华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失*

张玉铭[1,2,3]　张佳宝[1]　胡春胜[2]　李晓欣[2]　朱安宁[1]

(1 封丘农田生态系统国家试验站, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所, 南京　210008)
(2 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄　050021)
(3 中国科学院研究生院, 北京　100039)

摘　要　通过采集土壤溶液并分析其硝态氮(NO_3^--N)含量, 结合水量平衡方法, 研究了华北太行山前平原小麦-玉米轮作农田在当前农民普遍采用的农业管理措施下土壤 NO_3^--N 迁移、累积特征, 计算了深层土壤水分渗漏与 NO_3^--N 淋溶损失量。结果表明, 土壤水分渗漏、NO_3^--N 的分布及其淋溶损失存在着明显的时空变异性, 土壤水分的深层渗漏和 NO_3^--N 的淋溶损失发生在玉米生长期间施肥灌水或降雨之后。在 1998/1999 和 1999/2000 两个作物轮作年中, 土壤水分的深层渗漏损失分别为 33～48 mm(平均 39 mm)和 90～92 mm(平均 90.7 mm), 分别占降水+灌溉总量的 10 %和 19 %; 淋溶到根区之下的 NO_3^--N 量(包括来自土壤和肥料的 N)分别为 N 12 kg hm^{-2}(范围 N 6～17 kg hm^{-2})和 N 61 kg hm^{-2}(范围 N 30～84 kg hm^{-2}), 分别占施入肥料量的 1.4 %～4.1 %和 7.3 %～20.3 %。在玉米生长期间有较大潜力可调控灌溉与肥料用量, 以提高水肥利用效率。

关键词　水分渗漏; NO_3^--N 淋溶; 土壤水

中图分类号　S152.7　　**文献标识码**　A

由于氮肥的过量投入, 大量 N 素不能被当季作物吸收利用而富集在土壤中。旱地土壤中硝化作用强烈, 残留在土壤中的无机 N 主要以 NO_3^--N 的形式存在, 极易随土壤水向下迁移, 一旦被淋溶到作物根区以下, 就很难再被作物吸收利用。深层土壤反硝化过程微弱, 一般情况下 NO_3^--N 很难转化为其他形态的 N, 只能随着土壤水分的向下运动而迁移, 构成对地下水污染的潜在威胁。

农田土壤中 N 素淋失是 N 素损失的重要途径之一, 施入农田中的氮肥大约有 30 %～50 %通过淋溶进入地下水[1], 造成浅层地下水 NO_3^--N 浓度的升高, 使地下水遭到污染。太行山前平原是华北平原典型的高产农区, 水肥投入过高, N 肥年用量在 N 400 kg hm^{-2}以上, 有些区域甚至超过 N 500 kg hm^{-2}[2], NO_3^--N 淋溶损失严重, 在一些浅层水井中 NO_3^--N 含量也有检出超标的报道(1)。从 1998 年 10 月开始在 1 hm^2 试验地设 3 个 2 m 深观测点对在当地农民普遍采用的常规农业管理措施下农田土壤水分和 NO_3^--N 含量状况进行了监测, 利用水量平衡方法对农田 NO_3^--N 淋溶损失量进行了测算, 目的是了解本区域小麦-玉米轮作农田 N 素的淋溶损失量, 为环境质量评价提供基本参数。

1　材料与方法

1.1　土壤水分测定与土壤溶液采集

试验于 1998 年 10 月至 2000 年 9 月在中国科学院栾城生态农业实验站综合观测场进行, 试验地面积 1 hm^2, 田间管理措施与当地农民普遍采用的农业管理措施相同, 农事活动记录详见表 1。试验开始前分别于干旱季节(1998 年 4 月)和多雨季节(7 月)在试验地以 10 m 为步长网格式布点在交点处采集 0～20 cm 和 80～100 cm 深土壤样品, 分析土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量, 对其进行空间变异性分析, 根据土壤矿质 N 的空间分布特征确定田间监测点数量和位置, 以便监测结果能较好地代表整个田块

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413-6)、国家重点基础研究计划(973)前期研究专项(2003CCB001)和国家自然科学基金项目(30570835)资助
作者简介: 张玉铭(1964～), 女, 河北深州市人, 主要从事植物营养与环境效应方面的研究

(1) Tang C Y, Chen J Y, Shimada J, *et al*. A primary study on nitrate in groundwater used for agriculture and urban life in NCP. Proceedings of International Workshop on Sustainable Development of Water Resources in North China Plain. China: Zhengding, 2000

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-07-07

NO_3^--N 在土体中的实际分布和迁移动态。在 1 hm^2 试验地设置了 3 个观测点,分别代表矿质 N 含量高、中、低三个水平。在每个观测点挖掘 2 m 剖面,在剖面两侧以 20 cm 为间距埋设负压计(距地表 10cm 处增埋一支)、溶液提取器至 2 m,距剖面向北 2 m 处埋设中子管,利用中子仪测定土壤体积含水量,测定深度与负压计埋设深度对应。施肥、灌水和降雨超过 10 mm 后每天进行负压读数、中子水分仪测水分、采集土壤溶液测定 NO_3^--N 含量,每天一次测定坚持 5 d,随后监测频度为每周一次,如果土壤含水量太低、不能抽取出土壤溶液时,用土钻取土测定 NO_3^--N 含量。

