

降水影响冬小麦灌溉农田水分渗漏和氮淋失模拟分析

曹巧红 龚元石

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094)

摘要 为了研究降水对根层(1.2 m)水分渗漏和氮淋失的影响,采用 Hydrus-1D 模型模拟近 30 年实际气候条件下京郊冬小麦田的水氮运移过程。结果表明,传统水肥管理(灌溉量 270 mm,施氮量 150 kg·hm⁻²)冬小麦农田,降水量小于 50 mm 时,水分渗漏量均值为 5.0 mm;降水量在 50~100 mm,对应水分渗漏量均值为 23.6 mm;当降水量为 100~150 mm 或大于 150 mm 时,平均水分渗漏量为 36.9 或 125.6 mm。对应的氮淋失量分别为 1.5、5.8、9.6 和 40.4 kg·hm⁻²。水分渗漏及氮淋失主要发生在冬小麦返青期和拔节期灌溉后,因此应减少早期灌溉量并应避免过早施肥。水分渗漏量可表示为降水指数的指数函数,而氮淋失量则与水分渗漏量呈线性相关。在可预测降水条件下,文中给出的经验关系式可用于估测水分渗漏量和氮淋失量。

关键词 降水量;水分渗漏;氮淋失;模拟

中图分类号 S 152.42

文章编号 1007-4333(2003)01-0037-06

文献标识码 A

A simulative analysis of influence of precipitation on water leakage and nitrogen leaching in irrigated farmland

Cao Qiaohong, Gong Yuanshi

(College of Natural Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract Climatic factors have evident influences on water and nitrogen behavior and their validity for crop in root zone. The research focused on the influence of precipitation on water leakage and nitrogen leaching in irrigated winter wheat field. The model of Hydrus-1D was used to simulate water movement and nitrogen transport under variable climate of 30 years with winter wheat in suburb of Beijing. The result showed that water leakage and nitrogen leached in irrigated wheat field were little. When precipitation was less than 50 mm, possible water leakage was 5.0 mm; it was 23.6 mm when precipitation was between 50 and 100 mm; precipitation was between 100 and 150 mm, it was 36.9 mm; precipitation was more than 150 mm, it was 125.6 mm. And corresponding nitrogen leached were 1.5, 5.8, 9.6 and 40.4 kg·hm⁻². It was incidental to water leakage and nitrogen leaching after irrigation during earlier growth period. Therefore, irrigation amount should be reduced and fertilization should be avoided at the stage. The quantity of water leakage was exponential function of precipitation index and was linearly relative to the amount of nitrogen leached. Water and nitrogen leached could be evaluated by the experiential equations provided in the article with the predicted precipitation.

Key words climatic factors; water leakage; nitrogen leaching; simulate

农田氮肥流失主要受到水分过程的控制,而天气因素在改变土壤中水氮状况及其对作物有效性方面起着重要作用^[1]。在半干旱半湿润地区,降水和灌溉的时间和量都对根层氮淋失产生重要影响。春季过量降水以及作物生长高峰期灌溉后随即降水会

导致农田氮大量淋失。调整灌溉措施减少根层水分渗漏量,能有效减少生长季内氮淋洗量^[2]。

通过试验测定农田土壤,特别是自由排水土壤的氮淋失量很困难^[3]。另外,田间试验通常也只能获得有限量的数据。数学模型是解决该问题的便捷

收稿日期:2002-04-18,修回日期:2002-09-28

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709);国家自然科学基金资助项目(30070451)

作者简介:曹巧红,博士研究生;龚元石,教授,博士生导师,主要从事农业水资源管理研究,Email:gongysh@mx.cei.gov.cn

途径之一^[4,5]。Pang 等利用 CERES-Maize 模型评估灌溉均匀度和氮管理措施对作物产量和氮淋失的影响^[6,7]。许多研究中采用 NLEAP 模型评估土壤性质、天气因素等环境因子对区域氮淋失潜力的影响^[5,8,9]。

以往研究着重在灌溉施肥措施对农田水氮淋失的影响,或者集中在土壤物理属性的空间变异性对区域氮淋失潜力的影响方面^[8,9],还有一些工作强调有限时间尺度范围内土壤因素对氮淋失潜力的影响^[10],而关于定点氮淋失风险特征过程(基于长期气象数据)的研究相关报道很少^[7]。Khakural 和 Robert 提出的硝态氮淋洗指数的概念中,包含一项“降水指数”,表征季节降水对生育期水氮淋失量贡献大小^[8]。

