农业环境科学学报 2005,24(5):929-934
Journal of Agro-Environment Science

聚丙烯酰胺减少土壤养分的淋溶损失研究

员学锋[1,2], 汪有科[1,2], 吴普特[1,2], 冯 浩[1,2]

(1. 西北农林科技大学,陕西 杨凌 712100; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用室内人工土柱模拟试验方法,研究了在模拟耕层土壤中施加聚丙烯酰胺(PAM)后,土壤中主要营养元素N、P、K的淋溶损失状况。结果表明,经PAM处理后的土壤淋溶液中NO_3^-、PO_4^-和K^+浓度均低于对照,其浓度分别较对照平均减少了约45.55%、49.37%和70.24%。PAM处理后,土壤淋溶液中全N、全P、全K的累积含量均低于对照,且随PAM浓度的增加其累积含量呈下降趋势。

关键词:聚丙烯酰胺(PAM); 土壤淋溶液; N、P、K; 浓度; 累积量

中图分类号:S131.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-2043(2005)05-0929-06

Effects of Polyacrylamide Application on the Decrease of Soil Fertilizer and Its Mechanism

YUAN Xue-feng[1,2], WANG You-ke[1,2], WU Pu-te[1,2], FENG Hao[1,2]

(1.Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: The loss of soil fertilizer in soil not only increases the agricultural cost but also pollute the water resources especially in irrigated fields. The effect of polyacrylamide (PAM) on reducing soil nutrient loss was studied by the intermittent leaching experiment. The result showed that when treated by PAM, the concentration of NO_3^-、PO_4^{3-} and K^+ in soluble liquid decreased strikingly, the average concentration of them decreased by 45.55%,49.37% and 70.24% compared with the control. The accumulative quantities of the total N, P and K in soil soluble liquid were all less than those of the control and decreased further with the increased concentration of PAM. There existed a significant correlation between the accumulated total N, P, K and leaching time, with the correlation coefficients being larger than 0.98. Since PAM bearing an analogy with other macromolecule polymer that had a large molecular constitutional formula, when applied to the soil, PAM made aggregation with soil particles, built an artificial aggregate structure and form a hydrophobic protecting wire net in the soil surface which enhanced the stability of aggregate, which could absorb the fertilizer element and reduced the loss of fertilizer. The effect mechanism of PAM on soil structure and preventing fertilizer losses should be further researched in different types of soils.

Keywords: polyacrylamide (PAM); soil soluble liquid; N; P; K; concentration; cumulative quantity

当前,在我国农业生产中,各种化肥的当季利用率约为氮肥20%~35%、磷肥10%~25%、钾肥35%~50%。土壤中肥料养分淋溶损失是养分利用率低的一个重要原因,肥料养分的流失不仅使农业投入的成本增加,而且会对环境特别是水资源造成严重污染。例如,尿素在土壤中溶解后(在转化之前)呈分子状态存在于土壤溶液中,它很难被土壤吸附,容易随水移动进入地表水或地下水从而造成水体污染[4]。因此,提高化肥利用率、减少肥分损失及由此带来的一系列环境问题是化工和农业科研部门亟待解决的课题。利用高聚物土壤改良剂改良土壤结构, 可以提高肥料利用率。该方法着眼于调节土壤结构,通过创建和稳定水稳性团粒结构,改善肥料元素在土壤中的化学物理环境,抑制肥料元素随雨水或灌溉水流失和直接蒸发[1~3],高分子聚合物不仅具有良好的保水能力,而且由于

收稿日期:2004-11-13
基金项目:国家"十五"重大科技专项——西北半湿润渠灌区节水农业综合技术体系集成与示范(陕西杨凌), 课题号:2002AA2Z4211
作者简介:员学锋(1977—),男,陕西延安人,在读博士研究生,主要从事水土环境保护。E-mail:yuanxuefeng@163.com

具有对离子吸附和缓慢释放的特性还能起到保肥作用[3,4],从而提高肥料利用率。

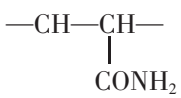
聚丙烯酰胺(PAM)作为一种高分子聚合物,近年来人们对其在土壤改良、水土流失方面的应用进行了广泛的研究。前人的研究主要集中在PAM对土壤结构、土壤水分、土壤孔隙等方面,有关PAM对土壤养分变化影响的研究不多。本试验目的是通过室内模拟试验,研究施加PAM后,土壤主要养分N、P、K的淋溶变化状况,进一步了解PAM对土壤养分淋溶损失的影响规律,为PAM的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为杨凌区西北农林科技大学节水灌溉试验地塿土,质地为重壤土,采样深度为0~20 cm,基本理化性质为:pH7.9,有机质含量18.0 g·kg^{-1},碱解氮54.8 mg·kg^{-1},速效磷(P_2O_5)12.5 mg·kg^{-1},速效钾(K_2O)141.2 mg·kg^{-1},属于中等肥力土壤。所用聚丙烯酰胺为法国SNF公司生产,市购。

