

农田尺度下土体硝酸盐淋失的随机模拟 及其风险性评价*

胡克林¹ 李保国¹ 黄元仿¹ 陈德立² White R E²

(1 中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)

(2 澳大利亚墨尔本大学资源管理学院, 维多利亚 3010, 澳大利亚)

摘要 以田间试验为基础, 对所建立的简化土壤水氮联合运移模型进行了验证。将条件模拟方法所得到的表层土壤饱和导水率(K_s)的随机场与该联合模型相结合, 随机地模拟了冬小麦地 1999 年 3 月 15 日至 6 月 10 日这一时段的硝酸盐淋失情况。在总来水量为 353.8 mm、施 N 量为 86.25 kg hm^{-2} 的情况下, 2 m 土体硝酸盐淋失量最小值为 $N 15.04 \text{ kg hm}^{-2}$, 最大值为 $N 26.04 \text{ kg hm}^{-2}$, 分别占此段施肥量的 17.4% 和 30.2%。以传统方法(K_s 平均值)所得到硝酸盐淋失量作为对照, 发现硝酸盐淋失量超过该值且概率大于 70% 的面积约占到田块总面积的 20% 左右。说明由于田间空间变异的作用, 造成了硝酸盐淋失的巨大差异, 故不能用传统的方法来代替, 因为这样做就掩盖了地下水可能造成硝酸盐污染的风险性。

关键词 农田尺度; 饱和导水率; 硝酸盐淋失; 随机模拟; 风险性评价

中图分类号 S143.1; S152 文献标识码 A

近年来, 我国化肥施用量不断增加, 尤其是氮肥的增加^[1], 对环境造成了严重的污染, 特别是对浅层地下水的污染, 已引起了广泛关注^[2-3]。

硝酸盐淋失对地下水的污染问题一直是土壤学研究的热点之一。国外从 20 世纪 80 年代就开始了农田土壤硝酸盐淋失的定量化研究, 并且有这方面的专著和专门召开的国际会议^[4-6], 主要研究了天气变化、灌溉制度、氮肥种类、施肥量、土壤性质、作物类型、耕作制度、不同生态系统等因素对硝酸盐淋失的影响。所采用的模型主要有 GLEAMS^[7]、NLEAP^[8]、LEACHM^[9]、DAISY^[10]、RZWQM^[11] 等。国内从 20 世纪 90 年代中期才开始土壤氮素运移的研究, 黄元仿等^[12] 对北京郊区一块冬小麦地的土体硝酸盐淋失进行了研究, 发现硝酸盐淋失主要发生在返青-拔节期, 其淋失量与灌水量密切相关。曹巧红和龚元石应用 HYDRUS-1D 模型研究了天气变化条件下农田土壤氮素的淋失特征^[13]。另外一些学者对淹水条件下稻田土壤氮素的转化迁移进行了研究^[14, 15]。

以上大多数研究者所采用的方法基本上是确定

性的模型方法, 并且将整个田块看作是均一的, 很少有人考虑土壤属性空间变异对硝酸盐淋失的影响, 所得到的结果并不能反映整个田块硝酸盐淋失的真实情况。因此, 确定性模型必须由随机性模型代替, 至少应在确定性模型中引入随机参数^[16]。由于土壤水力学性质对溶质迁移的影响较大, 已经有人模拟了其空间变异性对土壤水分和盐分运动的影响^[17, 18], 但将其与氮素淋失模型相结合的研究还很少见。因此, 本研究将选择农田尺度下变异性较大的耕层土壤饱和导水率, 来研究其空间变异对硝酸盐淋失的影响, 旨在为正确评价硝酸盐淋失对地下水所造成的污染潜力提供理论依据, 对于农田和区域尺度下的水肥管理及环境保护均具有十分重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点设在河北省曲周县中国农业大学曲周实验站以东, 一块面积约 1 hm^2 、土壤为粉砂质潮土

