

陕西三种类型土壤剖面硝酸盐累积、分布与土壤质地的关系

同延安¹, 石维¹, 吕殿青¹, Ove Emteryd²

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌, 712100;

2 Dept. of Forestry Ecology, Swedish Univ. of Agric. Sci., Umeå 90183, Sweden)

摘要: 研究了陕北黄绵土, 关中塬土与陕南水稻土土壤剖面中硝酸盐的分布与累积, 分析了硝酸盐淋移与土壤剖面粘粒含量的关系。结果表明, 黄绵土由于粘粒含量少, 土壤疏松, 氮肥施入土壤后硝化作用速度快, 氮素多以硝态氮存在于土壤中, 遇到过量的灌溉或降水, 容易引起硝酸盐淋失。在米脂的川道地, 施肥 2 个月后, 硝酸盐峰值在 50 cm 左右, 4 个多月后, 峰值下移至 100 cm 左右, 6 个月后, 该峰值下降到 130 cm 左右, 一年内, 硝酸盐的峰值已经消失, 分布在 130 至 350 cm 之间。因此, 在黄绵土地区可以灌溉的川道地, 氮素损失的主要途径是硝酸盐淋失。关中塬土, 粘粒含量相对较高, 硝化作用速度快, 但由于在 80—120 cm 有一粘化层, 阻碍了水分与硝酸盐的向下淋移, 使得大部分硝酸盐累积在 0—100 cm 土层, 其累积量占到 0—400 cm 总累积量的 64%—74%, 而 200—400 cm 仅占到 7%—13%。而且淋移到 100 cm 以下的硝酸盐, 也通过反硝化损失了。陕南水稻土, 由于深层土壤水饱和, 硝酸盐难以向下淋移, 氮素主要累积在土壤表层。由于下层土壤长期处于厌气条件, 即使淋移到下层的硝酸盐也通过反硝化作用而损失掉了。

关键词: 硝酸盐淋移与累积; 粘粒含量; 土壤剖面; 黄绵土; 塬土; 水稻土

中图分类号: S153.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)04-0435-07

Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi

TONG Yan-an¹, SHI Wei¹, LÜ Dian-qing¹, Emteryd Ove²

(1 College of Resour. and Envir. Sci., Northwest Sci-Tech Univ. of Agric. and Fore., Yangling 712100, China;

2 Dept. of Forestry Ecology, Swedish Univ. of Agric. Sci., Umeå. 90183, Sweden)

Abstract: Nitrate distribution and accumulation in soil profile in Entisol in northshaanxi, Anthrosol in Guanzhong plain, Paddy soil in southshaanxi, were studied and the relationship between soil texture and nitrate leaching was described in this paper. The results indicated that due to less clay content and looseness and a fast speed of nitrification, of Entisol, nitrogen input to the soil mostly presented as nitrate, in the bottom-land of Loess Plateau, 2 months later after fertilization, the peak of the nitrate content was located in 50 cm depth, and was moved down to 100 cm depth after 4 months, 130 cm after 6 months, the peak was disappeared after near one year and the nitrate was distributed between 130 and 350 cm depth. Therefore, nitrate leaching is the main way of N losses in bottom-land in Entisol area, where the irrigation could be carried out. However, in Anthrosol, Guanzhong plain, due to a higher clay content relatively and fast speed of nitrification, and a clay layer in 80—120 cm depth was found, which block the nitrate and water leaching through, so most of the nitrate was accumulated in 0—100 cm depth, which account for 64%—74% of total N accumulated in 0—400 cm depth, and N in 200—400 cm depth was only account for 7%—13%. Even some nitrate leached deeper than

收稿日期: 2004-11-30

修改稿收到日期: 2005-03-09

基金项目: 瑞典国际开发署(Sida)资助, 中国-瑞典氮肥合作项目的部分内容; 国家自然科学基金项目(30370822)资助。

作者简介: 同延安(1956—), 男, 陕西华县人, 博士, 教授。主要从事氮素的土壤化学与植物营养的研究与应用。

100 cm depth, which would loss by denitrification. So, there was no nitrate peak movement could be seen in the soil profile. Since soil water saturated in deep layer, in Paddy soil in Southshaanxi, it is very difficult for water and nitrate leaching down, so nitrate was mainly accumulated in top soil layer. Nitrate leached down to deeper layer where there is an anaerobic condition, losses through denitrification.