聚丙烯酰胺(Polyacrylamide,简称PAM)是一种高分子聚合物,其单体为丙烯酰胺,分子式为[7]:



PAM是由丙烯酰胺(Acrylamide,简称AM)均聚或与其他单体共聚而成,含量在50%以上的线性水溶性高分子化学产品的总称。源于分子结构上的特性,PAM具有特殊的物理化学性质,其分子量有很宽的调节范围,由于结构单元中含有酰胺基,易形成氢键,故具有良好的水溶性。PAM多用在造纸、食品加工、水处理等方面,加入水中后,能使悬浮的固体颗粒迅速凝聚,据Seybold研究报道[5],PAM主要是通过物理作用降解,土壤中的PAM通过耕作、光照、机械等作用可以逐渐降解。因此,PAM对人体、动物、鱼类和植物并无毒害作用,在食品工业上广泛应用,PAM和尿素同时使用还可以作为家畜饲料的添加剂[7]。

1.2 试验方法

采用间歇淋溶法,试验装置如图1所示。事先用200目滤布封住PVC管(高30 cm,内径5.3 cm)底口,在内径滤布上垫有少量砂子(30 g)的PVC管中模拟耕层。按1.30 g·cm^{-3}的容重先装入264 g风干土(过2 mm筛),再在其上按同样紧实度装入土壤、肥料和PAM的混合样264 g,其中PAM的施用量根据施加肥料后剩余土样按照PAM与风干土样的比例进行填装。土柱总装土、肥和PAM的量为528 g。随后在土柱上面再以少量砂子(30 g)覆盖以防加水时扰乱土层。

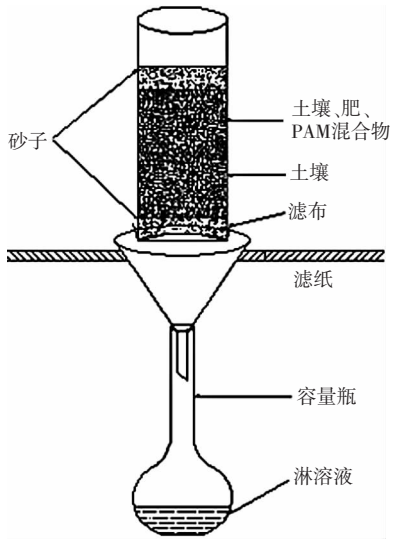


图1 试验装置

Figure 1 Diagram of the experimental setup

1.3 试验设计

试验设计见表1,各处理重复3次。第1次加水150 mL使土壤水分接近饱和,再加水200 mL,同时收集淋溶液。本试验主要侧重于测定不同处理土壤淋溶液浓度的大小,为了避免因淋溶液体积的偏大或偏小造成土壤养分累积淋溶损失的差别,在室温下培养4 d后,用200 mL水进行第2次淋溶,以后各次按同样操作进行,即培养4 d,淋溶1次,共淋溶6次。量取各次淋溶液体积,测定NO_3^-(紫外分光光度法)、PO_4^{3-}(钼锑抗比色法)、K^+(原子吸收法)浓度,计算其累积淋溶量。

2 结果与讨论

2.1 PAM减少N淋溶损失的效应

氮肥使用量和使用方式的不合理,不仅导致作物体内硝酸盐含量的增加,降低产品品质,还会加剧包

表1 试验设计

Table 1 Design of the experiment

编号	PAM施用量(PAM与风干土重量比)	肥料用量/g	
		尿素(分析纯)	KH_2PO_4
对照	0	2.00	1.70
PAM1	2/10 000	2.00	1.70
PAM2	10/10 000	2.00	1.70