* 国家自然科学基金项目(30390080 和 40401025) 和国家“863”计划项目(2004AA245020) 资助

- 通讯作者: 李保国(1964-), 男, 山西襄汾人, 教授, 博士, 主要从事资源环境信息技术的研究

作者简介: 胡克林(1971-), 男, 湖北钟祥人, 副教授, 博士, 主要从事土壤空间变异和溶质运移研究

收稿日期: 2004-12-16; 收到修改稿日期: 2005-06-24

的田块上, 该地小麦-玉米一年两作, 试验期间地下水位年变幅为 3.0~4.5 m。将该地划分成若干个 10 m × 10 m 的网格, 并在田块中央的东西和南北方向加密布点(5 m × 5 m), 如图 1 所示, 共设置了 117 个取样点, 取样层次为表层 0~20 cm, 采样时间为 1998 年 3 月。另外, 在该地挖了 3 个土壤剖面 A、B、C, 在每个剖面分别安装了 15 个溶液提取器和 15 根负压计, 1 m 以上每隔 10 cm 一根, 1 m 以下每隔 20 cm 一根; 每个点均安装有中子管和地下水观测孔; 并在中间剖面安装了 11 支热敏电阻温度计, 观测深度为: 0、5、10、15、20、30、40、80、120、160、200 cm。

1.2 测定项目及方法

在 117 个取样点测定其表层土壤容重、机械组成和饱和含水量, 其中 37 个点的土壤饱和导水率(K_s)用圆盘渗透仪测定(见图 1)。其余 80 个点的土壤 K_s 值通过所测得的土壤容重、砂粒、粉粒和粘粒含量及饱和含水量利用土壤转移函数模型 Rosetta 软件^[19] 计算得到。

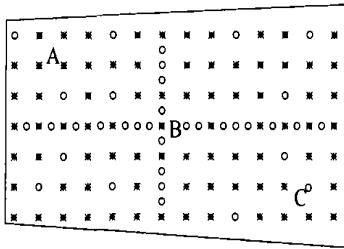


图 1 田间试验布置图

Fig 1 Field arrangement

验证模型的气象资料、土壤资料、作物资料的观测及田间管理措施的记录详见有关文章^[20]。

数据处理采用统计软件 STATISTICA^[21] 和地质统计软件包 GSLIB^[22]。

1.3 田间一维土壤水、热、氮联合运移模型

土壤水分和热运动方程见 HYDRUS-1D 软件^[23]。国内已有一些成功应用 HYDRUS-1D 软件模拟土壤水氮运移的例子^[13,24,25]。土壤氮素运移方程是在 HYDRUS-1D 溶质运移(CDE)方程的基础上, 针对旱地土壤无机氮特点进行了简化, 忽略了 NH_4^+-N (实测浓度小于 3 mg L^{-1}), 主要考虑 NO_3^--N 的运移。假定土壤的有机氮直接矿化成了 NO_3^--N , 对于氮挥发过程, 根据实测结果可认为只在施肥后 2 周内存在氮挥发, 根据每天的实测值从上边界通量中减去。借鉴 Cabon 等^[26] 的方法对氮素转化参

数进行了水分和温度修正^[20]。

本文简化的旱地土壤 NO_3^--N 运移方程如下:

$$\frac{\partial(\theta \cdot C_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[\theta \cdot D \frac{\partial C_1}{\partial Z} \right] - \frac{\partial(qC_1)}{\partial Z} + S_1 \quad (1)$$

$$C_1 = C_{1,0}(Z) \quad 0 \leq Z \leq 200 \quad t = 0 \quad (1.1)$$

$$-\theta \cdot D \frac{\partial C_1}{\partial Z} + q \cdot C_1 = q_0 C_{1,0}(t) \quad Z = 0 \quad t > 0 \quad (1.2)$$

$$C_1 = C_1(t) \quad Z = 200 \quad t > 0 \quad (1.3)$$

式中: C_1 为土壤溶液中 NO_3^--N 的浓度(mg L^{-1}); D 为 NO_3^--N 的扩散-弥散系数($\text{cm}^2 \text{ d}^{-1}$); $C_1(t, 200)$ 主要根据实测值采用线性插值的方法获得。源汇项 S_1 主要包括矿化、生物固持、反硝化、根系吸收等过程, 即

$$S_1 = kk_n - kk_{bio} \cdot C_1 - kk_{den} \cdot C_1 - \frac{\partial(un)}{\partial z} \quad (2)$$

上式中: kk_n 为土壤有机氮矿化速率参数($\mu\text{g cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$); kk_{bio} 为土壤无机氮生物固持速率参数(d^{-1}); kk_{den} 为土壤反硝化速率参数(d^{-1}); un 为根系吸收 NO_3^--N 的速率($\mu\text{g cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$)。

