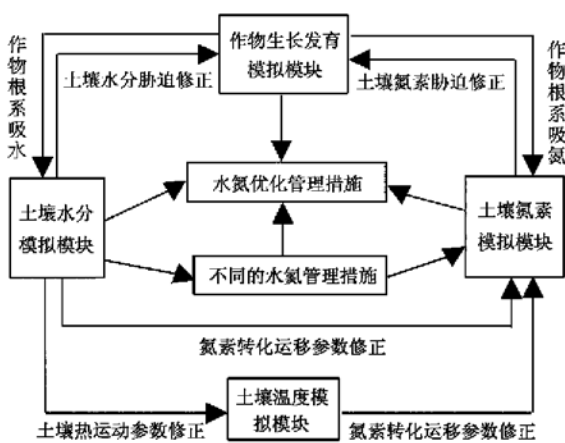


图1 联合模型总体关系图
Fig.1 Framework of combined model

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial Z} + K(h) = E(t) \quad Z = 0 \quad t > 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial Z} = 0 \quad Z = 100 \quad t > 0 \quad (4)$$

式中 $C(h)$ ——土壤比水容量, cm^{-1} ; h ——土壤负压水头, cm ; H ——土壤总水头, cm ; $K(h)$ ——土壤导水率, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; t ——运移时间, d ; Z ——空间坐标, 向下为正; $E(t)$ ——与时间有关的土壤水分蒸发或入渗强度, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; 100——下边界深度, cm ; S ——水分运动源汇项, 主要为根系吸水。下边界采用自由排水边界条件进行求解^[11,12]。

数值方法: 采用有限差分法离散、求解。差分法的剖分网格如下: 空间网格垂直剖分结点按等步长(2 cm)划分; 时间步长为变步长, 视求解水分方程的迭代次数决定其大小, 网格比 $r = \Delta t / (2\Delta Z^2)$, 迭代过程选用预报校正法, 精度控制为 0.001。非结点处参数采用几何平均法取值。

1.2.3 土壤氮素运移模型

在旱地土壤中无机氮主要以硝态氮的形式存在^[6,13], 因此, 本研究假设由土壤有机氮矿化成的铵态氮全部硝化成了硝态氮。同时, 为了简化计算, 本研究在区域作物—土壤系统的水氮运移过程中忽略弥散项, 只考虑对流过程^[6], 得到土壤氮素运移方程如下

$$\frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial t} = -\frac{\partial(q \cdot C)}{\partial Z} + S_1 \quad (5)$$

$$S_1 = K_m - K_{bio} - K_{den} \cdot C - \frac{\partial(un)}{\partial Z} \quad (6)$$

式中 C ——土壤溶液中硝态氮的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; q ——达西通量密度, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; S_1 ——硝态氮运移方程中的源汇项; K_m ——土壤有机氮矿化速率, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$; K_{bio} ——土壤无机氮生物固持速率, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$; K_{den} ——土壤反硝化速率参数, d^{-1} ; un ——根系吸收硝态氮的速率, $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

1.2.4 土壤温度模拟模型

本研究采用 CERES 模型中土温的计算方法来估算不同深度的土壤温度^[14]。某一天任意土层的温度 $T(z)$

由下式估算

$$T(z) = T_{ay} + [A_{mp} \cdot \cos(A_{lx} + Z_d)/2 + T_{rate}] \cdot \exp(Z_d) \quad (7)$$

式中 T_{ay} ——年平均温度, $^{\circ}\text{C}$; A_{mp} ——月均气温的年变幅, $^{\circ}\text{C}$; Z_d ——土温随深度递减的因子; T_{rate} ——实际土表温度随时间的变率; A_{lx} ——计算日期相当于全年的弧度。

1.2.5 模型的输入和输出

模型的输入项主要包括: 1) 研究区域土壤基础资料(土壤水分特征曲线、饱和导水率、有机质含量等)。2) 初始条件(土壤剖面含水量、硝态氮含量、土壤温度等)。3) 气象资料(气温、降雨量、日照时数、两米高度处风速、相对湿度等)。4) 田间管理措施(灌水和施肥的时期和数量、播种和收获时期、秸秆还田量等)。5) 模拟时段内作物生长资料。6) 模拟时段内植株养分分析资料。7) 作物氮素转化的有关参数。