括土壤 N 素淋洗渗漏,降低肥料利用率,造成严重的环境污染问题[7,8]。

我国是世界上消耗氮肥最多的国家,由于普通氮肥淋溶速度快,施入土壤后容易挥发、淋溶和反硝化损失, 很难在土壤中保存,N 素的淋溶损失可谓减少肥料损失研究课题中的重点问题。在地下水位较高的地区,N 的淋溶渗漏也是造成地下水体污染的主要原因。研究表明灌水处理很容易造成土壤无机 N 淋溶渗漏,同时随灌水量增加,渗漏深度随之增加。有资料显示,春夏玉米连作试验,灌水量超过 900 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 和旬降雨量超过 100 mm 时, 将有硝态氮淋失到地表 100 cm 以下,排出水的硝态氮超过 30 $mg \cdot L^{-1}$;夏玉米施 N 量为 150 $kg \cdot hm^{-2}$ 时, 在 7、8 月雨季,130 cm 土层以下硝态氮的淋失量达 30 $mg \cdot L^{-1}$ 左右。同时,当施 N 量为 400 $kg \cdot hm^{-2}$ 时,可使黄土 20 m 深的地下水硝态氮浓度提高到 50 $mg \cdot L^{-1}$[9]。显而易见,寻求一种提高 N 素利用率的措施就显得尤为重要。

PAM 对减少土壤全淋失 N 的效果非常显著,从图 2 可以看出,随 PAM 用量的增大,淋溶液中 NO_3^-的浓度减小。这是因为 PAM 提高了土壤对 NO_3^-的吸附量,且其吸附量随 PAM 用量的增加而增大。分析结果显示,经 PAM 处理后,各处理淋溶液中全 N 的含量均低于对照,其中,PAM1(2/10 000)的 6 批淋溶液中全 N 含量较对照分别减少了约 5.39%、35.81%、56.29%、55.07%、50.12%和 52.71%;PAM2(10/10 000)较对照分别减少了约 18.16%、61.36%、72.87%、63.26%、43.13%和 32.99%。

在前 4 批淋溶液中,PAM 处理后,土壤中 N 的淋溶损失随 PAM 浓度的增加呈递减趋势, 随后试验中

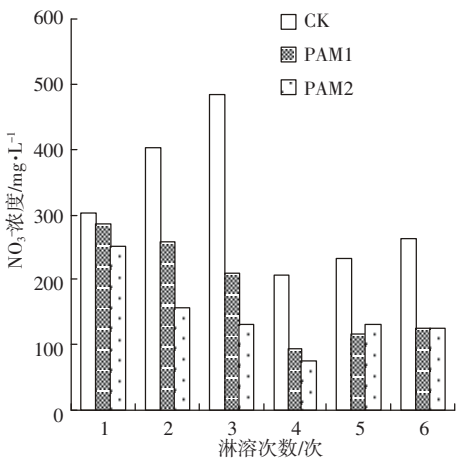


图 2　土壤淋溶液中 NO_3^-的浓度

Figure 2　Concentrations of NO_3^- in soluble liquid of soil

PAM 同样起到了很好的效果,只是此时低 PAM 浓度 PAM1 的效果略优于高浓度 PAM2。这是因为在淋溶试验过程中低浓度处理后 N 素容易溶解在水中进入测试容器,而高浓度处理由于 N 素淋溶缓慢,进入测试体的较少而在土柱底部逐渐积累。随着淋溶次数的增加溶解在淋溶液中而进入测试体,因而使测试体内淋溶液的浓度增加。

从图 3 可以看出,经 PAM 处理后,土壤淋溶液中全 N 的累积量均大大低于对照,PAM 处理的全 N 含量累积曲线较为平缓, 同时随 PAM 施用浓度的增加土壤中 N 淋溶损失量愈少。分析结果显示, 对照、PAM1 和 PAM2 的 6 次淋溶液中全 N 累积含量分别为 289.49 mg、166.68 mg 和 141.09 mg, 经 PAM 处理后土壤淋溶液中全 N 的累积量分别较对照平均减少了 42.42%和 51.26%。分析还发现,在整个淋溶过程中, 各处理土壤淋溶液中全 N 的累积量和时间具有很好的二次相关性, 其相关系数均为 0.985 以上,但是如果分阶段模拟,以第 3 次淋溶为分界点,前后的淋溶累积量和时间均为线性相关, 相关系数均高达 0.998 甚至为 1。