本研究应用 Hydrus-1D 土壤水氮联合模型,结合系列实际气候条件,模拟变化天气条件下冬小麦农田水氮运移过程。了解传统施肥灌溉管理措施下氮淋失发生的时间和水平,定量分析降水与根层水分渗漏和氮淋失关系,据此评估京郊地区冬小麦农田各种天气条件(1970—1999 年气象资料)特别是降水条件下田间可能的水肥渗漏量,为不同气候年型下调整水肥管理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

田间试验地位于北京市海淀区东北旺乡。田间土壤类型为潮土,在垂直方向上质地类型组成见表 1。

表 1 土壤剖面质地类型组成(美国制)
Table 1 The particles distribution of soil profiles

土壤层 次/cm	机械组成/ %			质地	容重/ (g cm ⁻³)
	砂粒	粉粒	粘粒		
0~30	32.7	50.2	17.1	壤土	1.33
30~60	16.4	56.8	26.8	粉砂质壤土	1.52
60~120	32.9	47.0	20.1	壤土	1.54
120~200	23.9	56.5	19.6	粉砂质壤土	1.68

2000 年试验田水肥处理,即当地人们习惯采用的传统水肥管理措施:分别在 03-24(起身期)、04-23(拔节期)和 05-23(灌浆期)灌水 91.9、95.2 和 83.1 mm,在 04-23 施肥 150 kg·hm⁻²,计算有效施肥量为 120 kg·hm⁻²。

1.2 试验测定(表 2)

表 2 试验观测内容

观测内容	说明
土壤基质势	试验田在 7 个土壤深度层次上(23、45、75、90、105、135 和 165 cm)安装张力计测定土壤基质势
土壤溶液 NO ₃ ⁻ N 浓度	试验田 3 个土壤深度层次上(45、90 和 135 cm)埋有溶液提取器。土壤溶液 NO ₃ ⁻ N 浓度用流动分析仪 (Analytical Conssel, TRAACS2000)测定
作物参数	在作物各生长阶段测定根长密度、叶面积指数、作物吸氮量
气象资料	试验期间逐日气象资料通过试验田自动气象站记录;多年逐日气象资料从北京市海淀区气象站获得

1.3 模型原理

Hydrus-1D 模型由美国盐土实验室开发,模拟非饱和介质中一维水分、热和溶质运移过程。模型中水分和溶质方程分别采用经典的 Richards' 方程(1)和对流-扩散方程(2):

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) - S, \quad (1)$$

式中, h 是水势, θ 是体积含水量, t 是时间, x 是距离步长, S 是吸收项, K 是导水率 (cm d⁻¹)。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D^w \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial qc}{\partial x} - Sc_r - \mu_w c + w \quad (2)$$

式中, c 是液相中溶质浓度, D^w 是溶质在水中的扩散-弥散系数, q 是水分通量密度, c_r 是吸收项浓度, μ_w 是一级反应常数, w 是零级反应常数。方程(2)的源汇项可以包含氮在土壤中复杂的物理化学、生物化学等过程,如矿化反应、生物固持作用、硝化-反硝化、氨的挥发和固定等。

1.4 模型参数

取样时将土体划分为 6 个层次,根据实际测定的各层次土壤机械组成和容重,用 PTFs 方法 (Hydrus-1D 使用手册,许迪等)模拟计算各层土壤水力学参数,结果见表 3。

1.5 模型验证

采用 2000 年的试验数据对模型验证。设定下边界在 2 m 处,水流方程边界条件:允许有积水层的通量上边界条件(当降水或灌溉速率大于入渗速率时,表层允许有一定厚度积水层,积水层厚度随降水量增加而增加,随蒸发量增加而减少)和自由排水下边界条件;溶质方程边界条件;浓度通量上边界条件和浓度零梯度下边界条件。根层深度设定在 1.2 m

处,模拟计算冬小麦春后生长季内(03-21—06-18)根 2000 年田间实测值。模拟结果(图 1)表明模型的模
层累积水分渗漏量和氮淋失量。初始条件选用 拟运算可靠可行。