模型的输出项主要包括: 1) 逐日的潜在蒸散量和实际蒸散量。2) 逐日的土壤剖面含水量、硝态氮含量和土壤温度。3) 氮素转化结果。4) 土壤剖面各层作物根系吸氮量。5) 作物生长速率和累积生物量、叶面积指数等。6) 土壤剖面下边界水分通量和无机氮通量。

1.2.6 联合模型的验证

本文利用中国农业大学曲周实验站的田间试验实测资料对模型进行验证。曲周县位于黄淮海平原黑龙港流域上游, 是黄淮海平原的典型代表区域。

在作物生长期, 经采用不同剖面的数据分别进行调参和验证, 得到的土壤剖面水分含量、硝态氮含量、叶面积指数、累积吸氮量和累积生物量的模拟值与实测值的动态趋势较为一致, 模拟产量与实测产量的误差仅为 3.42%。为节省篇幅, 本文仅将夏玉米累积吸氮量的模拟结果列出(图 2)。

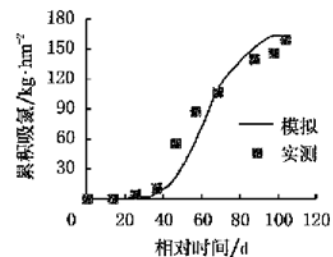


图2 夏玉米累积吸氮量的模拟结果
(图中时间表示从1999年6月14日以后的天数)
Fig.2 Simulated results of nitrogen uptaken by summer maize(days after 1999/06/14)

由此可见, 本文所建的土壤水、热、氮和作物生长联合模型可用于本试验条件下的区域模拟计算。由于本研究中采用气象和土壤数据对模型参数进行了调整和修正, 因此, 该模型也可应用于相近条件下的区域模拟。

1.3 模型与GIS的结合

本研究采用基于COM技术的ArcGIS8.1作为开发平台, 用ArcMap内置的VBA编辑器将联合模型组件嵌入GIS中直接运行, 实现二者的紧密结合, 并部分实

现了完全结合。

1.4 联合模型系统数据库的建立

基于GIS的联合模拟系统的输入项和输出项均为数量庞大的空间数据,为便于进行空间分析采用栅格格式,每个栅格代表的实际面积为 94.54 km^2 。根据模型需要,本研究建立如下几个方面的数据库。

1.4.1 土壤性质数据库

本文应用GIS系统和收集到的源于第二次全国土壤普查的基础资料,对黄淮海平原土壤类型分布的区域特征作了分析、整理,并参照黄淮海平原土壤类型图^[8],将整个区域概化为305个图斑,形成一个带开放性属性数据库的土壤类型图。

为了减少模拟机时,本文将土壤剖面概化成0~30、30~60、60~100 cm三层。根据模型需要建立各层土壤的理化性质和土壤水动力学参数等数据库。其中,相关土壤的水动力学参数采用基于BP神经网络的土壤传递函数得到^[15]。

1.4.2 气象因子数据库

本文从黄淮海平原及其周边选取了有代表性的29个气象站点作为研究区域气象资料的来源,利用距离反比权重法(IDW)插值后得到模型所需的逐日气象因子数据库。

1.4.3 田间管理数据库

本文将黄淮海平原的耕作制度概化为冬小麦—夏玉米轮作,对农田管理资料进行整理后建立了施肥量、灌水量和秸秆还田率的空间数据库,按田间管理不同时期参加模型运算。

1) 氮肥施用量和灌水量。黄淮海平原农田氮肥施用量收集自中国农业统计年鉴,按本区域的农作传统,夏玉米季的施肥量占总施肥量的50%。灌水量资料无法从统计年鉴中直接获取,考虑到该区域农田灌溉是以使用电力能源为主,因此本文将收集到的黄淮海平原25个代表性县市灌溉定额数据与统计年鉴上对应的农村用电量(单位耕地面积用电量)之间进行回归分析,建立了灌溉定额(y)同农村用电量(x)间的回归方程: $y = 1916.0 - 22.4x + 2101.3x^2$ 。该回归方程 $F = 35.67 > F_{0.01} = 5.72$,达到极显著相关水平。参照本区域的农作传统,夏玉米季的灌水量占全年灌水量的三分之一。