本研究利用 B 剖面 1998 年 10 月 1 日至 1999 年 9 月 30 日的实测资料来调整土壤 N 素的转化和运移参数, 用 1999 年 10 月 1 日至 2000 年 9 月 30 日的数据来验证模型。模型验证结果表明, 土壤水分和温度的模拟值与实测值基本吻合, 结果令人满意, 土壤 NO_3^--N 浓度的模拟值与实测值具有较好的一致性。该联合运移模型的建立和验证详见有关文献^[20] (1)。

1.4 农田表层土壤饱和导水率随机场的实现

本文采用了地质统计学中的序贯高斯模拟方法得到表层土壤 K_s 的随机场。序贯模拟方法是数理统计中非常重要的一种方法, 其主要特点是样本量不是固定不变的, 而是随着分析的进行不断调整。序贯高斯模拟方法^[27] 是贝叶斯理论的一个应用, 此方法根据现有数据计算待模拟点值的条件概率分布, 从该分布中随机取一值作为模拟现实。每得出一个模拟值, 就把它连同原始数据、此前得到的模拟数据一起作为条件数据, 进入下一点的模拟, 因此随着模拟的进行, 条件数据集合会不断扩大, 详细过程见文献^[28]。

2 结果与分析

2.1 农田表层土壤饱和导水率的条件模拟

2.1.1 表层土壤饱和导水率的统计特征值 根据田间实测样本的统计分析, 得到如表 1 的结果。

从表 1 中 K_s 的偏度和峰度系数可知, 表层土壤 K_s 基本服从对数正态分布(经 χ^2 检验), 其均值为

21.72 cm d^{-1} , 其变化幅度比较大, 最大值约是最小值的 7 倍。其变异系数为 0.41, 属于中等变异强度。

表 1 表层土壤饱和导水率的统计特征值

Table 1 Descriptive statistical results of surface soil saturated hydraulic conductivity in field (cm d^{-1})

项目 Item	样点数 Samples	分布类型 Distribution type	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
表层土壤 K_s Surface soil K_s	117	对数正态 Lognormal	0.13 ¹⁾	2.74 ¹⁾	7.74	49.95	21.72	8.91	0.41

1) 原始数据经过对数转换后计算得到的值 The values were obtained by data log-transformation

2.1.2 表层土壤 K_s 的空间结构分析 图 2 中 C_0 表示块金效应; $C_0 + C_1$ 表示基台值; a 表示变程或观测变量间的最大空间自相关距。由于田间土壤机械组成、容重、孔隙度等因素空间变异的影响, 表层土壤饱和导水率的空间自相关距较小, 为 18.25m, 这与国内一些田块尺度的研究结果相似^[29]。

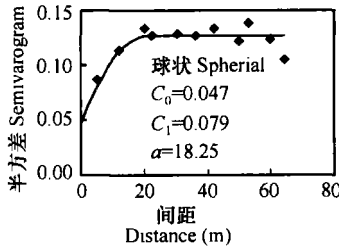
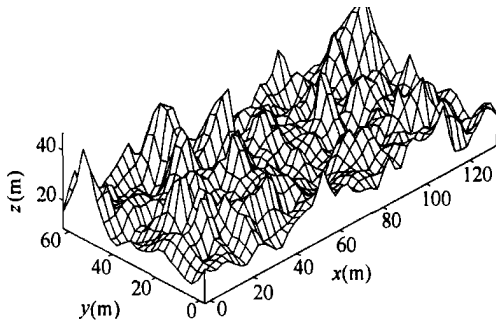