表 3 模型中采用的土壤剖面各层次水力学参数

Table 3 The hydraulic parameters of soil profiles

土壤层次/cm	残余含水量/ ($Q_r \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	饱和含水量/ ($Q_s \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Alpha cm^{-1}	n	饱和导水率 $K_s/(\text{Cm d}^{-1})$	l
0~30	0.060	0.404	0.006	1.626	15.0	0.5
30~60	0.075	0.403	0.007	1.548	1.0	0.5
60~90	0.066	0.400	0.007	1.570	5.0	0.5
90~120	0.052	0.374	0.006	1.365	4.0	0.5
120~150	0.039	0.344	0.002	1.835	3.0	0.5
150~200	0.054	0.335	0.009	1.445	0.5	0.5

表 4 模型中采用的土壤剖面各层次氮运移和转化参数

Table 4 The parameters of nitrogen transform and transport in the profiles

土壤层 次/cm	弥散系 数/cm	自由水中扩散 系数 ^[13] / $(\text{cm}^2 \text{ d}^{-1})$	矿化反应常数 ^[9] (零级)/ $(\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1})$	生物固持反应常数 ^[9] (一级), d^{-1}	反硝化反应常数 ^[9] (一级), d^{-1}
0~30	3.2	1.2	1.5	0.004	0.002
30~60	3.2	1.2	0.5	0.003	0.002
60~90	2.2	1.2	0.001	0.002	0.001
90~120	2.2	1.2	0.001	0.001	0.000

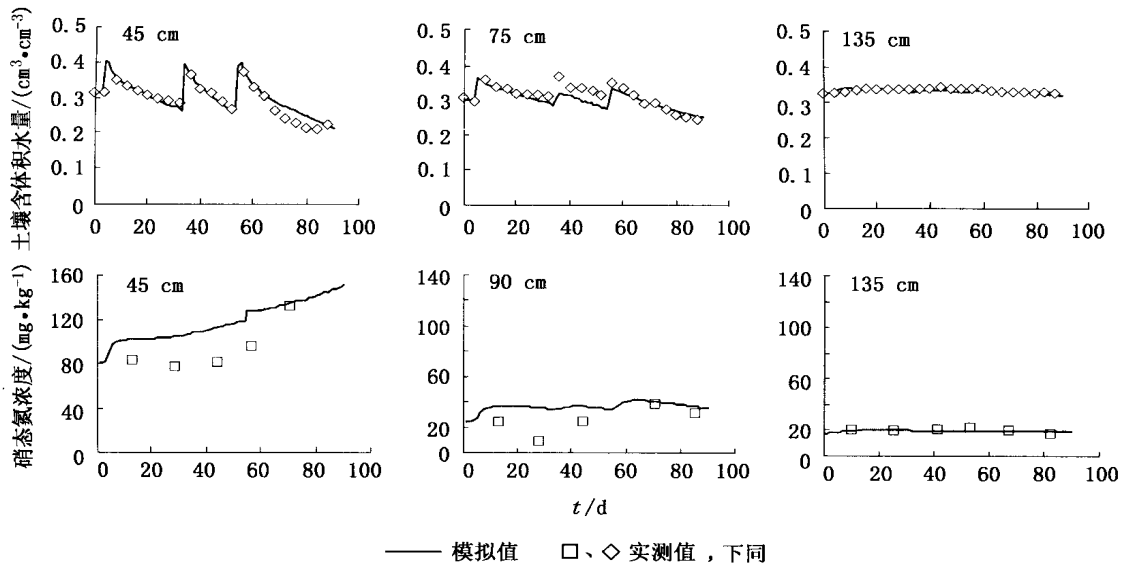


图 1 3 种层次土壤含水量和土壤硝态氮含量

Fig. 1 Soil water content and nitrate concentration in three soil layers

1.6 模拟计算

为比较天气因素引起的水氮过程差异性,假定每年的水肥处理都和 2000 年田间实际处理完全相同,初始剖面值采用 2000 年间田间实际测定值,水氮联合方程边界条件以及土壤水力学参数和氮运移、转化参数同模型验证过程。气象资料选取 30 年

(1970—1999 年)实际记录值,根据每年逐日气象资料和 FAO 推荐的 Penman-Monteith(1990)公式计算田间蒸散量,在模型中输入逐日的降水量和灌水量,潜在的蒸散量。模型输出结果包括每年逐日的棵间蒸发、根系吸水,水分渗漏和氮淋失等。