1.2 灌溉、降雨与实际蒸散量测定

灌溉方式为畦灌,机井至试验田埋设输水管道,机井出口处有水表用于记录每次灌溉用水量;距试验地 50 m 处设有自动气象站和大型称重式蒸渗仪(Lysimeter)分别用于测定降雨量和田间实际蒸散量。大型称重式蒸渗仪含原状土体,土壤性质与试验所在农田一致,土体重 12 t,面积 3 m^2,深 2.5 m,测量精度(感量)可达 0.02 mm[3];蒸渗仪中所种植作物以及农田管理措施(施肥、灌溉)与试验地完全相同,以确保蒸渗仪所测定的实际蒸散量与试验地相同。

1.3 田间持水量与土壤水分亏缺量测定

田间持水量是一个重要的土壤水文常数,它决定于土壤类型、质地和剖面特性,一般认为,田间持水量是作物能利用的土壤有效水的上限,超过这个量的土壤水分很快在重力水的作用下排走。为了应用水量平衡模型计算土壤水分渗漏量,在 3 个观测点分别测定了 0～180 cm 土体田间持水量。当土壤水分不超过田间持水量时,深层渗漏常忽略不计,此时土壤含水量与田间持水量之差为土壤水分亏缺量(Soil water deficit,SWD)。

表 1 1998 年至 2000 年 1 hm^2 试验地农业管理措施记录

Table 1 Farming logs of the 1 hm^2 experimental field from 1998 to 2000

作物 Crop	播种日期 Sowing date (YYYY-MM-DD)	收获日期 Harvesting date (YYYY-MM-DD)	耕作日期 Tilling date (YYYY-MM-DD)	施肥日期 Fertilization date (YYYY-MM-DD)	施肥量 Fertilizer rate (N kg hm^{-2}) 磷酸二铵 Diammonium orthophosphate	尿素 Urea	灌溉日期 Irrigating date (YYYY-MM-DD)	灌溉量 Irrigation rate (mm)	产量 Yield (kg hm^{-2})
小麦	1998-10-10	1999-06-10	1998-10-08	1998-10-08	54	69	1998-10-06	72	6 358
Wheat				1999-03-27	0	138	1998-12-08	60	
							1999-04-03	72	
							1999-04-29	72	
							1999-05-21	60	
玉米	1999-06-01	1999-09-26	—	1999-07-13	0	157	1999-06-19	65	8 508
Maize							1999-07-21	55	
小麦	1999-10-12	2000-06-08	1999-10-10	1999-10-10	54	76	1999-10-09	72	7 117
Wheat				2000-03-28	0	110.4	1999-12-11	60	
							2000-04-04	72	
							2000-04-26	71	
							2000-05-29	72	
玉米	2000-06-05	2000-09-29	—	2000-07-19	0	172.5	2000-06-23	71	8 288
Maize							2000-07-23	65	

1.4 农田水量平衡与氮素淋溶损失

一般认为本区域小麦-玉米轮作农田作物根系主要集中在 0～180 cm 土体中,180 cm 以下作物根系活动极其微弱[4]。因此设定作物根层为 0～180 cm,养分一旦随土壤水分向下运动迁移出 180 cm 土体后将再很难被作物吸收利用,即 180 cm 处为计算土壤水分和 NO_3^--N 渗漏损失的下边界。

利用中子水分仪测定值计算 0～180 cm 剖面土壤水分体积含水量(mm),当土壤含水量超过田间持水量时(较大降雨或灌溉后),超出的部分作为向作物根层外的渗漏处理[5,6]。在运用水量平衡模型计算水分渗漏量时假定渗漏是在降雨或灌

溉后当含水量超过田间持水量时瞬时发生的。应用水量平衡模型计算每天通过 180 cm 界面的土壤水分通量[3]:

$$\Delta S = R + I - R_s - R_{ss} - E_a - D \quad (1)$$

式中,ΔS 为计算时段内 0～180 cm 土体贮水量的变化量(mm);R 为计算时段内降水量(mm);I 为计算时段内灌溉量(mm);R_s 为地表径流(mm),R_{ss}为深层土壤水分侧渗(mm);E_a 为计算时段内实际蒸散量(mm);D 为计算时段内 180 cm 界面处土壤水分通量(mm)。华北地区水资源紧缺,土壤含水量较低,降雨一般不会引起地表径流,没有考虑深层土壤水分侧渗,R_s 和 R_{ss}取值为零。初始土体含水量 S 设为 1998 年 10 月 1 日试验开始时 0～180 cm 土壤中的含水量,模拟 S 根据下列公式计算而得:

$$S_n = S_{n-1} + I - E_a - R_s - R_{ss} \quad (2)$$

式中,下标 n 和 n - 1 是指自试验开始之日第 n 和 n - 1天。如果 S_n 为正值,多余的这部分土壤水分视为对 D 的贡献,将每天的水分通量累加可获得测试时段的总土壤水通量。