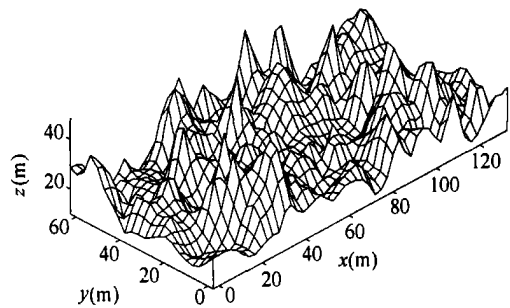
图 2 表层土壤 K_s 半方差函数图

Fig. 2 Semivariogram of surface soil K_s

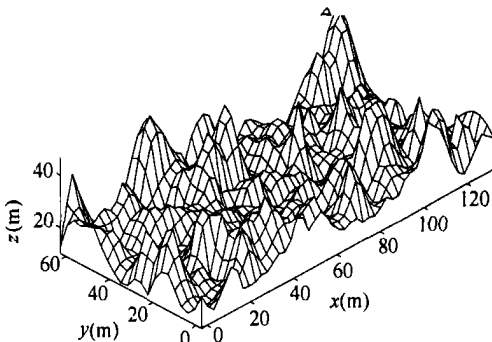
2.1.3 表层土壤饱和导水率的条件模拟 对空间未测点进行估值时, 采用克里格方法所得到的估计值是唯一最优的, 而采用条件模拟方法时, 所得到的未知点的模拟值可以有多个, 事实上, 未测点的值并不是唯一确定的, 而是具有很大的不确定性^[27]。另外, 由于克里格插值具有“平滑效应”并改变了原始数据空间结构的缺陷^[30]。因此, 常将条件模拟得到的随机场模拟值作为模型的输入数据。本文应用序贯高斯条件模拟方法对表层土壤 K_s 的实测数据(10m × 10m 网格数据)进行了 100 次条件模拟, 得到了 K_s 的随机场数据(5m × 5m 网格数据), 图 3 给出了条件模拟部分结果的三维立体图。



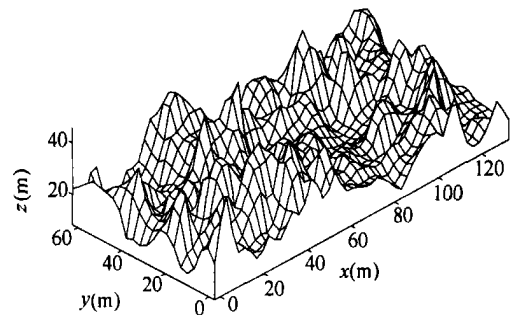
a. K_s 条件模拟结果 (1) First realization of K_s



b. K_s 条件模拟结果 (2) Second realization of K_s



c. K_s 条件模拟结果 (99) 99th realization of K_s



d. K_s 条件模拟结果 (100) 100th realization of K_s

图 3 K_s 的条件模拟部分结果

Fig 3 Part results of soil surface K_s obtained with the conditional simulation method

2.2 农田尺度下土体硝酸盐淋失的随机模拟

由于1998年10月1日至1999年9月28日期间的降雨量较少仅有279.5mm,主要通过灌溉来满足作物对水分的需求。而1999年3月15日至1999年6月10日的灌水和施肥都比较频繁,此时段的施肥量为 $N\ 86.25\ kg\ hm^{-2}$,降雨量为83.8mm,占全年降雨量的30.0%,灌水量达270mm,约占全年总灌水量(675mm)的40%。因此,这一时段的水分渗漏和硝酸盐的淋洗强度都比较大,国内一些研究者也发现在华北平原氮素淋失主要发生在冬小麦返青期和拔节期灌溉后^[12,13,24]。因此,本文以这一时段为例,对硝酸盐淋失进行研究。

将条件模拟所得到的 K_s 随机场数据($5m \times 5m$ 网格数据),代入到土壤水氮联合运移模型中进行计

算,得到了该时段2m土体的硝酸盐累积淋失量(图4)。同时将传统方法作为对照,即将表层土壤 K_s 的平均值(不考虑空间变异的影响)也代入到模型中进行计算,得到了该时段2m土体的硝酸盐累积淋失量为 $N\ 21.59\ kg\ hm^{-2}$ 。

将图4与 K_s 的条件模拟结果相对比可以发现,表层土壤 K_s 大的地方,2m土体的硝酸盐淋失量也较大,如在地块东南角偏南,田块中央靠北边的地方其淋失量均较大。表层土壤 K_s 小的地方,2m土体的硝酸盐淋失量也较小,如在地块西边和中间部位。这说明表层土壤 K_s 是硝酸盐淋失的最直接影响因素之一,因此,本文选择表层土壤 K_s ,来研究其空间变异对土体硝酸盐淋失的影响,是比较合适的。