Key words: nitrate leaching and accumulation; clay content; soil profile; Entisol; Anthrosol; Paddy soil

在世界范围内,硝酸盐造成地下水与地表水的污染对人类健康存在着潜在的威胁^[1-3];农业是美国地下水与地表水最严重的硝酸盐污染源^[4-5]。70年代以后,中国开始大量使用氮肥,至80年代中期中国的肥料用量就超过了发达国家水平^[6]。过量施肥在中国已相当普遍^[7],特别是城郊的蔬菜地以及果园,氮肥用量超过农作物的3~4倍^[8]。如陕北榆林仅玉米施氮量达450 kg/hm²;苏南高产水稻地区施氮量达600~750 kg/hm²^[9],这些过量氮肥必将对地下水与地表水产生污染。

许多因素影响硝酸盐在土壤剖面中的移动,如水量、施肥方式与施肥量、土壤有机质含量、土地利用方式、土壤质地与土体构型等。Fan等^[10]利用长期定位试验研究发现,与单施氮肥比较,氮磷配合施用明显减少了硝酸盐在土壤剖面中的累积,同时提高了氮肥利用率。与传统的大水漫灌相比,喷灌与灌溉施肥相结合,可以明显减少硝酸盐淋溶^[11]。Trindade^[12]在沙壤土上的大田试验表明,施化学氮肥N 170~220 kg/hm²与牛粪N 263~474 kg/hm²,硝酸盐的年淋失量达N 154~338 kg/hm²,过量施肥是硝酸盐淋失的前提条件。在水稻—甜椒轮作系统中,种植填闲作物可减少硝酸盐淋失,最大限度地提高氮肥利用率^[13]。增施有机肥,控制氮肥用量,在一定程度上可减少硝酸盐在土壤深层的累积^[14]。为此,本试验旨在通过硝酸盐移动与土壤质地之间关系的分析,确定土壤质地对硝酸盐移动影响的程度。

1 材料与方法

1.1 试验方法

田间试验,分别布置在陕北米脂、关中杨凌与陕南汉中市,代表了陕西3个不同的农业生态气候区,地势平坦,均可以灌溉。米脂黄绵土区属中温带半干旱气候区,年降雨量350~550 mm,为春玉米一年一熟区,生育期5月至9月。该区为川道地,地下水位仅有4.5 m,试验前茬作物为春玉米,从5月至翌年4月的降雨量为386.5 mm,春玉米生育期间灌水量194 mm。关中杨凌塿土区地处暖温带半湿润气候区,年降雨量为550~650 mm,为冬小麦/夏玉米

轮作区。小麦生育期10月至翌年6月,玉米生育期6月至9月。该区位于杨凌头道塿,地下水位27 m,前茬作物为夏玉米,从10月至翌年10月的降雨量为601 mm,小麦冬灌78 mm,玉米灌水217 mm。陕南汉中水稻土区属北亚热带湿润气候区,年降雨量700~900 mm^[15]。是冬小麦/水稻轮作区,小麦生育期10月至翌年6月,水稻生育期6月至9月。该试验点为汉中市农科所试验田,地下水位7 m。前茬作物为水稻,试验期间降雨量759 mm,小麦冬灌85 mm,水稻生长期淹水。各试验区土壤的基本理化性状和质地见表1、表2。为易于检测到硝酸盐在土壤剖面中累积的峰值,本试验是在该种植体系的生长周期内不种植任何作物的条件下研究硝酸盐的淋溶。

3个试验点的试验均设不施氮肥(对照区,用CK表示)和施氮肥(用N表示)2个处理,重复3次。小区面积:米脂为7 m×9 m,杨凌为7 m×8 m,汉中为4 m×8 m。氮肥为尿素,按当地习惯施肥量:米脂春玉米生长期间为N 250 kg/hm²;杨凌冬小麦生长期间为N 240 kg/hm²,夏玉米生长期间为N 280 kg/hm²;汉中冬小麦与水稻生长期间各为N 360 kg/hm²。灌水量与灌水时间根据本试验区周围作物的生长情况与农民的习惯确定。