2) 施肥和灌水时期及比例。本研究将黄淮海平原按行政区域概化分成几种模式,参考文献资料确定各模式下的水、肥管理次数和时期:京津冀地区只在播前灌一次水,其他各省区在播前和拔节期各灌一次水,每次的灌水量按该作物生长期内灌水次数进行平均分配;各省区均施用基肥,京津冀地区在拔节期进行追肥,基肥和追肥的分配比例为6:4,其他地区在大喇叭口期进行追肥,基肥和追肥的分配比例为4:6。

3) 秸秆还田比率及作物播种和收获期。本文按以大、中型农业机械为主的农机动力使用情况将秸秆还田率分成4个级别:农机动力大于 $9.0 \text{ kW}/\text{hm}^2$ 的地区,秸秆还田率为100%;农机动力在 $6.0 \sim 9.0 \text{ kW}/\text{hm}^2$

的地区,秸秆还田率为75%;农机动力在 $3.0 \sim 6.0 \text{ kW}/\text{hm}^2$ 的地区,秸秆还田率为50%;农机动力小于 $3.0 \text{ kW}/\text{hm}^2$ 的地区,秸秆还田率为25%。

夏玉米的生长期为103 d左右,本研究采用有效积温来模拟作物的生长期,模拟时段播种期为1999年6月10日~6月15日,收获期在1999年9月20日~9月25日。

1.4.4 水分和氮素的初始条件及水、氮利用效率

本文中土壤水分的初值按各层土壤田间持水量的70%赋值,氮的初始含量主要参照各典型土壤剖面含氮量的土壤调查数据进行赋值^[16]。

作物水分、氮素利用效率采用消耗单位土壤水或氮量所获得的经济产量来表示^[17]。

2 模拟结果及其空间分布规律

2.1 产量模拟结果分析

产量模拟结果的总体规律表现为,黄淮海平原的中纬度地区产量较高,多在 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上;而东北部和西南部地区的产量较低,一般在 $5000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以下。

本文进一步以黄淮海平原全部336个县(市)夏玉米产量的模拟值与年鉴统计值之间进行回归分析, F 检验值表明模拟值和统计值之间显著相关。因此,可认为产量的模拟值与统计值之间具有比较一致的规律性,这也间接反应了该联合模型在黄淮海平原应用的可行性。

2.2 土壤氮素淋失量的空间分布规律

图3是模拟得到的下边界氮素累积通量,反映了研究区域夏玉米季1 m土体氮素淋失情况,总体趋势表现为山前平原要高于冲积平原。栅格统计分析结果表明,淋失量小于 $10 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的区域面积占整个研究区域的5.2%。淋失量大于 $40 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的区域面积占6.7%,分布比较零星。氮素淋失量在 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$ 和 $30 \sim 40 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的地区面积分布较广,分别占到整个研究区域的6.6%、23.5%和58%。

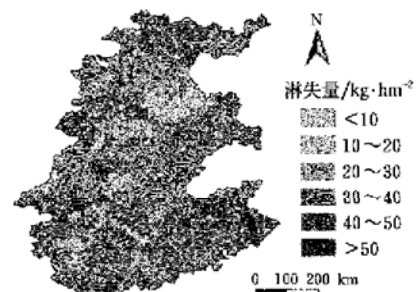


图3 土壤氮素淋失量

Fig. 3 Soil nitrogen leaching amount

2.3 WUE的空间分布规律

模拟得到的黄淮海平原水分利用效率WUE见图4。总体趋势表现为北部和西南部偏低,中部和东南部较高。WUE低于 $1.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的地区占整个区域的37.6%,而WUE大于 $1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$ 地区面积占19.4%,其他地