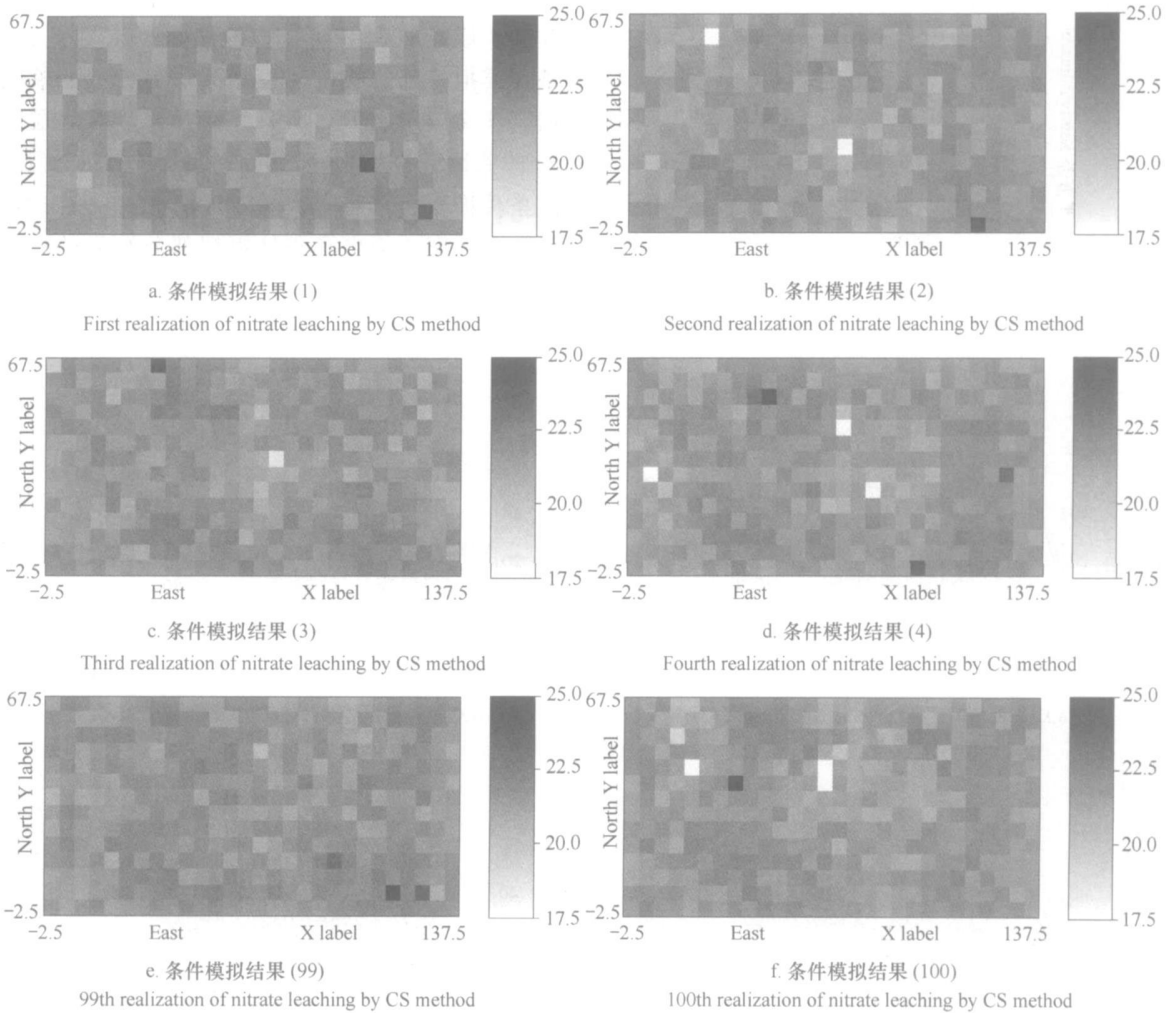


图4 2 m 土体硝酸盐淋失量($kg\ hm^{-2}$)的各次条件模拟结果

Fig 4 Quantities of nitrate leaching ($kg\ hm^{-2}$) by conditional simulation (CS) method in the soil profile 2 m in depth

通过对 100 次条件模拟的硝酸盐淋失量结果分析可知(图 4), 2 m 土体硝酸盐淋失量差异比较明显, 其最小值为 $N\ 15.04\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 最大值达到了 $N\ 26.04\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 最大值约是最小值的 1.7 倍, 它们分别占此时段施肥量($N\ 86.25\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)的 17.4% 和 30.2%。整个田块 80% 以上面积的 2 m 土体硝酸盐累积淋失量在 $N\ 21\sim 22.5\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 范围内, 超过对照值 $N\ 21.59\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ (传统方法) 的面积有 47.2%。大约占田块总面积 5% 的地方硝酸盐淋失量大于 $N\ 22.5\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 主要分布在田块靠近东北角、中间偏东靠近南边、中间偏西靠近北边和中间偏西南方向的局部地方, 为了减少硝酸盐淋失, 需要对这些位置重点进行水肥管理。