2 结果与讨论

2.1 水分渗漏量和氮淋失量多年特征值

根层土壤水分平衡各项中包括降水、灌溉、蒸散和下边界通量等,其中降水和蒸散由天气因素决定,水分平衡各项互为消长,因此水分渗漏量在多种气候年型下变化特征不同。土壤中氮随水流失,根层下边界水分渗漏和氮淋失特征响应于上边界水分和溶质通量条件以及根层水分变化过程。北京地区冬小麦春后生长季内,平均降水量为 95.3 mm,作物平均需水量约 400 mm(表 5)。在当地传统灌溉处理下,灌溉供水是作物耗水量的 68%,其他 32%来自降水和根层蓄水。水分渗漏平均值为 36.4 mm,氮淋失量约 10.4 kg·hm⁻²。总体来说,冬小麦春后生长季内,水分渗漏和氮淋失量不大。30年内最大水分渗漏量可达 152 mm,相应氮淋失量达 52.6 kg·hm⁻²,也可能出现向上的水分和氮补给。

表 5 模拟计算的根层(1.2 m)水分平衡项和氮淋失量多年特征值

Table 5 Simulated variations of water balance and characteristic values of nitrogen leaching below the root zone under variable climatic conditions

特征值	降水/ mm	棵间蒸 发/mm	根系吸 收/mm	根层渗漏 量/mm	氮淋失量/ (kg·hm ⁻²)
均值	95.3	78.0	320.1	36.4	10.4
最大值	250	102.8	399	152	52.6
最小值	21.9	64.2	214	-18.2	-4.2

注:各年内灌溉量均为 270.2 mm;降水为冬小麦从返青期到收获期生长季内累计降水量。表中负号表示水分向上补给。

2.2 不同降水量年型农田水分渗漏量和氮淋失量

根据生长季内降水量划分 30 年降水年型为 4 组(表 6)。传统水肥处理条件下,生长季降水量分别为小于 50、50~100、100~150 和大于 150 mm。表 6 给出 4 组不同降雨量年型下传统水肥处理时水分渗漏量均值分别为 5.0、23.6、36.9 和 125.6 mm。相对 270 mm 的灌溉量,各降水量范围水分渗漏率分别为 2%、9%、14% 和 46%。对应的氮淋失量为 1.5、5.8、9.6 和 40.4 kg·hm⁻²,各相当于有效施肥量的 1%、5%、8% 和 34%。根据以上水分渗漏量和氮淋失量,可相应调整各种卸型下水肥管理措施。

2.3 降水量与灌溉田水分渗漏量的关系

在北京地区冬小麦生长季内,降水量一般不能满足作物需求,特别是在 3-4 月份,很少有大的降水发生,灌溉是根层水分的主要来源。然而,不同时

期降水会改变根层特别是表层土壤水分状况,从而影响灌溉引起的水分渗漏量。

表 6 模型计算的不同降水量年型根层平均水分渗漏量和氮淋失量

Table 6 Simulated variations of water balance and the characteristic values of nitrogen leaching below the root zone under variable climatic conditions

降水量/ mm	根层水分渗 漏量/mm	水分渗漏 率/%	根层氮淋失 量/(kg·hm ⁻²)	氮淋失 率/%
< 50	5.0	2	1.5	1
50~100	23.6	9	5.8	5
100~150	36.9	14	9.6	8
> 150	125.6	46	40.4	34

注:渗漏率=(水分渗漏量/灌溉量)×100%;
氮淋失率=(氮淋失量/施肥量)×100%。^[11,12]

Khakural 和 Robert 曾提出“季节降水指数”的概念,表示生长季降水量占年度总降水量的分数^[8]。这里采用“降水指数”表示作物生长季内降水量占灌溉量和降水量总和的分数。将模拟计算的 30 年水分渗漏结果与对应的降水指数作图(图 2),回归分析结果表明水分渗漏量是降水指数的指数函数:

$$W_L = 3.2753 e^{7.845 \times PI} \quad (3)$$

其中, W_L 为水分渗漏量, PI 为降水指数(信度 0.01 水平上,回归方程通过 F 检验)。当降水量可以估测时,可根据方程(3)可估算在传统灌溉量(270 mm)条件下生长季后水分渗漏总量。

2.4 生长季内水分渗漏量时间分布特征

生长季内水分渗漏发生时间,则对周年内的灌溉和施肥量及时间具有重要意义。根据灌溉时间,将冬小麦春后生长季分为 4 个阶段,灌溉日分别为计算累计时间的第 4、34 和 54 天,比较灌溉后 1 周和生长季末,即第 11、41、61 和 90 天的根层(120 cm)水分渗漏量累积概率分布(图 3)。