区 WUE 一般在 $1.0 \sim 1.25 \text{ kg/m}^3$, 占总面积的 43.0%。

总的来看, 与河南清丰县节水试区大面积 WUE 为 $2.15 \sim 2.43 \text{ kg/m}^3$ 水平相比^[18], 本研究区域水分利用效率还有很大的提高潜力。

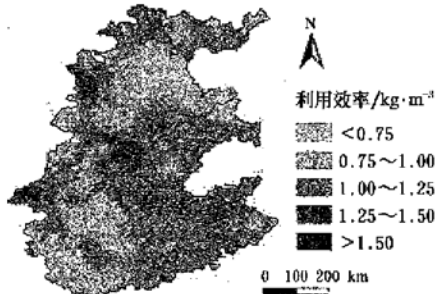


图4 夏玉米水分利用效率

Fig. 4 Water use efficiency of summer maize

2.4 NUE 的空间分布规律

从模拟得到的黄淮海平原夏玉米氮素利用效率 NUE (图5) 中可以看出, NUE 总体表现为南北低、中间高的趋势。 NUE 低于 15 kg/kg 的地区, 面积占到整个黄淮海平原的 5.1%。而 NUE 高于 25 kg/kg 的区域占总面积的 6.9%。其余大部分区域 NUE 为 $15 \sim 20 \text{ kg/kg}$ 和 $20 \sim 25 \text{ kg/kg}$, 面积分别占总面积的 50.2% 和 37.8%。

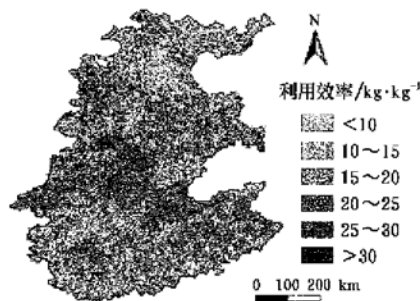


图5 夏玉米氮素利用效率

Fig. 5 Nitrogen use efficiency of summer maize

3 WUE 、 NUE 和氮素淋失的影响因素

构成和影响土壤水、氮行为及利用效率的因素很多, 这些因素间也存在着复杂的相互关系, 本文从中选取了农田管理措施、气象因素和土壤性质等三方面主要因素, 来研究它们对土壤氮素淋失量 (Nq) 和 WUE 、 NUE 的影响。这些影响因素具体细化为: 施氮量 ($Fert$) 和灌水量 (Irr_i); 作物生长期内的降水量 ($Rain$)、积温 (Tem) 和日照时数 (Sun); 土壤各剖面层的饱和导水率 (Ksa 、 Ksb 、 Ksc)、耕层土壤有机质含量 (Om)。

本文采用多元逐步回归方法对上述影响因子进行筛选。为了使样本在自然因子(土壤、气象)和社会经济因子(农田管理措施)方面具有空间对应性, 将县域单元的水氮管理矢量图与土壤类型图进行了叠加生成新的分类单元图。采用分层抽样法获取 130 个分析样本, 涵盖了黄淮海平原所有的地貌类型、土壤、气候条件和经

济水平。由于降水和灌溉对研究对象所起的作用相同, 因此, 在分析过程中将降水量和灌水量合并为一项 (Ir)。分析结果如表 1。

表1 WUE 、 NUE 和氮素淋失与影响因素间的回归分析

Table 1 Regression analyses of WUE , NUE , nitrogen leaching and their impact factors

| 回归方程 | 相关系数* | R^2 |
|---|--------|-------|
| $Nq = 0.413Ksc + 0.0117Ir + 0.0294Fert + 0.539Om + 5.839$ | 0.432* | 0.187 |
| $WUE = 0.00157Fert - 0.000734Tem + 2.844$ | 0.468* | 0.219 |
| $NUE = 1.18Ir - 0.127Fert - 0.374Om + 26.92$ | 0.471* | 0.222 |

注: * $R_{(5,124)} 0.01 = 0.318$; $R_{(4,125)} 0.01 = 0.294$; $R_{(3,126)} 0.01 = 0.265$; $R_{(2,127)} 0.01 = 0.227$ 。