表1 黄绵土、塿土和水稻土0—20 cm土层的理化性质
Table 1 The physio-chemical properties of 0—20 cm soil layer in Entisol, Anthrosol and Paddy soil

项目 Item	黄绵土 Entisol	塿土 Anthrosol	水稻土 Paddy soil
有机质 OM (g/kg)	2.99	11.80	10.20
全 N Total N (g/kg)	0.15	0.81	0.11
全 P ₂ O ₅ Total P ₂ O ₅ (g/kg)	1.09	0.79	0.90
NH ₄ -N (mg/kg)	8.20		3.74
NO ₃ -N (mg/kg)	11.50		26.56
CaCO ₃ (g/kg)	104.25		4.42
pH	8.30	8.30	7.10
CEC (cmol/kg)	7.31	15.0	15.49
田间持水量 WHC (%)	22.49	23.0	27.66
容重 Bulk density (g/cm ³)	1.10	1.20	1.47

表2 三种土壤剖面的质地分析(%)

Table 2 The soil texture of Entisol, Anthrosol and Paddy soil

土层 Soil depth (cm)	土壤颗粒大小(mm) Particle size of soil								
	黄绵土 Entisol			垆土 Anthrosol			水稻土 Paddy soil		
	2.00 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	< 0.002	2.00 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	< 0.002	2.00 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	< 0.002
0—20	83.9	8.5	5.9	27.5	49.0	23.5	35.9	45.2	18.9
20—40	87.3	5.6	5.9	24.3	49.5	26.2	34.1	52.8	13.1
40—60	88.1	5.6	5.6	29.9	45.5	24.6	36.1	48.6	16.3
60—80	86.1	8.1	5.8	26.6	47.5	25.9	40.5	46.8	12.7
80—100	88.3	5.1	6.6	25.3	39.4	35.3	38.5	48.8	12.7
100—120	92.2	2.4	5.4	26.3	38.7	35.0	34.5	51.6	13.9
120—140	89.6	4.9	5.5	31.9	38.0	30.0	26.9	52.8	20.3
140—160	88.4	6.4	5.3	31.6	43.2	25.2	24.5	56.4	19.1
160—180	91.9	2.8	5.4	32.7	46.2	21.1	36.1	45.2	18.7
180—200	88.1	5.9	6.1	37.1	42.1	20.7	41.6	42.4	16.0
平均 Aver.	88.4	5.5	5.7	29.3	43.9	26.7	35.0	48.7	16.4

1.2 取样与分析方法

土壤剖面样品用土钻取样。米脂与杨凌土壤取样至400 cm深,汉中取样至200 cm深。表层分为0—10、10—20 cm二层,其余均为20 cm一层,每试验区分别取3个剖面,同一处理共有9个剖面重复。土样用50 mL 2 mol/L KCl浸提,水:土=5:1,振荡30 min后,取滤液用流动注射分析仪测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量^[16]。在氮素平衡计算与土壤剖面氮素累积表达时,黄绵土与垆土用硝酸盐测定值,铵态氮含量很低忽略不计^[17];水稻土由于铵态氮含量高,计算和表达均用铵态氮与硝态氮之和。不同土类粘粒含量的差异显著性检验以及各土壤硝酸盐累积量的差异显著性检验应用SPSS10.0软件统计。

2 结果与讨论

2.1 硝酸盐在黄绵土剖面不同层次的累积与淋移

硝酸盐在土壤剖面不同层次的累积情况见表3。米脂试验在开始前的5月6日测定,0—400 cm的硝酸盐累积量为 $\text{N } 350 \text{ kg/hm}^2$;施 $\text{N } 250 \text{ kg/hm}^2$ 后,于7月10日测定,0—400 cm土壤剖面的硝酸盐累积量为 $\text{N } 623.7 \text{ kg/hm}^2$,玉米收获后的9月23日为 $\text{N } 623.5 \text{ kg/hm}^2$,11月5日为 $\text{N } 678 \text{ kg/hm}^2$,到第二年的4月10日为 $\text{N } 592 \text{ kg/hm}^2$ 。由于该土壤的pH值为8.3(表1),硝化作用速度快,在土壤水分合适的条件下,尿素施入土壤一周后几乎全部转化成硝态氮^[18]。而且黄绵土的粘粒含量只有5.7%(表2),有机质含量低(表1),通气性好,反硝化作用微弱,氮素主要以硝态氮形态存在于土壤中。如果说