从图 3 可以看出,第一次灌溉后发生水分发生渗漏的概率是 100%,渗漏量约 20 mm;第二次灌溉后再度发生水分渗漏的概率是 90%以上,而 70%年份内水分渗漏增加量小于 20 mm;第三次灌溉后则有 70%的年份内无渗漏发生;到收获期水分向上补给而累积水分渗漏量减少发生的概率是 80%。由以上结果可知,在各种可能的降水条件下,若以传统灌溉方式处理补充冬小麦农田水分亏缺,水分渗漏主要发生在春后作物生长早期,即在起身期和拔节期 90 mm 的灌水量容易引起水分渗漏,这主要是因为在此阶段作物吸收能力还比较弱,根层中存在过

量水分；而到了作物生长的中后期——孕穗到灌浆期，作物吸收能力处于高峰期，同样灌水量发生渗漏的概率只有 20%。因此，针对传统灌溉方式各种年型下水分渗漏特征，可以考虑减少前期 2 次灌溉的灌溉定额，特别是返青到起身期灌溉量，以减少水分渗漏。同时，施肥时间也应适当调整，避免过早施肥引起氮肥淋失。

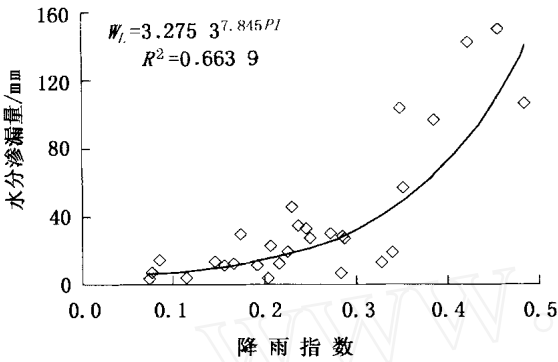


图 2 水分渗漏量与降水指数关系曲线图
Fig. 2 Relationship between water leakage and precipitation index

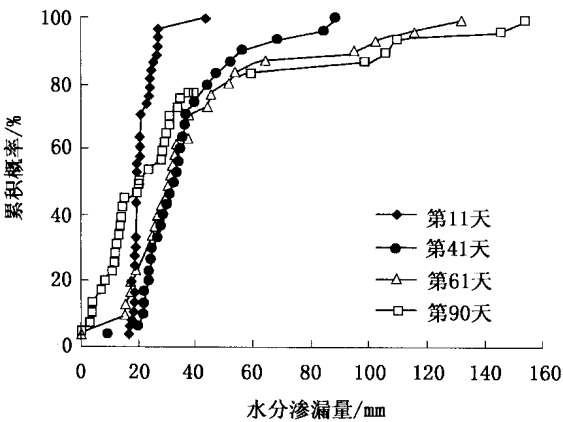


图 3 不同时期灌溉后根层水分渗漏量累积概率分布图
Fig. 3 Cumulative probability distribution of water leakage after irrigations

2.5 水分渗漏量与氮淋失量的关系

根层中氮行为与水分过程密切相关。图 4 为模拟计算的多年水分渗漏量和氮淋失量关系图，回归直线方程为：

$$L_N = 0.3287 \times W_L - 1.6776 \quad (4)$$

式中 L_N 代表氮淋失量， W_L 是水分渗漏量（经 t 检验，在 0.01 信度水平上两者相关性显著）。两者线性关系说明在施肥条件相同时，虽然根层内氮转化过程复杂而相互关联，但根层内氮浓度对年累积淋失量影响很小，年际间氮淋失量的巨大差异主要来

自水分通量的差异。方程 (4) 表示，在有效施肥量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下，冬小麦返青后生育期内根层平均氮通量浓度大约为 $32.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每有 10 mm 的向下水分通量，将携带 $1.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮淋失到根层以下。

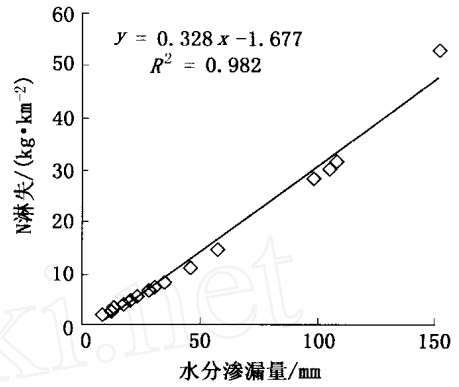


图 4 水分渗漏量和氮淋失量关系曲线图

Fig. 4 Relationship between water leakage and nitrogen leached

3 结 语

京郊地区冬小麦传统灌溉施肥农田，在春后生长季内根层 (1.2 m) 水分渗漏和氮淋失很少。各种气候条件下 (30 年实际气象资料) 最大水分渗漏量为 152 mm，相应氮淋失量 $53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，有时可能出现水氮向上补给。一定范围降水量值越大，发生水分渗漏和氮淋失的可能性越大，相应平均水分渗漏量和氮淋失量值越大。