2.3 农田尺度下土体硝酸盐淋失的风险性评价

本文采用指示克立格方法来对硝酸盐淋失的风险性进行评价, 该方法的基本原理及计算过程详见有关文献[22, 31, 32], 在这里仅给出计算结果。本研究将传统方法(取 K_s 平均值)计算所得到的硝酸盐淋失量作为阈值或允许值, 将该阈值下的指示半方差函数模型代入到指示克立格方程组中, 通过求解, 最后得到了不同位置处超过该阈值的条件概率, 结果如图 5。

将图 4 与图 5 结合来看, 发现如果某一位置(5m × 5m 小区)的硝酸盐淋失量较大且其周围位置的淋失量也较大时, 则该位置硝酸盐淋失量超标(超过阈值)的条件概率一般都在 75% 以上, 这些位置可以认为是相对“危险”的地方, 都有可能对地下水造成硝酸盐污染。凡是某位置淋失量较小, 而且其周围位置的淋失量也较小时, 则其淋失量超标的概率均在 25% 以下, 可以认为这些位置是相对“安全”的, 为了更进一步地提高作物产量, 可以在这些相对“安全”的位置适当增加水肥。

由图 5 可知, 2 m 土体硝酸盐淋失量超标(超过阈值)的概率大于 80% 的地方, 主要分布在田块中间偏西靠近北边、中间偏西南方向、靠近东北角和中间偏东靠近南边的四个局部地方。硝酸盐淋失量超过对照值且条件概率小于 25% 的面积约占田块总面积的 15% 左右; 概率大于 70% 的面积约占田块总面积的 20% 左右, 其中概率大于 80% 的面积约占总面积的 10% 左右。

通过以上分析, 说明采用传统方法(取 K_s 平均值)来估算整个田块中硝酸盐的淋失量, 是不太合理的。一方面会对某些地方的硝酸盐淋失量估计过高, 另一方面会对某些地方的硝酸盐淋失量估计过

低, 而随机模拟方法能够在一定程度上克服传统模拟方法所带来的不足, 这对于我们进行风险决策是十分有用的。

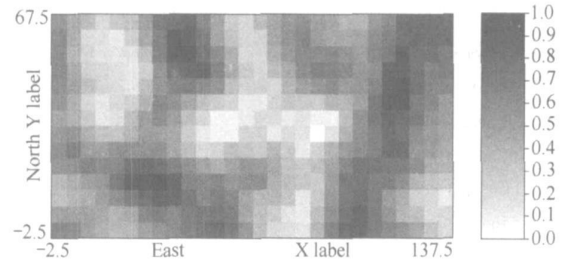


图 5 农田 2 m 土体硝酸盐淋失量超过传统方法所得到的淋失量($N\ 21.59\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)的概率图

Fig. 5 Probability of quantities of nitrate leaching exceeding the mean value (gained with the conventional method) at 2-meter depth in soil profile in the wheat field

3 结论与讨论

以田间试验为基础, 对所建立的简化土壤水氮联合运移模型进行了验证。将条件模拟方法所得到的表层土壤饱和导水率的随机场与该模型相结合, 随机地模拟了冬小麦地 1999 年 3 月 15 日至 6 月 10 日这一时段的硝酸盐淋失情况。在总来水量为 353.8 mm, 施肥量为 $N\ 86.25\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 的情况下, 2 m 土体硝酸盐淋失量最小值为 $N\ 15.04\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 最大值为 $N\ 26.04\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$, 分别占此段施肥量的 17.4% 和 30.2%。

以传统方法(K_s 平均值)所得到的硝酸盐淋失量作为对照值, 发现硝酸盐淋失量超过该值且概率大于 70% 的面积约占到田块总面积的 20% 左右。说明由于田间空间变异的作用, 造成了硝酸盐淋失的巨大差异, 故不能用传统的方法来代替, 因为这样就掩盖了硝酸盐可能造成地下水污染的风险性。