土壤剖面中的部分硝酸盐继续淋移出400 cm以下,同时土壤有机氮也在不断地矿化,使土壤剖面中的氮素处于平衡,施入的氮肥基本仍残留在土壤中。

不同时期硝酸盐在陕北米脂黄绵土剖面中的分布(图1)可以明显地看出,不施肥区(图1A),不同时间内硝酸盐在土壤剖面不同层次的累积差异不大,没有出现明显的硝酸盐累积峰值;而施肥区(图1B)的硝酸盐在土壤剖面中的移动则非常明显。施肥前的5月6日,硝酸盐在土壤剖面中的最高值仅为 $\text{N } 20 \text{ kg/hm}^2$ 左右,5月7日施入尿素后,7月10日与9月23日,硝酸盐的最高峰值达 $\text{N } 150 \text{ kg/hm}^2$ 左右,同时该峰值也在不断的向下移动。施肥2个月,硝酸盐峰值在50 cm左右,4个多月后,该峰值下移至100 cm左右,到11月5日,该高峰值出现在130 cm处,到第二年的4月10日,硝酸盐的峰值已不明显,主要分布在130—350 cm之间。

图1还看出,不管是对照区还是施肥区,在3 m以下,硝酸盐含量随土层深度增加而增加。本试验地的地下水位仅有4.5 m,3 m以下的土壤含水量明显增大,而溶解在水中的硝酸盐也随之增加,这些硝酸盐明显来自前茬作物。如2 m以下的氮素难以被根系吸收,则有60%以上的氮素不能被作物吸收利用。从表3也得到同样的结果,即施肥2个月,0—100 cm累积的硝酸盐占到总累积量的64%,到第二年的4月10日下降到11%;相反,200—400 cm累积的硝酸盐则由2个月时的27%上升到56%。由此可以认为,在黄绵土地区可以灌溉的川道地,氮素损失的主要途径是硝酸盐淋失,这与吕殿青等^[8]

表 3 硝酸盐在土壤剖面不同层次的累积量 (N kg/hm²)
Table 3 NO₃⁻-N accumulation in different layers of soil profile

土壤 Soil	日期 Data	土壤剖面 Soil profile(cm)			施入氮量 N rate (N kg/hm ²)	占累积总量 (%) % of the total N		
		0—100	100—200	200—400 ²⁾		0—100 cm	200—400 cm ³⁾	
黄绵土 Entisol	6-May	115.9	74.4	160.3	250	33	46	
	10-Jul	400.9	57.0	165.7		64	27	
	23-Sep	251.2	151.4	220.9		40	35	
	5-Nov	59.2	408.9	210.0		9	31	
塋土 Anthrosol	10-Apr	67.1	196.3	329.2	240	11	56	
	10-Oct	162.2	47.7	30.5		67	13	
	15-Dec	409.9	104.5	39.6		74	7	
	30-May	351.9	121.5	73.6		64	13	
水稻土 ¹⁾ Paddy soil	29-Sep	378.3	116.9	59.0	280	68	11	
	14-Oct	120.3	65.3	185.6		65	35	
	7-Jan	197.7				360		
	5-Mar	204.7						
	14-Jun	175.0	59.5	234.5		75	25	
	29-Sep	120.9	79.3	200.2	360	60	40	

1) 水稻土剖面中的氮素累积量为硝态氮与铵态氮之和。The N accumulation is sum of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in paddy soil.
2) 水稻土为 0—200cm。0—200cm in paddy soil. 3) 水稻土为 100—200cm。100—200cm in paddy soil.