硝态氮淋失量由通过根层下界面的土壤水分通量与同层位的土壤溶液中 NO_3^--N 浓度的乘积获得[2,7],计算公式如下:

$$A = D \times C / 100 \quad (3)$$

式中,A 为淋溶至根层下界面(180 cm)以下的NO_3^--N 淋失量(N kg hm^{-2});D 为通过 180 cm 界面的土壤水通量(mm);C 为 180 cm 层面处土壤溶液中NO_3^--N 浓度(mg L^{-1})。

2　结果与讨论

2.1　土壤水分动态及其分布特征

从不同观测点土壤剖面水分的分布特征及其动态变化情况来看(表 2,图 1),3 个剖面土壤水分动态变化情况基本相似。土壤含水量在作物生长期间的动态变化主要受灌溉和降水因素的控制,土壤承纳降水和灌溉水的补给,供给作物蒸腾和土壤蒸发,因此,土壤水分动态即是供水与耗水两方面在时空上消长的反映。灌溉和降雨能明显提高土壤剖面水分含量,每年小麦播种前(10 月上旬)灌溉底墒水,此时土壤剖面贮水量相对较高,随着小麦生长耗水量增加,土壤贮水量逐渐减少,至 3 月中下旬小麦拔节前土壤剖面贮水量已降至 431～480 mm (1999 年)和 434～481 mm (2000 年),小麦拔节期和孕穗期是作物需水高峰期,灌溉后极大地改善了土壤水分状况,进入小麦生长后期,由于作物耗水土壤含水量逐渐减少,至收获时土壤含水量已降至一个很低水平(表 2)。玉米生长期间正值高温多雨季节,降雨极大地补给了土壤贮水,7～8 月份土壤含水量处于较高水平,大雨过后土壤含水量接近和超过了田间持水量,引起了深层土壤水渗漏损失。

土壤剖面水分分布及其动态变化特征表明,供水和耗水主要影响 140～160 cm 土层以上土壤含水量,由于作物根系主要分布在 0～100 cm 土层[4],作物耗水对该层土壤含水量影响最大,该层土壤含水

表 2　不同时段 0～180 cm 土壤剖面水分状况

Table 2　Soil water contents in the 0～180 cm profile

日　期 Date (YYYY-MM-DD)	土壤含水量 Soil water contents (mm)			日　期 Date (YYYY-MM-DD)	土壤含水量 Soil water contents (mm)		
	观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3		观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3
1998-10-06	534	479	469	1999-10-11	544	573	523
1999-03-18	480	453	431	2000-03-25	461	481	434
1999-04-29	528	514	458	2000-04-27	474	539	493
1999-05-31	459	448	417	2000-05-28	424	435	371
1999-07-15	550	623	564	2000-07-23	579	591	545
1999-08-14	591	589	533	2000-09-16	483	501	393
1999-09-25	454	452	461				

量变化最明显,变幅亦最大。一般 160 cm 以下土壤含水量变化较小,只有当有强烈降雨过程和过量灌溉或在不恰当的时间灌溉方能影响到 160～180 cm 土层含水量,如 1999 年 7～8 月降雨(203 mm)和 2000 年 7 月连降暴雨(208 mm)以及每年 7 月施肥时灌水均增加了 160～180 cm 土层含水量(图 1),这一时期的灌溉构成了深层水分渗漏和 NO_3^--N 淋溶损失的隐患。