本文仅考虑了表层土壤饱和导水率的空间变异性对硝酸盐淋失的影响, 并且所选取的风险性指标也仅仅是一种探讨, 对于具体地确定风险性指标, 还需根据实际情况来定。另外, 由于田间实际情况的复杂性和其他因素如施肥、灌水和作物长势的不匀以及土壤氮素各个转化过程的空间变异性都是影响硝酸盐淋失的主要因素, 这些都需要进一步研究。

参考文献

- [1] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management

- strategies. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2002, 63: 117~ 127
- [2] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in northern China. *Agri. Ecos. Envi.*, 1996, 59 (3): 223~ 231
- [3] 张庆忠, 陈欣, 沈善敏. 农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13(2): 233~ 238. Zhang Q Z, Chen X, Shen S M. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (2): 233~ 238
- [4] Groot J J R, de Willigen P, Verberne E J L. Nitrogen turnover in the soil-crop system. the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [5] Diekkr ger B, Sndgerath D, Kersebaum K C, *et al.* Validity of agroecosystem models: A comparison of results of different models applied to the same data set. *Ecological Modeling*, 1995, 81: 3~ 29
- [6] Shaffer M J, Ma L W, Hansen S. Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001
- [7] Leonard R A, Knisel W G, Still D S. GLEAMS. <http://sacs.cpes.peachnet.edu/sewrl>. 1987
- [8] Shaffer M J, Schumacher T E, Ego C L. NLEAP. <http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/nleap.htm>. 1995
- [9] Huston J L. LEACHM. <http://www.es.flinders.edu.au/leachm-download/leachweb.htm>. 2001
- [10] Hansen S. DAISY. <http://www.dina.kvl.dk/~abraham/daisy>. 2000
- [11] Hanson J D. RZWQM. <http://www.gpsr.cocostate.edu/gpsr/products/rzwqm.htm>. 2000
- [12] 黄元仿, 李韵珠, 陆锦文. 田间条件下土壤氮素转移的模拟模型 iv 和 ⑤. *水利学报*, 1996, (6): 9~ 23. Huang Y F, Li Y Z, Lu J W. Simulation of soil nitrogen transport under field conditions iv and ⑤ (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, (6): 9~ 23
- [13] 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转移特征. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9 (2): 139~ 145. Cao Q H, Gong Y S. Simulation and analysis of water balance and nitrogen leaching using Hydrus-1D under winter wheat crop (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (2): 139~ 145
- [14] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 排水农田中氮素转化运移和流失. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. Zhang Y F, Zhang W Z, Shen R K, *et al.* Transport, Transformation and Loss of Nitrogen in Drained Agricultural Lands (In Chinese). Wuhan: China Geological University Press, 1997
- [15] 刘培斌, 丁跃元, 张瑜芳. 田间一维饱和一非饱和土壤中氮素运移与转化的动力学模式研究. *土壤学报*, 2000, 37(4): 490~ 497. Liu P B, Ding Y Y, Zhang Y F. The study of 1-dimension saturated-unsaturated mathematical model of nitrogen transport and transformation for the field conditions (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 490~ 497
- [16] Finke P A. Field scale variability of soil structure and its impact on crop growth and nitrate leaching in the analysis of fertilizing scenarios. *Geoderma*, 1993, 60: 89~ 108
- [17] Russo D. Geostatistical approach to solute transport in heterogeneous fields and its applications to salinity management. *Water Resour. Res.*, 1984, 20(9): 1 260~ 1 270
- [18] 杨金忠, 蔡树英, 黄冠华, 等. 多孔介质中水分及溶质运移的随机理论. 北京: 科学出版社, 2000. Yang J Z, Cai S Y, Huang G H, *et al.* Stochastic theory of water flow and solute transport in porous media (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [19] Schaap M G. Rosetta(1.0). <http://www.ussl.ars.usda.gov/MOD-ELS/rosetta/rosetta.html>. 1999
- [20] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 预测农田水分渗漏和氮素淋失的两种模型比较研究. *水科学进展*, 2004, 15(1): 87~ 93. Hu K L, Li B G, Chen D L, *et al.* Comparison of water drainage and nitrate leaching calculated by soil water balance model and dynamic process model (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 87~ 93
- [21] StatSoft. STATISTICA for Windows. Tulsa, UK: StatSoft, Inc., 1995
- [22] Deutsch C V, Journel A G. GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide. New York: Oxford University Press, 1998. 125~ 145
- [23] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M Th. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. U. S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Riverside, California: Colorado School of Mines Publishers, 1998
- [24] 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. *农村生态环境*, 2004, 20(2): 28~ 32. Bi J W, Zhang J B, Chen X M, *et al.* Simulation of soil water leaching and nitrate-N loss with leachate in the field using HYDRUS-1D model (In Chinese). *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2): 28~ 32
- [25] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. *土壤学报*, 2004, 41(4): 493~ 502. Li Y Z, Hu K L. Simulation for the effect of clay layer on the transport of soil water and solutes under evaporation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 493~ 502
- [26] Cabon F, Girard G, Ledoux E. Modeling of the nitrogen cycle in farm land areas (In Chinese). *Fertilizer Research*, 1991, 27: 161~ 169
- [27] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford Univ. Press, 1997
- [28] 李保国, 胡克林, 陈德立, 等. 农田土壤表层饱和和导水率的条件模拟. *水利学报*, 2002, (2): 36~ 40. Li B G, Hu K L, Chen D L, *et al.* Conditional simulation of soil surface saturated hydraulic conductivity at field scale (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (2): 36~ 40
- [29] 黄冠华, 谢永华. 非饱和水分运动参数空间变异与最优估值研究. *水科学进展*, 1999, 10(2): 101~ 106. Huang G H, Xie Y H. Study on spatial variability and optimal estimation of unsaturated flow parameters (In Chinese). *Advances in Water Science*, 1999, 10(2): 101~ 106
- [30] Isaaks E H, Srivastava R M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford Univ. Press, 1989. 278~ 337