表明土壤饱和导水率、降水和灌水量、施氮量、土壤有机质含量都与 1 m 土体的氮素淋失量呈极显著的正相关。 WUE 与施氮量呈极显著的正相关, 而与积温呈极显著的负相关。 NUE 与降水和灌水量呈极显著的正相关, 而与施氮量和土壤有机质含量呈极显著的负相关。

4 讨论

4.1 WUE 、 NUE 和 1 m 土体氮素淋失量与影响因素的关系分析

土壤有机质含量、土壤饱和导水率对水、氮利用和损失的影响主要表现在: 由于夏季水热条件有利于有机物的矿化, 有机质含量高的土壤由矿化得到的无机氮较多, 从而加剧了氮素淋失, 而饱和导水率高的土壤保水保肥能力差, 也易引起氮素淋失。

施用氮肥能够促进了作物地上部和根系的发育、提高蒸腾效率, 并增加产量, 从而提高了 WUE ^[19]; 而高温天气增加了土表蒸发对水分的消耗, 会导致 WUE 降低。当土壤含水量增加时, 能够减轻土壤水分胁迫, 促进作物对氮素的吸收利用和产量的增加, 因此可提高 NUE 。

一些学者研究认为, WUE 和 NUE 分别与水分和氮肥用量呈二次非线性函数关系, 且表现为先升高后降低^[20,21]。主要原因是当水、氮用量很低时导致作物的水、氮消耗量也很少, 虽然产量也低, 但两者比值 (WUE 、 NUE) 却很高; 随着灌水量和施氮量的增加, 虽然作物产量增加, 但产量与作物消耗水、氮量的比值反而有所下降。由于在传统的农田管理措施下, 水氮用量均能满足作物生长的基本需求, 在此基础上 WUE 和 NUE 分别随水分和氮肥用量的增加而下降, 即在本研究的水氮用量范围内呈负相关关系。

4.2 联合模型及有关参数问题探讨

黄元仿曾采用松散结合, 将土壤水、热、氮模拟模型和 GIS 相结合, 模拟华北平原的区域土壤水和氮素行为^[5]。本文在该研究思路的基础上增加了对作物生长发育的模拟, 并采用了联合模型与 GIS 的紧密结合方式, 在

区域水氮模拟行为模拟方面进行了一些新的尝试。由于本文简化了区域划分的处理,对土壤类型分布、农田水氮处理和气象资料的选取等都进行了概化,并且受区域土壤基础资料的限制,本研究将下边界设定在1 m,同时,采用的自由排水边界条件也使得在本研究条件下获得的水分运动通量略有偏大,并对氮素的淋失结果产生一定的影响。因此,本研究还只是初步的,只局限于探索过程模型与GIS相结合来研究区域问题的方法论。