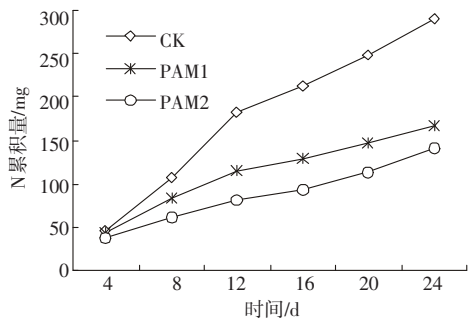


图 3　土壤淋溶液中全 N 累积曲线

Figure 3　Cumulative curve of total N in soluble liquid of soil

2.2 PAM 减少 P 淋溶损失的效应

农田系统中 P 元素流失的一个主要途径是 P 在土壤剖面向下淋洗[10]。PAM 处理的土壤,其 P 的淋溶损失量大大减少。研究表明,在整个淋溶过程中,PAM 处理的土壤淋溶液中 PO_4^{3-}的含量均低于对照,PAM 处理的土壤淋溶液中 PO_4^{3-}的含量较对照减少了 11.86%~78.96%。说明在淋溶过程中,PAM 可以抑制 PO_4^{3-}随水下移,起到减少 P 的淋溶损失效果,见图 4。

从图 5 可以看出,PAM 处理可以大大减少全 P 的累积淋失量,其中对照,PAM1 和 PAM2 6 次淋溶液中全 P 的累积量分别为 25.42、14.27 和 13.28 mg,PAM 低浓度处理和高浓度处理后土壤淋溶液中全 P

的累积含量分别较对照减少了43.86%和47.76%。总的看来,2种处理之间差异不显著,但仍遵循随PAM施用浓度的增加,土壤中P的淋溶损失量减少这一规律。和N素累积淋溶累积曲线相似,在整个淋溶过程中,各处理土壤淋溶液中全P的累积量和时间具有很好的二次相关性,其相关系数均高于0.98,以第3次淋溶为分界点分阶段模拟,前后的淋溶累积量和时间均为线性相关,相关系数均为0.99。

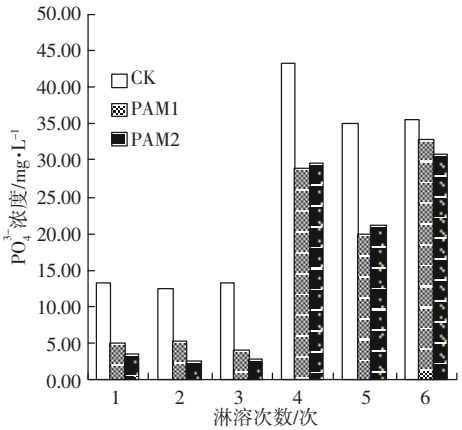


图4 土壤淋溶液中PO_4^{3-}的浓度

Figure 4 Concentrations of PO_4^{3-} in soluble liquid of soil

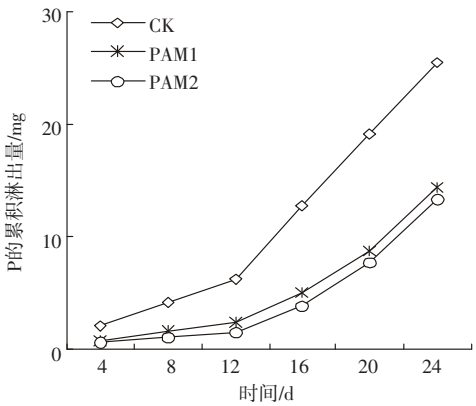


图5 土壤淋溶液中全P累积曲线

Figure 5 Cumulative curve of total P in soluble liquid of soil

2.3 PAM减少K淋溶损失的效应

K肥施入土壤后,同N、P一样,往往会遭受随水淋失,从而影响到K肥的有效性和利用率[33]。

试验结果表明, PAM对K^+的作用与对NO_3^-和PO_4^{3-}的作用一样,可以提高土壤对K^+的吸附作用,抑制K^+随水流失,表现为在PAM处理的土壤淋溶液中K^+的浓度远远低于对照。如图6所示,PAM对减少土壤中K的淋失作用十分显著。分析发现,在整个淋溶过程中,PAM处理后的土壤淋溶液中K的含量较对照减少了51.23%~87.90%。

淋溶试验结果如图7所示。对照、PAM1和PAM2 6次淋溶液中全K累积含量分别为40.82、12.98和10.94 mg,PAM处理的土壤淋溶液中K的累积量分别较对照平均减少了68.19%和73.19%。经PAM处理后土壤淋溶液中全K累积淋溶曲线非常平缓,高浓度和低浓度处理淋溶累积曲线的趋势较为一致。通过对淋溶累积量和时间进行线性拟合发现,在整个淋溶过程中,各处理土壤淋溶液中全K累积量和时间有很好的线性相关性,其相关系数均高于0.99。