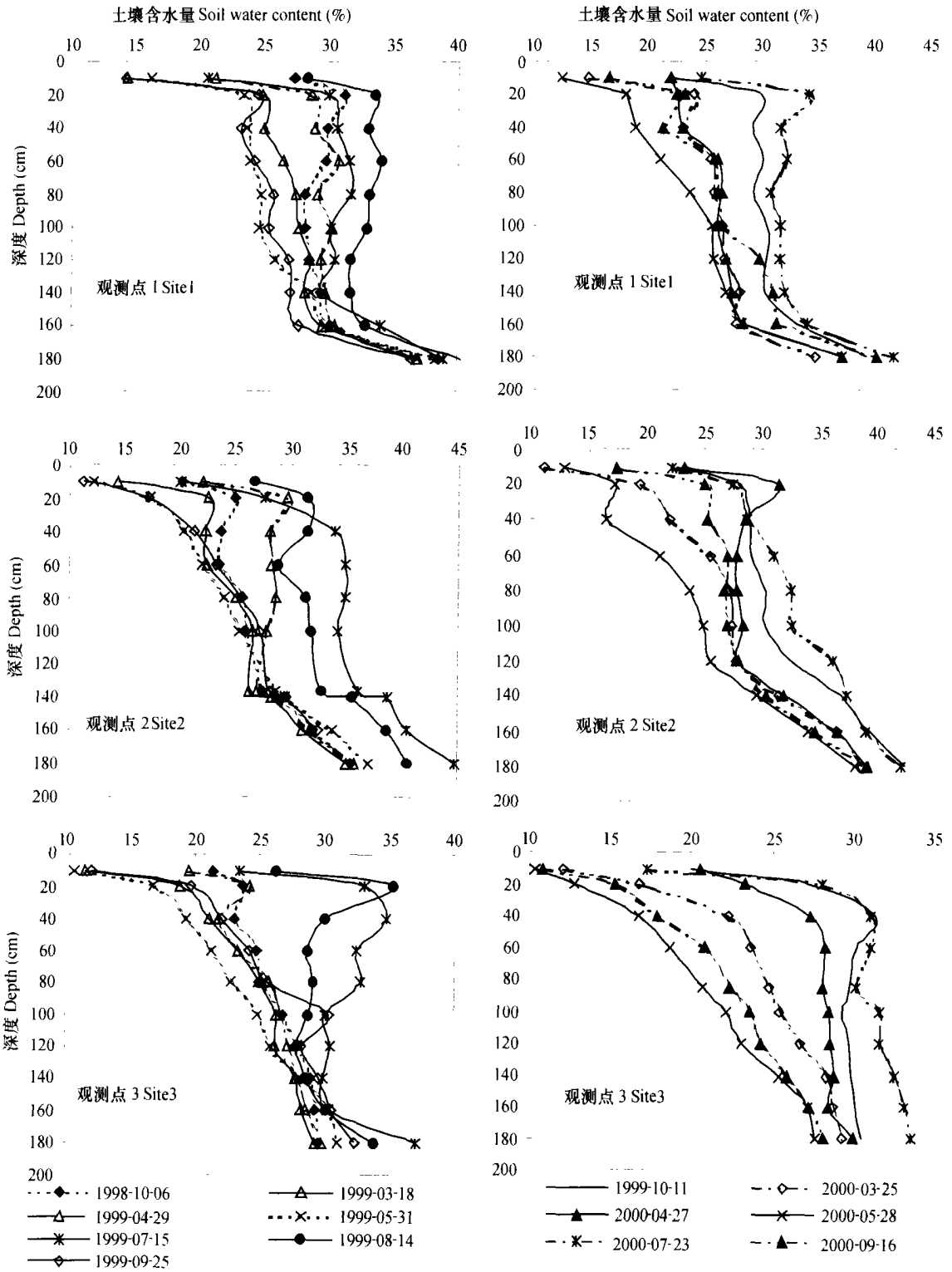

图 1 0～180 cm 土壤剖面水分分布及其动态变化特征

Fig. 1 Distribution and dynamic of soil water in the 0～180 cm profile

2.2　农田生态系统水量平衡与水分渗漏损失

应用水量平衡模型[5]计算了 3 个观测点 1998 年 10 月 1 日至 2000 年 9 月 30 日 0～180 cm 土层的土壤水分动态,在此以水分亏缺量表示土壤水分状态,根据计算结果绘出 3 个观测点 0～180 cm 土层水分动态模拟计算值与实测值的比较图(图 3)。将模型模拟值与实测值进行比较,二者之间存在一定误差,误差可能来源于设计模型时的一些假设(如对径流、渗漏、降雨/灌溉的处理)、计算方法的选择和参数的取值,连续模拟计算还会造成误差的累积。图 2 显示了模拟与实测 SWD 的符合程度,以模拟值为横坐标以实测值为纵坐标绘制的散点图集中在 1∶1线的周围,表明模拟值与实测值的符合性较好。为了了解模拟值与实测值的差异,计算了二者的标准差与相对误差,标准差为 0～22.6 mm,相对误差为 - 39.6 %～38.0 %。应用 SPSS 统计软件分析了模拟值与实测值的相关性,3 个观测点的相关系数分别为 0.915、0.853 和 0.832,相关系数的假设检验结果表明,模拟值与实测值之间存在极显著直线相关关系($p < 0.01$),这给了我们足够的信心应用该模型来计算农田水分的深层渗漏损失量。

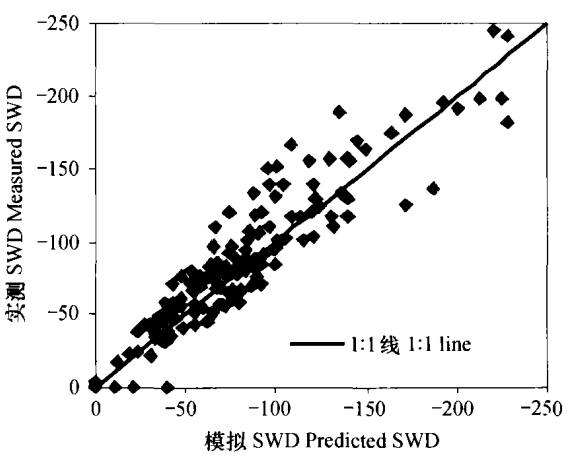

图 2　模型模拟与田间实测 SWD 比较

Fig. 2　Comparison between the model prediction and field measurement in SWD

由于受蒸散、灌溉和降雨的影响,土壤水分亏缺量随作物生长季节的不同呈波浪状起伏,农田蒸散增加了土壤水分亏缺度,而降雨和灌溉使土壤贮水量得到补给,降低了水分亏缺程度。当土壤水分亏缺量(SWD)等于 0 时,土壤含水量等于田间持水量或高于田间持水量,此时可发生深层水分渗漏和由此而引起的 NO_3^--N 淋溶损失。