“降水指数”表示冬小麦生长季内降水量占总供水量 (灌溉量 + 降水量) 的分数。根层水分渗漏量与降水指数呈指数函数关系，氮淋失量和根层水分渗漏量显著线性相关。以上经验关系式可用以估算氮淋失量。

京郊地区传统灌溉方式下，冬小麦农田在春后生长早期容易发生水分渗漏，因此可适量减少早期灌溉量和避免施肥过早引起氮淋失。

参 考 文 献

[1] Burns I G. An equation of predict the leaching of surface - applied nitrate [J]. J Agric Sci Camb, 1975, 85:443 ~ 445
[2] Klocke N L, et al. Nitrate leaching in irrigated corn and soybean in a semi-arid climate [J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(6) :1621 ~ 1630
[3] Goss MJ, Howse KR, Lane P W, et al. Losses of nitrate -

- nitrogen in water draining from under autumn sown crops established by direct drilling or mouldboard ploughing [J]. J Soil Sci, 1993, 44: 35 ~ 48
- [4] Follett R F, Keeney D R, Cruse R M. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability [M]. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1991
- [5] Follett R F, Shaffer MJ, Brodahl M K, et al. NLEAP simulation of residual soil nitrate for irrigated and nonirrigated corn [J]. Journal of soil and water conservation, 1994, 49(4): 375 ~ 382
- [6] Pang X P, Gupta S C, Moncrief J F, et al. Evaluation of nitrate leaching potential in Minnesota Glacial Outwash Soils using the CERES - Maize model [J]. J, Environ Qual, 1998, 27:75 ~ 85
- [7] Pang X P, Letey J, Wu L. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61:257 ~ 261
- [8] Khakural B R, Robert P C. Soil nitrate leaching potential indices: using a simulation model as a screening system [J]. J Environ Qual, 1993, 22:839 ~ 845
- [9] Ramos C, Carboneel E A. Nitrate leaching and soil moisture prediction with the LEACHM model [J]. Fertilizer Research, 1991, 27:171 ~ 180
- [10] Wylie B K, Shaffer MJ, Brodahl M K et al. Predicting spatial distribution of nitrate leaching in northeastern Colorado [J]. J Soil Water Conserv, 1994, 49:288 ~ 293
- [11] Saporito L S, Lanyon L E. Evaluating management and soil and weather contribution to potential nitrate leaching from a Pennsylvania dairy farm using NLEAP [J]. J Environ Qual, 1998, 27: 1367 ~ 1375
- [12] Jury W A. A stochastic analysis of the influence of soil and climatic variability on the estimate of pesticide groundwater pollution potential [J]. Water Resources Research, 1989, 25(12): 2465 ~ 2474
- [13] 黄元仿. 区域土壤氮素行为与土壤水、氮管理 [D]. 北京:中国农业大学, 1996
- [14] 王凤仙. 冬小麦-夏玉米种植制度下土壤水、氮资源利用效率的研究 [M]. 北京:中国农业大学出版社, 1996

中国农业大学 2002 年科技工作大事记

1. “优质、高产玉米新品种农大 108 的选育与推广”获得国家科学技术进步一等奖。
2. “猪优质高效饲料产业化关键技术研究”和“旱地农业保护性耕作技术与机具研究”获得国家科学技术进步二等奖。
3. 我国第一头克隆黄牛“波娃”在我校诞生。
4. 科技部正式批准建设“植物生理学与生物化学国家重点实验室”。
5. “农业部牧草及草坪草种子质量监督检验测试中心(北京)”和“农业部农产品质量监督检验测试中心(北京)”通过国家审查认可和计量认证。
6. 我校 13 个实验室被命名为“农业部重点开放实验室”。
7. 全校科研经费突破 1.5 亿元,比上年增长 50%。
8. 我校获准国家自然科学基金项目 68 项,经费达 1 800 万元。
9. 我校申报专利 41 项,达历史最高水平。

(科技处供稿)