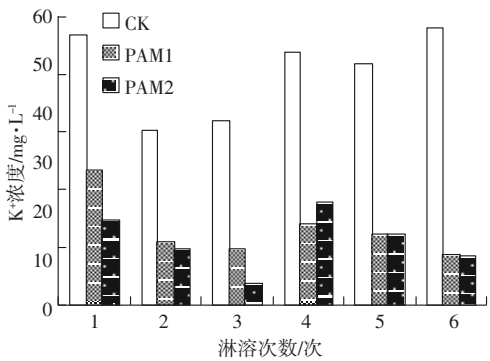


图6 土壤淋溶液中K^+的浓度

Figure 6 Concentrations of K^+ in soluble liquid of soil

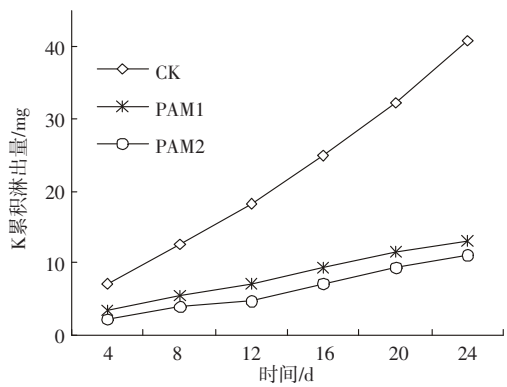


图7 土壤淋溶液中全K累积曲线

Figure 7 Cumulative curve of total K in soluble liquid of soil

2.4 PAM的保肥机理分析

养分淋失是土壤养分元素损失的一条重要途径[11]。养分的淋溶主要是向下运动的质流,其中土壤水分的含量和运动是决定养分土壤淋溶的主要因素。如果土壤水分发生深层渗漏,则会引发土壤养分的淋失。将PAM施加到土壤中,通过调节土壤结构,创建和稳定水稳性团聚体,改善肥料在土壤中的化学物理环境,提高土壤水合水的含量,抑制肥料元素随水或灌溉水流失是一种行之有效的方法。

当PAM在水中溶解后,如图8所示,其分子和

分子链节在土壤表面吸附一部分粘土微粒，在 PAM 一部分分子间形成微团粒作用，使微团粒聚集成价值大的团粒结构，可有效改善土壤结构。测定结果表明，施用 PAM 后的土壤水稳性团聚体含量均较对照有了显著的提高，在 PAM 与土壤撒施和拌施 2 种施用方式下，PAM 用量越大，土壤水稳性团聚体含量越多。当 PAM 浓度较低时，拌施和撒施均能提高土壤团聚体含量，但二者之间差异不大。当 PAM 浓度增大 20 倍后，拌施较撒施效果更好。研究还表明，未经 PAM 处理的对照中小粒级团粒含量较多，而经 PAM 处理的土样中大粒级含量较多，同时随 PAM 施用量的增大，所形成的大粒级团粒增多。土壤改良剂对土壤水稳性团粒的创建和稳定作用，可使土壤的孔隙度特别是土壤毛管孔隙度增大[13]。PAM 也具有类似的性质，PAM 可以通过创建和稳定水稳性团聚体以及对养分元素吸附两方面的作用来加强土壤对肥料的吸附和保持，将肥料元素缓慢释放，抑制肥料元素快速流失，提高肥料利用率[10]。

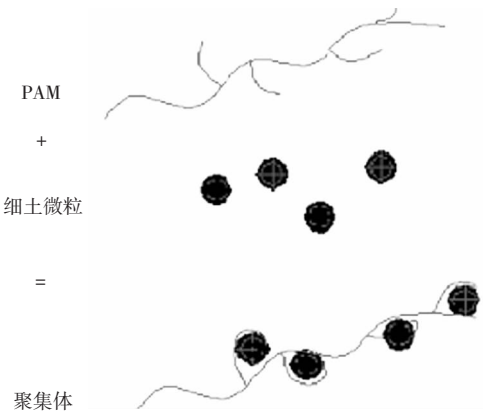


图 8　PAM 与土壤粘结示意图

Figure 8　Cohesion of PAM and soil particle

PAM 本身就是一种高分子聚合物，当其和水接触时疏水基可因疏水作用而转向内侧，形成不溶于水的粒状结构，亲水基团通过氢键与水分子结合形成水合水，在分子的表面形成厚度为 0.5~0.6 nm 的 2~3 个水分子层，这就是水合作用。水合作用使高分子的网束展开，由于网内结构中含有一定数量的亲水离子，使三维空间网内外出现了离子浓度差，从而造成了网状结构内外产生渗透压，水分子便在渗透压的作用下向网内渗透形成了网孔水。网内的网孔水都是被高分子网空间所束缚的自由水，水分子被封存在边长 10Å~100Å的高分子网内但被束缚的水分子仍然具有普通水的理化性质，此时水分子的运动受到限制，进而限制了土壤养分元素的流失，提高了作物对水分和养分的利用率。