5 结 论

本文以黄淮海平原为研究区域,建立了土壤水、热、氮和作物生长联合模型并与GIS相结合,模拟分析了1999年夏玉米生长期农田土壤水分和氮素的利用效率及氮素的淋失状况。结果表明,由于受气象因素、农田管理措施、土壤性质等因素的影响,黄淮海平原农田土壤的WUE、NUE及氮素淋失量的分布有明显的空间变异性。多元线性逐步回归分析表明:1 m土体的氮素淋失量与土壤饱和导水率、降水和灌水量、施氮量、土壤有机质含量都呈极显著的正相关;WUE与施氮量呈极显著的正相关,而与积温呈极显著的负相关;NUE与降水和灌水量呈极显著的正相关,而与施氮量和土壤有机质含量呈极显著的负相关。该联合模型可应用于区域农田决策管理,并为黄淮海平原农田管理措施的优化选择提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] Geng Q Z, Girard G, Ledoux E. Modeling of nitrogen cycle and nitrate transfer in regional hydro-geologic systems[J]. *Ground Water*, 1996, 34(2): 293- 304.
- [2] 黄元仿,李韵珠,陆锦文. 田间条件下土壤氮素运移的模拟研究: I 模型[J]. *水利学报*, 1996, (6): 9- 14.
- [3] Birgitte H, Erik S K, Ruth G, et al. Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems—a systems modelling approach [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 65- 82.
- [4] Gogu R, Carabin G, Hallet V, et al. GIS-based hydro-geological databases and groundwater modeling [J]. *Hydrogeology Journal*, 2000, 9(6): 555- 569.
- [5] 黄元仿,李韵珠,李保国,等. 区域农田土壤水和氮素行为模拟[J]. *水利学报*, 2001, (11): 87- 92.
- [6] 张世榕. 基于GIS的区域水氮行为模拟与管理分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [7] Li Yong, Chen Deli, White R E, et al. Coupling GIS with nitrogen leaching models[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(3): 193- 206.
- [8] 石元春,贾大林. 黄淮海平原农业图集[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1988.
- [9] FAO. Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1. Methodology and results for Africa. *World Soil Resources Report 48*. Rome[M]. 1978.
- [10] Pandey R K, Maranville J W, Chetima M M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46: 15- 27.
- [11] Vaughan P J, Simunek J, Suare Z, et al. Unsatchem-geo: modeling water flow and multicomponent solute transport in a GIS context [A]. In Corwin D L and Loague K. (ed.) *Application of GIS to the modeling of non-point source pollutants in the vadose zone*[C]. *Soil Science Society of America, Madison, USA*, 1996: 235- 246.
- [12] 李久生,张建君,饶敏杰. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J]. *水利学报*, 2005, 36(8): 932- 938.
- [13] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 692- 698.
- [14] Ritchie D J T, Godwin D D. [http://nowlin.ces.msu.edu/wheat_book/CERES_Wheat_2.0\[EB/OL\]](http://nowlin.ces.msu.edu/wheat_book/CERES_Wheat_2.0[EB/OL]). 2004-8-3.
- [15] 高如泰,陈焕伟,李保国,等. 基于BP神经网络的土壤水力学参数预测[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 641- 646.
- [16] Basha H A. Multidimensional linearized nonsteady infiltration with prescribed boundary conditions at the soil surface[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 75 - 83.
- [17] 李韵珠,王凤仙,黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定义的比较[J]. *土壤通报*, 2000, 31(4): 150- 155.
- [18] 沈振荣,汪林,于福亮,等. 节水新概念—真实节水的研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 1- 12.
- [19] 张仁陟,李小刚,胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[M]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(3): 221 - 226.
- [20] 孟兆江,刘安能,吴海卿,等. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(1): 86- 90.
- [21] Zhu X K, Guo W S, Zhou Z Q, et al. Effects of nitrogen on N uptake, grain yield and quality of medium-gluten wheat Yangmai 10[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2005, 4(6): 421- 428.

Simulation and analysis of soil water and nitrogen behaviors in Huang-Huai-Hai Plain in summer-maize growing season

Gao Rutai^{1,2}, Chen Huanwei¹, Li Baoguo¹, Huang Yuanfang^{1*}

(1. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, Key Laboratory of Soil and Water, Ministry of Agriculture; College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100094, China;

2. College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: The Huang-Huai-Hai Plain (HHHP) was selected as the research region of this paper. A geographic information system based conjunctive simulation model incorporating soil water, heat, nitrogen behaviors and crop growth was established and validated. The regional distributions of water and nitrogen use efficiency (WUE and NUE), and nitrogen loss were studied under the soil, meteorological and rural socio-economical condition of HHHP in 1999 by the GIS-based model. The results show that, due to the variations in biophysical conditions and farming practices, the inter-physiognomy variations on WUE , NUE as well as soil nitrogen leaching has exhibited significant differences. The multivariate stepwise regression results show that in summer-maize growing season, nitrogen leaching was significantly positively correlated with nitrogen fertilizer applied (NFA), saturated hydraulic conductivity (K_s), Active accumulated temperature (ACT), rainfall and irrigation amount (RIA). WUE was significantly positively correlated with NFA and significantly negatively correlated with ACT. NUE was significantly positively correlated with RIA and significantly negatively relative with NFA and soil organic matter (SOM).

Key words: Huang-Huai-Hai plain; water use efficiency; nitrogen use efficiency; simulation; geographic information system