由于华北地区周年雨量分配不匀,小麦生长期间降雨较少,灌溉只能供给作物生长需要,土壤含水量较低,水分亏缺严重,土壤水分亏缺量(SWD) < 0,因此小麦季无深层水分渗漏和 NO_3^--N 淋溶损失发生。全年约 50 %以上的雨量发生在 7～8 月,雨量过于集中,致使土壤含水量持续维持较高水平,这一时期是土壤水分深层渗漏损失的频发期;此时正值玉米生长旺季,亦是作物需肥关键时期,如果施肥不能随降雨施入,施肥后仍需灌溉,这样更加剧了水分的渗漏损失。1999 年和 2000 年总降雨量分别为 347 mm 和 402 mm;灌溉量分别为 455 mm 和 483 mm。三个观测点因降雨和灌溉引起的水分渗漏损失为:1999 年分别为 48 mm、33 mm 和 37 mm,平均 39 mm,占降雨和灌溉总量的 10 %;2000 年分别为 92 mm、90 mm 和 90 mm,平均 90.7 mm,占降雨和灌溉总量的 19 %(表 3)。两个作物年因水分输入量的不同而造成了明显不同的深层水分渗漏损失,1999 年 7 月因降雨而引起的水分渗漏损失量为 3 ±5 mm,占降雨量的 2 %;2000 年 7 月 4 日～6 日连降暴雨,三天降雨 208 mm,由此而引起的水分渗漏损失量为 51 ±5 mm,占降雨量的 24 %。1999 年 7 月 21 日因施肥灌溉引起的水分渗漏损失量为 36 ±3 mm,占当次灌溉量的 30 %;2000 年 7 月 23 日因施肥灌溉而引起的水分渗漏损失量为 40 ±2 mm,占当次灌溉量的 29 %。两年的试验结果表明,因受本区域降雨季节性分布规律及灌溉习惯的影响,小麦季土壤含水量相对较低,没有发生水分渗漏损失;玉米季因灌溉而引起的水分渗漏损失严重,因此,在玉米生长期间应根据降雨情况适当调整灌溉时期,控制灌溉量。

2.3　土壤剖面 NO_3^--N 分布特征与迁移动态

土壤剖面中 NO_3^- 的存在、剖面土壤结构特征和水分的垂向运动是影响 NO_3^--N 浓度分布的主要因子,氮肥的施用和灌溉(降水)分别增加土壤剖面中 NO_3^- 和水分含量,它们会共同影响土壤中 NO_3^--N 的迁移和累积。由于土壤剖面结构在农田尺度上存在着明显的空间变异性,不同观测点 NO_3^--N 的累积层位存在较大差异。0～180 cm 土壤剖面中至少存在一个粘土层,其层位的厚度和位置决定了 NO_3^--N 累积层位(图 4),观测点 2 NO_3^--N 的累积层位于约 80 cm 土壤深度处,而观测点 1 和观测点 3 的累积层位于 140 cm 土壤深度处。由于多年来粗放式的农田水肥管理模式(特别是施肥不匀)的影响,NO_3^--N 在土壤剖面中的浓度存在着极大的空间变异性,0～20 cm 土壤溶液中 NO_3^--N 的浓度为 7.8～66.2 mg L^{-1}