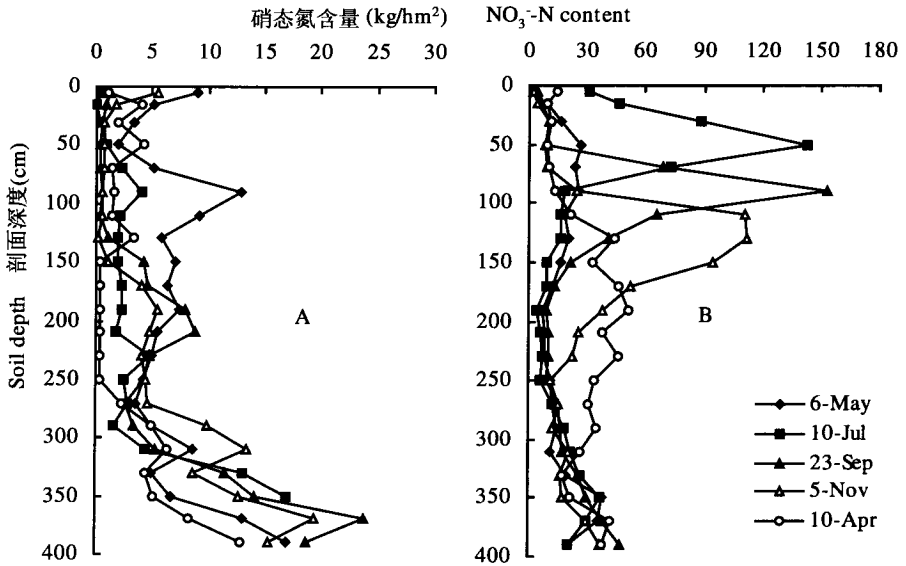


图 1 不同时期内硝酸盐在陕北米脂黄绵土剖面中的分布 (A: CK, B: N)

Fig.1 Nitrate distribution in Entisol soil profile in different time in Mizhi County, north Shaanxi (A: CK, B: N)

的结论相似。

2.2 硝酸盐在关中塋土剖面不同层次的累积与淋移

在没有作物种植的裸地上,塋土剖面中累积的氮素在小麦播种前的 10 月 10 日测定,0—400 cm 为 N 240.4 kg/hm²(表 3),于施 N 240 kg/hm² 后的 12 月 15 日测定,积累氮素为 N 554.0 kg/hm²,增加 74

kg/hm²,这些氮素有可能来自有机氮的矿化。在小麦收获时的 5 月 30 日,积累氮素为 N 546.9 kg/hm²,在小麦生长期间基本上没有氮素损失。种玉米时又施氮肥 N 280 kg/hm²,到玉米收获时的 9 月 28 日,土壤中仅存氮素 554.2 kg/hm²,说明玉米生长期间损失氮素为 N 272.6 kg/hm²。

不同时期内硝酸盐在关中塋土剖面中的分布看

出,不同时期内大部分硝酸盐分布在 100 cm 以上,只有很少部分淋移到 100 cm 以下。无论是对照区(图 2A)还是施肥区(图 2B),都没有硝酸盐累积峰值移动的迹象。从表 3 结果同样可看出,不同时间测定的 0—100 cm 累积的硝酸盐占到 0—400 cm 累积总量的 64%—74%,而 200—400 cm 的累积量仅占到累积总量的 7%—13%。由于塿土在 80—120 cm 土层为粘化层,该处粘粒含量高达 35%左右,阻碍

了水分大量下渗,导致水分和硝酸盐在粘化层以上累积,难以淋移到粘化层以下。水分与硝酸盐在粘化层以上的累积,加剧了反硝化作用^[18]。梁东丽等在同一地区研究也发现,在 60 cm 与 90 cm 是 N_2O 浓度最高的层次^[18-19],说明了反硝化作用的存在。因此可以认为,塿土硝酸盐的损失与氮素的反硝化作用有关。