3　结论

(1)PAM 处理后可有效降低土壤淋溶液中 NO_3^-、PO_4^{3-} 和 K^+的浓度，其浓度分别较对照平均减少了 45.55%、49.37%和 70.24%。

(2)PAM 处理后，每批土壤淋溶液中全 N、全 P、全 K 的累积含量均低于对照，且随 PAM 浓度的增加土壤淋溶液中全 N、全 P、全 K 的累积含量呈下降趋势。经过方差分析得出，各处理淋溶液中全 N、全 P、全 K 的含量较对照大大减少，且达显著或极显著水平。2/10 000 处理和 10/10 000 处理后的土壤淋溶液中，N、P、K 含量分别较对照减少了 5.39%~72.87%、11.86%~78.96%和 48.10%~87.90%。

(3)随着 PAM 浓度的增加，土壤中养分淋失量减少。2/10 000 处理后的土壤淋溶液中全 N、全 P、全 K 的 6 次累积量分别较对照减少了 42.42%、43.86%和 68.19%；10/10 000 处理后土壤淋溶液中的六次累积含量分别较对照减少了 51.26%、47.76%和 73.19%。同时，各处理土壤淋溶液中全 N、全 P、全 K 的累积量均随时间呈很好的线性相关或二次相关，相关系数高达 0.98 以上。

(4)和其他高分子聚合物类似[12]，施加 PAM 后，可以使分散的微土粒聚集和絮凝，创建人工团粒结构，并在人工和天然团粒表面形成疏水性的保护网，提高团粒的稳定性。通过创建水稳性团粒和对肥料元素的吸附作用，减少肥料进入土壤液相，抑制肥料元素的流失，使土壤肥力得以保持，有利于作物吸收利用，从而提高了肥料的利用率。

(5)由于对 PAM 的保肥性能研究还处于探索阶段，淋溶结束后土柱中各种养分在不同深度的含量分布状况没有测定是本次试验的一大缺憾。同时，有关 PAM 的保肥机理以及在其他类型土壤中的应用效果还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 何绪生.控效肥料的研究进展[J].植物营养与肥料学报,1998,4(2):97-106.

[2] 许秀成.提高肥料利用率化工部门能作些什么[J].磷肥与复肥,1999,(3):6-11.

[3] 张春伦,朱兴明,等.缓释尿素的肥效及 N 素利用率研究[J].土壤肥料,1998,(6):17-20.

[4] 黄元仿,李韵珠.不同灌水条件下土壤氮素淋洗渗漏的研究[A].现代

土壤科学研究[C].北京:中国农业科技出版社,1994.243-247.

[5] Barvenik F W. Polacrylamide characteristics related to soil applications [J]. *Soil Sci*,1994,158:235-243.

[6] 员学锋,吴普特,冯 浩.聚丙烯酰胺(PAM)在土壤改良中的应用进展[J].水土保持研究,2002,9(2):141-145.

[7] 陈子明, 袁锋明, 姚造华,等. 北京潮土硝态氮土体中的移动特点及淋失动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1995,1(2): 71-79.

[8] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998 4(1): 8-15.

[9] 陈子明. 氮肥施用对土体中氮素移动利用及其产量影响[J]. 土壤肥料, 1995,(4):36-42.

[10] Gal M, Arcan L, Shainberg I, et al. Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-Scanning electron microscopeobservations[J]. *Soil Sic Soc Am J*,1984,48:872-878.

[11] 穆兴民.水肥耦合效应与协同管理[M].北京:中国林业出版社,1999. 30-31.

[12] 龙明杰,张宏伟.高聚物土壤结构改良剂的研究[J].土壤肥料,2000, (5):13-18.

[13] kristian J Aase,David L Bjorneberg, Robert E Sojka. Sprinkler irrigation run off and erosion control with polyacrylamide-Lavoratory test [J].*Soil Sci Am J*, 1998, 62:1681-1687.