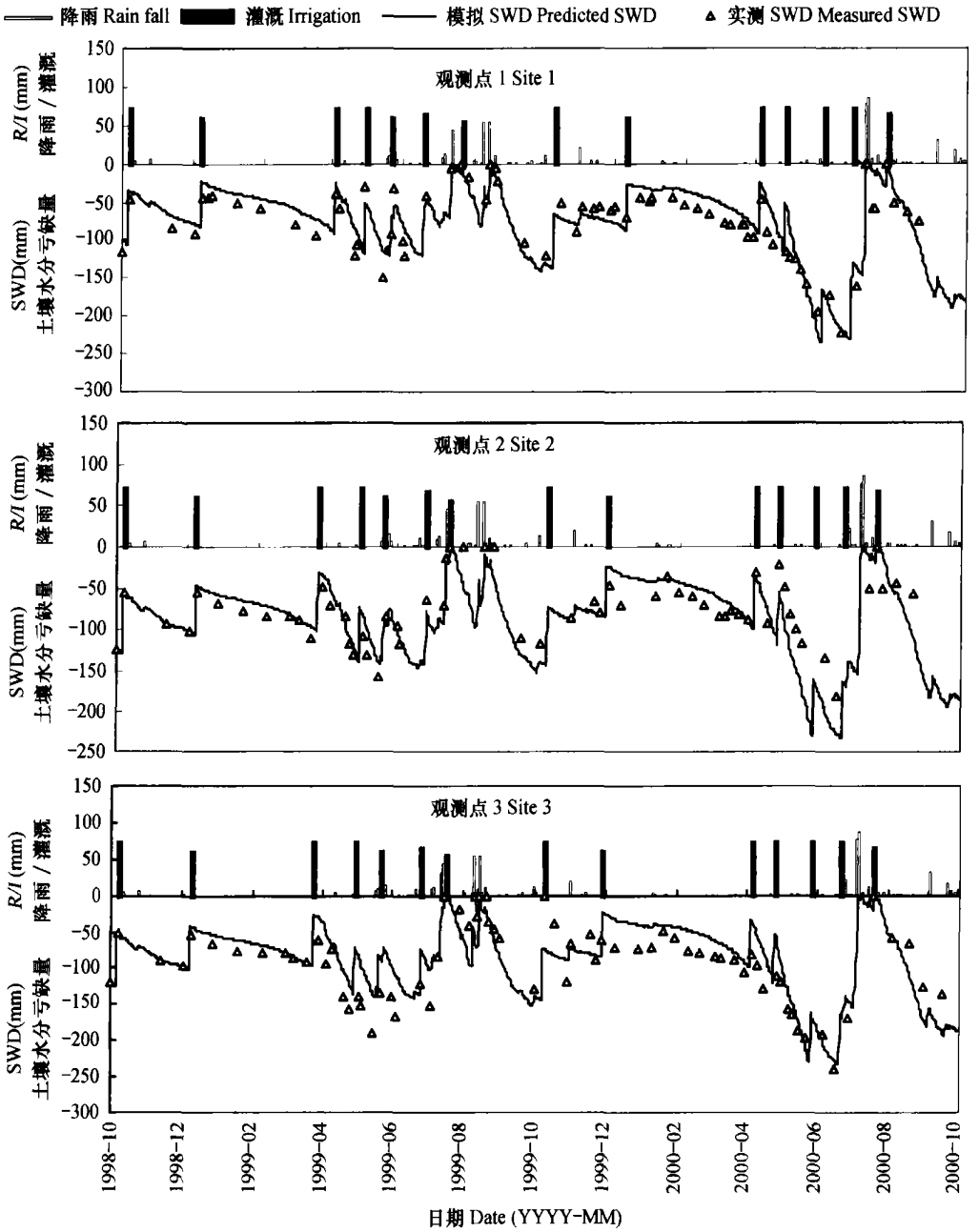

图 3 应用水量平衡模型模拟土壤水分亏缺与田间实际测定土壤水分亏缺、灌溉、降雨之间的相互关系

(1998 年 10 月至 2000 年 9 月)

Fig. 3 Relationship of soil water deficits (SWD) measured in the field and predicted with the water balance model with irrigation (*I*) and rainfall (*R*) from October 1998 to September 2000

表 3 应用水量平衡模型计算的土壤水分渗漏量

Table 3 Soil water leaching calculated based on the water balance model

时期 Period (YYYY-MM-DD)	作物 Crop	降水 Precipitation (mm)	灌溉 Irrigation (mm)	实际蒸散量 Actual evapotranspiration (mm)	渗漏量 Drainages (mm) 观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3
1998-10-01～1999-05-31	小麦 Wheat	60	335	373	0	0	0
1999-06-01～1999-09-30	玉米 Maize	287	120	415	48	33	37
1999-10-01～2000-05-31	小麦 Wheat	53	346	438	0	0	0
2000-06-01～2000-09-31	玉米 Maize	349	137	402	92	90	90

(观测点 1)、76.6～153.3 mg L^{-1}(观测点 2)、70.0～190.0 mg L^{-1}(观测点 3);180 cm 土壤深度处土壤溶液中 NO_3^--N 的浓度依次为 27.4～77.8、59.5～87.1 和 40.1～111.0 mg L^{-1}。

试验初始阶段,NO_3^--N 主要累积在表层土壤中,有利于作物生长对氮素的需求。由于水肥的过量投入,随着试验的进行 NO_3^--N 不断在深层土壤中积累,而小麦、玉米根系的 80 %分布在 0～60 cm 土层,对积累在深层土壤中的 NO_3^--N 利用率很低[7],积累在深层土壤中的这部分 NO_3^--N 只能逐渐随下渗水向下迁移,构成对地下水污染的威胁。从土壤溶液中NO_3^--N 浓度含量水平可知,本区域土壤氮素肥力处于中等偏上水平,在决定施肥决策时应尽量减少氮肥用量,避免过多的肥料资源浪费和对环境造成危害。

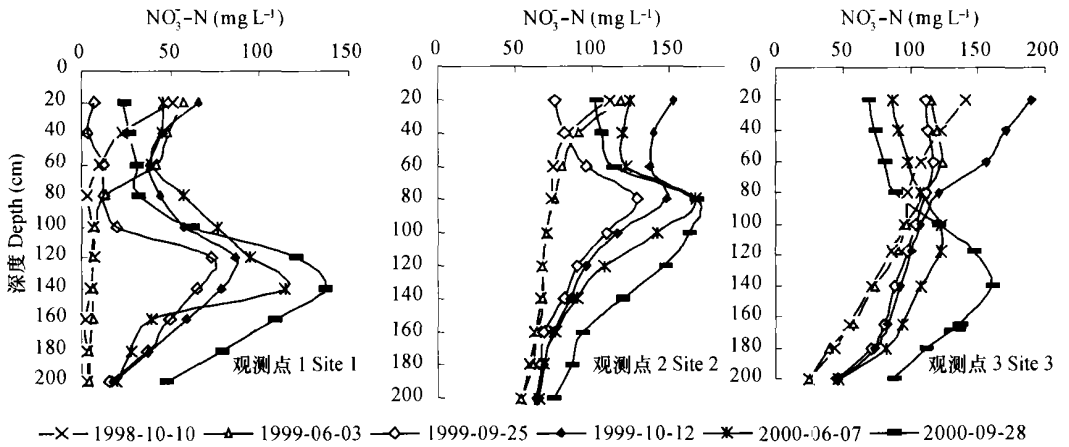

图 4　不同观测点剖面土壤溶液中 NO_3^--N 浓度

Fig. 4　Distribution and dynamic of NO_3^--N (in suction cup samples) in soil profile at different experimental site