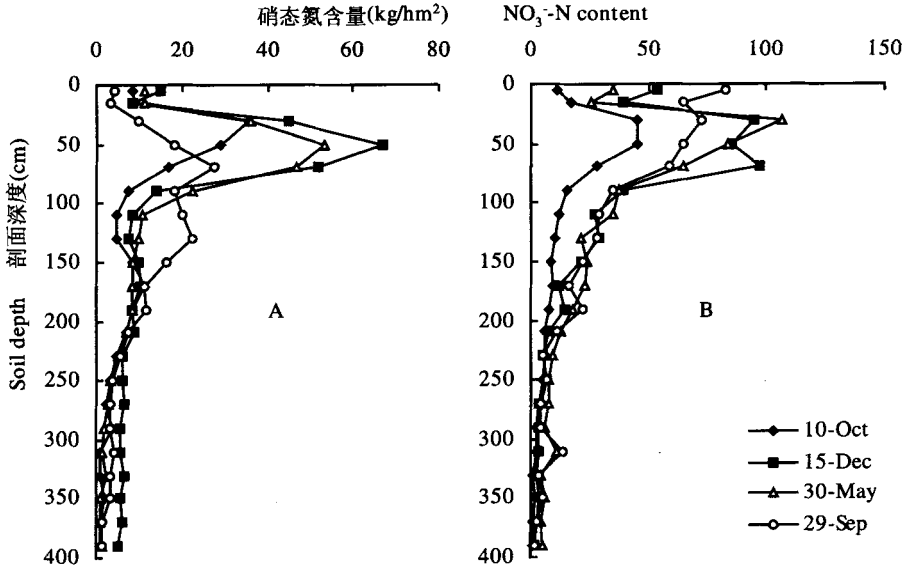


图 2 不同时期内硝酸盐在关中塿土剖面中的分布(A: CK, B: N)

Fig. 2 Nitrate distribution in Anthrosol profile in different time in Guanzhong area (A: CK, B: N)

2.3 硝酸盐在汉中水稻土剖面不同层次的累积与淋移

由于汉中水稻土深层土壤含水量高,取土剖面深度仅为 200 cm。10 月 14 日小麦播种前,0—200 cm 土层氮素累积量为 $N\ 185.6\ kg/hm^2$ (表 3),施入氮肥 $N\ 360\ kg/hm^2$ 后,0—200 cm 硝酸盐的累积量为 $N\ 234.5\ kg/hm^2$ (6 月 14 日测定),有 $311.1\ kg/hm^2$ 未测出。种水稻时又施入氮肥为 $N\ 360\ kg/hm^2$,在水稻生长期间的 9 月 29 日取样,硝酸盐累积量为 $N\ 200.2\ kg/hm^2$,又有 $N\ 394.3\ kg/hm^2$ 未测出。在整个小麦—水稻轮作周期内,共有 $N\ 705.4\ kg/hm^2$ 没有被测定出来。根据他人的研究结果,我们估计这些未测出的氮素有可能被粘土矿物固定^[20]或因反硝化损失^[21-22]。

图 3 为铵态氮与硝态氮之和在水稻土剖面中的分布。从中看出,对照区(图 3A)剖面中的氮素基本上均匀分布在 0—200 cm 之间,没有累积峰值。施肥区(图 3B)剖面中的氮素主要分布在 0—20 cm 表

层,但含量在不断下降,由 1 月 7 日的 $N\ 111\ kg/hm^2$ 下降到 3 月 5 日的 $N\ 94\ kg/hm^2$ 和 6 月 14 日的 $N\ 57\ kg/hm^2$ 。

水稻土上,小麦/水稻不同生长时间内,施肥区 0—100 cm 的氮素累积量占到 0—200 cm 累积总量的 60%—75%,100—200 cm 占到 25%—40%;而且也未发现氮素在土壤剖面中累积峰值的移动迹象(表 3)。可见,在下层含水量高的水稻土中,水分与硝酸盐是难以向下移动的,加上在水稻生长期间土壤一直淹水,即使在小麦生长期,深层土壤含水量仍很高,致使水分和硝酸盐难以下渗。

2.4 硝酸盐累积与土壤质地的关系

对表 2 不同土壤类型的各种粒级含量进行方差分析结果表明,黄绵土、塿土与水稻土的砂粒、粉粒与粘粒含量差异均达极显著水平($P < 0.01$)(见表 4),说明这 3 种土壤质地有着本质的区别。对这 3 种土壤剖面各层段硝酸盐含量的方差分析结果表明(见表 4),0—100 cm 与 100—200 cm 的硝酸盐差异均

不显著,200—400cm 差异达极显著。又经多重比较(结果略),黄绵土与瘠土相比,硝酸盐累积量在0—100 cm 差异达显著水平($p < 0.05$),200—400 cm 达极显著水平($P < 0.01$)。黄绵土0—100 cm 的硝酸盐可以淋溶至200—400 cm;而瘠土剖面中的硝酸盐则多在0—100 cm 累积,难以向下淋溶,200—400 cm 的累积量很少(图1、图2)。黄绵土与水稻土0—