[31] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 等. 区域浅层地下水硝酸盐含量评价的指示克立格法. 水利学报, 2001, (3): 1~ 5. Li B G, Hu K L, Huang Y F, *et al.* The use of Indicator Kriging for assessing the nitrate content of regional shallow groundwater (In Chinese). Journal

of Hydraulic Engineering, 2001, (3): 1~ 5

[32] Hu K L, Li B G, Huang Y F, *et al.* Spatial variability of regional shallow groundwater level, EC, nitrate content and risk assessment of nitrate contamination. Environment International, 2005, 31: 896~ 903.

STOCHASTIC SIMULATION AND RISK ASSESSMENT OF NITRATE LEACHING AT FIELD SCALE

Hu Kelin¹ Li Baoguo¹ Huang Yuanfang¹ Chen Deli² White R E²

(1 Department of Soil and Water Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

(2 School of Resource Management, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia)

Abstract In recent years, nitrate contamination of groundwater has become an increasing concern for the health of people in rural areas who consume groundwater daily in China, especially in the North China Plain. Usually, a deterministic model with mean hydraulic parameters is used to estimate the nitrate leaching for the whole agricultural field. In fact, the quantities of nitrate leached are variable from place to place in the field because of the parameters are different, so the simulated results by the deterministic model using mean hydraulic parameters could not represent the field-wide nitrate leaching. The objective of this paper is to evaluate the effect of spatial variability of the surface soil saturated hydraulic conductivity (K_s) on nitrate leaching and to assess the risk of nitrate contamination. First, a soil water-heat-nitrogen simulation model was established and verified based on the field data. Second, a sequential Gaussian simulation method was used to get a random field of the surface soil K_s based on 117 observed values in the field. Finally, the joint model was coupled with the random field of the surface soil K_s , which was gained by a conditional simulation method. During the period from March 15 to June 10, 1999, nitrate leaching was stochastically simulated with the irrigation rate being 353.8 mm and the nitrogen fertilizer application rate being 86.25 kg hm⁻². The accumulated quantities of the leached nitrate ranged from N 15.04 kg hm⁻² to 26.04 kg hm⁻² in the soil profile 2 m in depth, accounting for about 17.4% and 30.2% of the fertilizer used during this period. The area with the probability of nitrate leaching exceeding the value obtained by the conventional method in the control being higher than 70% amounted to about 20%. It was implied that the soil spatial variability could result in change in nitrate leaching. The value obtained with the traditional method in the control could not be used because it obscured the risk of nitrate leaching.

Key words Field scale; Soil saturated hydraulic conductivity; Nitrate leaching; Stochastic simulation; Risk assessment