2.4　农田土壤氮素的淋溶损失

因为渗漏水中 NH_4^+-N 的浓度不及 NO_3^--N 浓度的 1 %,因此,可用土壤剖面中 NO_3^--N 的淋溶损失量表征全部氮素的淋失量(2),硝态氮的淋溶损失取决于降水(或灌溉)引起的深层土壤水分渗漏量和渗漏液中 NO_3^--N 的浓度[9～11],浓度高,渗漏到根区以下水量大时,NO_3^--N 的淋失严重,某一因子受到限制,NO_3^--N 的淋失量就会明显减少。由于粗放式的施肥方式以及土壤剖面结构的空间变异性分布,土壤剖面 NO_3^--N 浓度存在明显的空间变异性分布,造成不同观测点 NO_3^--N 淋溶损失量的明显差异。不同年型因降雨量/灌溉量的不同,水分渗漏量不同,由此而引起的 NO_3^--N 的淋失量明显不同(表 4),肥料的表观损失率亦差异明显(表 5)。第一年(1998/1999 作物年)因水分渗漏损失量相对较少,NO_3^--N 的淋失量亦较少,平均 N 12 kg hm^{-2},占当季肥料 N 施入量的 3.8 %～11 %,占全年肥料 N 施入量的 1.4 %～4.1 %;第二年,降雨和灌溉引起的水分渗漏损失严重,NO_3^--N 的淋失量明显高于第一年,3 个观测点的 NO_3^--N 淋失量依次为 N 30 kg hm^{-2}、N 68 kg hm^{-2}和 N 84 kg hm^{-2},分别占当季肥料 N 施入量的 17.6 %、39.2 %和 48.9 %,占全年施入肥料 N 的 7.3 %～20.3 %(表 5)。NO_3^--N 淋溶损失全部发生在玉米生长季节,降雨是决定 NO_3^--N 淋失与否及多少的关键因子之一,如果没有充足的降雨补给土壤贮水量,适量灌溉不会引起过多的水分渗漏和 NO_3^--N 的淋溶损失。因此,评价半干旱半湿润地区农田生态系统 NO_3^--N 的淋溶损失,仅靠 1、2 年的试验结果难以反映不同年型下的淋失量和变异性,应从多年的试验结果进行综合评价。

因为研究方法所限,在计算 NO_3^--N 淋失量时无法区分有多少来自当季施入的肥料 N,有多少来自土壤中残留的 NO_3^--N,因此,在此所说的肥料损失率并不能完全反映当季施入的肥料 N 的损失情况,只能称之为表观肥料损失率,是多年施肥累积在土壤中的 NO_3^--N 与当季施入肥料 N 的总的损失。要

(2) Magesan G N. A study of the leaching of non-reactive solutes and nitrate under laboratory and field conditions. Ph D. Thesis, Massey University, Palmerston North. 1992

想获得当季肥料 N 的损失情况,需进一步开展标记 的^{15}N 肥料试验。

表 4 应用水量平衡法和土壤溶液中 NO_3^--N 浓度计算所得 NO_3^--N 淋失量

Table 4 Nitrate leaching loss calculated by soil water balance method and NO_3^--N concentration of suction samples

时期 Period (YYYY-MM-DD)	作物 Crop	施肥量 N applied (N kg hm^{-2})	NO_3^--N 淋失量 NO_3^--N leaching loss (N kg hm^{-2})		
			观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3
1998-10-01～1999-05-31	小麦 Wheat	261	0	0	0
1999-06-01～1999-09-30	玉米 Maize	157	6	17	13
1999-10-01～2000-05-31	小麦 Wheat	240	0	0	0
2000-06-01～2000-09-31	玉米 Maize	172	30	68	84

表 5 通过 NO_3^--N 淋失造成的肥料表观损失率

Table 5 Apparent loss rate of applied N fertilizer through NO_3^--N leaching

时期 Period (YY-MM-DD)	作物 Crop	当季肥料表观损失率 Loss rate in the season (%)			年度肥料表观损失率 Yearly loss rate (%)		
		观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3	观测点 1 Site 1	观测点 2 Site 2	观测点 3 Site 3
1998-0-01～1999-05-31	小麦 Wheat	0	0	0	1.4	4.1	3.1
1999-06-01～1999-09-30	玉米 Maize	3.8	11	8.4			
1999-10-01～2000-05-31	小麦 Wheat	0	0	0	7.3	16.5	20.3
2000-06-01～2000-09-31	玉米 Maize	17.6	39.2	48.9			

3 结 语

在华北太行山前平原小麦-玉米轮作农田土壤水分渗漏和 NO_3^--N 的淋溶损失主要发生在高温多雨的玉米生长季节,水分补给是土壤水分渗漏和 NO_3^--N 的淋溶损失发生与否的控制因素,土壤水分渗漏量的多少和 NO_3^--N 在根层下界面处土壤溶液中浓度的大小是影响 NO_3^--N 淋失量多少的关键因子。每年深层土壤水分渗漏量、NO_3^--N 淋失量因降水年型不同而有差异,第一年土壤水分渗漏量为 33～48 mm,由此而引起的 NO_3^--N 淋失量为 N 6～17 kg hm^{-2},占肥料施用量的 1.4%～4.1%;第二年水分渗漏量为 90～92 mm,NO_3^--N 淋失量为 N 30～84 kg hm^{-2},占肥料施用量的 7.3%～20.3%。

土壤水分和 NO_3^--N 浓度在剖面中的分布和迁移存在着明显的时空变异特征,主要是粗放式的农田水肥管理方式造成的。在本区域农田生态系统 N 素的循环与平衡中,NO_3^--N 的淋溶损失是一重要支出项,是 N 素损失的重要途径之一。为了最大限度地减少 NO_3^--N 的淋失及其对环境产生的负面影响,在农业管理措施中应实行水肥的精准管理,按照作物的需水、需肥规律和养分的空间分布特征,以保持农田生态系统水肥平衡和可持续发展为原则,制定适宜本区域的合理的水肥管理制度。

参 考 文 献

[1] 张玉良. 农业化学与生物圈. 北京:中国环境科学出版社, 1987. 151～175. Zhang Y L. Agricultural Chemistry and Biosphere (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1987. 151～175

[2] 胡春胜,程一松,李晓欣. 太行山前平原农田生态系统中硝态氮的淋失研究. 土壤学报,2002,39(增刊):262～269. Hu C S, Cheng Y S, Li X X. Leaching loss of NO_3^--N in farmland ecosystem of piedmont plain of Mt Taihang (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (Suppl.):262～269

[3] 刘昌明,张喜英,由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究. 水利学报,1998,10:36～39. Liu C M, Zhang X Y, You M Z. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro lysimeter (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 10:36～39

[4] 张喜英. 作物根系与土壤水利用. 北京:气象出版社,1999. Zhang X Y. Crop Roots and Soil Water Utility (In Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1999

[5] Heng L K, White R E, Helyar K R, *et al*. Seasonal differences in the soil water balance under perennial and annual pastures on an acid

Sodosol in southeastern Australia. European Journal of Soil Science, 2001, 52:227～236

[6] 范嘉泉,郑剑非. 土壤水分的系统动态模拟. 北京农业大学学报, 1987, 13(4):45～48. Fan J Q, Zheng J F. Systematic simulation of soil water dynamic (In Chinese). Journal of Beijing Agricultural University, 1987, 13(4):45～48

[7] Magesan G N, White R E, Scotter D R. Nitrate leaching from a drained, sheep-grazed pasture. I. Experimental results and environmental implications. Aust. J. Soil Res., 1996, 34:55～67

[8] Fan J, Hao M D, Shao M A. Nitrate accumulation in soil profile of dry land farming in Northwest China. Pedosphere, 2003, 13(4): 367～374

[9] Legg J O, Meisinger J J. Soil nitrogen budgets. *In*: Stevenson F J. ed. Nitrogen in Agricultural Soils. Agronomy. 22. Madison, Wis: Am. Soc. Agron., 1982. 503～566

[10] White R E. Leaching. *In*: Wilson J R. ed. Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems. Wallingford, UK: CAB International, 1988. 193～211

[11] White R E, Magesan G N. A stochastic-empirical approach to modelling nitrate leaching. Soil Use and Management, 1991, 7:85～94

NITRATE LEACHING IN WHEAT-MAIZE ROTATION FIELD IN THE NORTH CHINA PLAIN

Zhang Yuming[1,2,3]　Zhang Jiabao[1]　Hu Chunsheng[2]　Li Xiaoxin[2]　Zhu Anning[1]

(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 Center for Agricutural Resources, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

(3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Soil water deep leaching and nitrate (NO_3^--N) distribution in the soil profile and NO_3^--N leaching losses below the root zone were investigated in fields under a local traditionally managed wheat-maize crop rotation system in the North China Plain. Coupled with the soil water balance method, soil water deep leaching and NO_3^--N concentration in suction samples were determined. The results indicate that water leaching, NO_3^--N distribution and leaching losses exhibited pronounced spatial and temporal variability. Events of water leaching and NO_3^--N leaching loss were prone to occur during the summer maize growing season (rainy season), after each irrigation operation and significant rainfall. Annual soil water deep leaching reached 33～48 mm (averaged 39 mm) in 1998/1999 cropping year and 90～92 mm (averaged 90.7 mm) in 1999/2000, accounting for 10 % and 19 % of the total amount of irrigation plus rainfall, respectively. The amount of NO_3^--N leached below the root zone (including leaching loss of soil- and fertilizer-N) averaged NO_3^--N 12 kg hm^{-2} a^{-1} (ranging from NO_3^--N 6 to 17 kg hm^{-2} a^{-1}) in 1998/1999 and NO_3^--N 61 kg hm^{-2} a^{-1} (ranging from NO_3^--N 30 to 84 kg hm^{-2} a^{-1}) in 1999/2000, equivalent to 1.4 %～4.1 % and 7.3 %～20.3 % of the N fertilizer applied, respectively. The results indicate that during the summer maize growing season, potentials do exist of reducing water and fertilizer inputs, so as to improve water and fertilizer use efficiency in this region.

Key words Water deep leaching; Nitrate leaching; Soil water