100 cm 的硝酸盐累积量差异不显著,说明在这2种土壤中,硝酸盐都有可能在0—100 cm 的土壤剖面中累积,但向下淋移与累积的程度不同,这在各自剖面的硝酸盐累积曲线中可以明显地看到(图1、图3)。当然水稻土剖面中基本上没有氮素累积,这与水稻期间淹水以及氮素的反硝化损失有关^[21-22]。

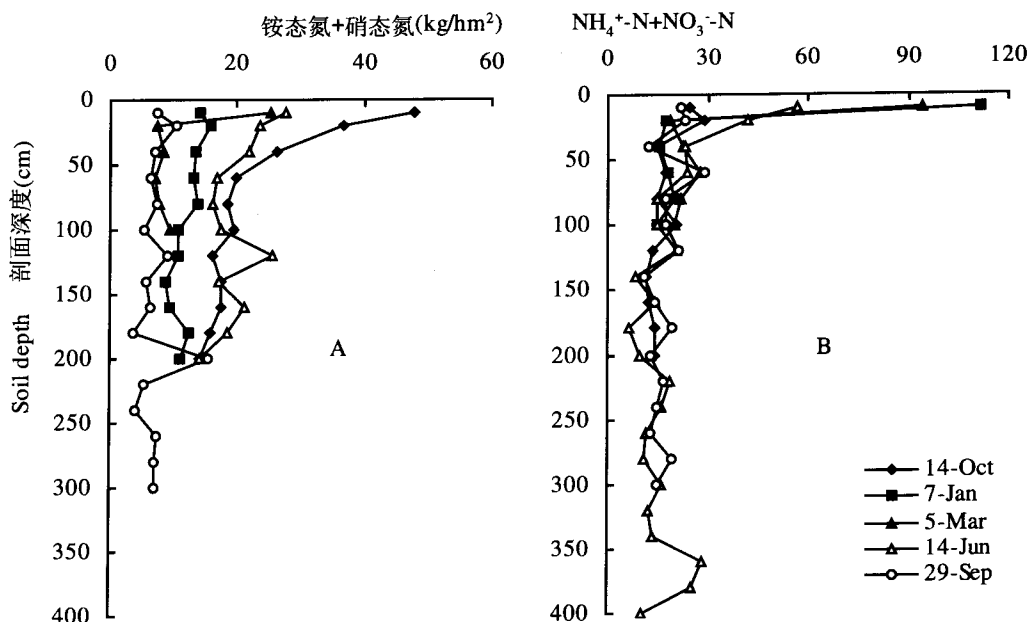


图3 不同时期内硝酸盐在陕南水稻土剖面中的分布(A:CK,B:N)

Fig.3 Nitrate distribution in Paddy soil profile in different time in Hanzhong City, south Shaanxi (A:CK, B: N)

表4 陕西3种土壤质地、硝酸盐含量之间的方差分析结果

Table 4 Significance analysis of variance in soil texture and nitrate content in 3 soil types in Shaanxi.

变量 Variance	自由度 df	F 值 F value	差异显著性 Significance
土壤质地 Soil texture	2	615.93**	0.000
	2	417.33**	0.000
	2	93.47**	0.000
剖面硝酸盐含量 Nitrate content in profile	2	3.710	0.056
	2	2.332	0.139
	2	22.69**	0.000

** : 表明差异达及显著水平。Difference is significantly.

3 小结

由于3种土壤粘粒含量差异达极显著水平和水稻土地下水位高以及上层的土壤含水量高,影响了硝酸盐向下淋移与累积的程度。黄绵土粘粒含量低,土体疏松,硝酸盐可不断地向下淋移,施肥后一年内硝酸盐分布在130—350 cm 的剖面层次中,60%以上的硝酸盐不能被作物利用(200 cm 以下)。

瘠土剖面中,在80—120 cm 有一粘化层存在,阻碍了硝酸盐向深层淋移,硝酸盐在100 cm 以上土层的累积量占到0—400 cm 总累积量的64%—74%,而200—400 cm 仅占到7%—13%,80 cm 以下土层硝酸盐的损失可能与反硝化作用有关。水稻土20 cm 以下土层基本上不存在氮素累积,加上深层土壤的含水量高,硝酸盐难以淋溶,主要累积在0—20 cm 的土壤表层。

参考文献:

- [1] Carlson D J, Shapiro F C. Methemoglobinemia from well water nitrates: A complication of home dialysis[J]. *Annals of Internal Medicine*. 1970, 73: 757-759.
- [2] Carlo E. The health scientist survey: Identifying consensus on assessing human health risk[M]. Washington, DC: Health and Environmental Sciences Group., 1992.
- [3] Mirvish S S. The etiology of gastric cancer: Intra-gastric nitrosamide, formation and other theories[J]. *Journal of the National Cancer Institute*, 1983, 71(3): 631-647.
- [4] Rejesus R M, Hornbaker R H. Economic and environmental evaluation of alternative pollution-reducing nitrogen management practices in central Illinois[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 75: 41-53.
- [5] Hallberg F. Agrichemicals and water quality[A]. Board of Agriculture, National Research Council. edit. Proc. Colloquium on Agrichemical Management to protect water quality[C]. Washington: DC, 1986.
- [6] 谢建昌. 世界肥料使用的现状与前景[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 321-330.
- Xie J C. Situation and prospects of the fertilizer use in the world[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4): 321-330.
- [7] 同延安, Ove Emteryd, 张树兰, 梁东丽. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1239-1244.
- Tong Y A, Emteryd O, Zhang S L, Liang D L. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in Shaanxi province, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1239-1244.
- [8] 吕殿青, 同延安, 孙本华, Ove Emteryd. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 8-15.
- Lü D Q, Tong Y A, Sun B H, Emteryd O. Effects of nitrogen fertilizer use on environmental pollution[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1998, 4(1): 8-15.
- [9] 邢文英. 我国肥料使用中存在的主要问题及对策[A]. 中国土壤学会主编. 迈向 21 世纪的土壤科学—中国土壤学会第九次全国会员代表大会论文集综合卷[C]. 江苏南京: 1999. 39-42.
- Xing W Y. Problems and measurements on the fertilizer utilization in China[A]. Chinese Assoc. of Soil Sciences. Soil Sciences in 21 century Ninth Conf. of Chinese Assoc. of Soil Sciences[C], Nanjing, Jiangsu: 1999. 39-42.
- [10] Fan J, Hao M D, Shao M A. Nitrate accumulation in soil profile of dry land farming in northwest China[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(4): 367-374.
- [11] Spalding R F, Darrell G W, James S S *et al.* Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture[J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30: 1184-1194.
- [12] Trindade H, Coutinho J, Van Beusichem M L *et al.* Nitrate leaching from sandy loam soils under a double-cropping forage system estimated from suction-probe measurements[J]. *Plant Soil*, 1997, 195: 247-256.
- [13] Shrestha R, Ladha J. Nitrate in groundwater and integration of nitrogen-catch crop in rice-sweet pepper cropping system[J]. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 1998, 63(6): 1610-1619.
- [14] Tong Y A, Emteryd O, Lü D Q, Grip H. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eumorphic anthrosols profile[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48: 225-229.
- [15] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 125-140.
- Guo Z Y, Huang Z L, Feng L X. Shaanxi soil[M]. Beijing: Science Press, 1992. 125-140.
- [16] Emteryd O. Chemical and physical analysis of inorganic nutrients in plant, soil, water and air (Stencil No. 10) [M]. Sweden: Swedish Univ of Agric Sci, Uppsala, 1989.
- [17] 同延安, Ove Emteryd, 吕殿青, Harald Grip. 黄绵土与黄泥巴的硝化作用及氮损失与铵固定[J]. *西北农业学报*, 1999, 8(6): 58-64.
- Tong Y A, Emteryd O, Lü D Q, Grip H. Nitrification, NH_4^+ -Fixation and N loss in an Entisol and a Luvisol[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1999, 8(6): 65-68.
- [18] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd. 黄土性土壤剖面中 N_2O 气态损失的研究初报[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 802-809.
- Liang D L, Tong Y A, Emteryd O. In situ measurements of N_2O emissions from a loess soil profile[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 802-809.
- [19] 梁东丽, 同延安, Emteryd O, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 298-302.
- Liang D L, Tong Y A, Emteryd O *et al.* Effect of irrigation and rainfall on the N_2O losses in dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 298-302.
- [20] Tong Y A, Emteryd O, Grip H, Lü D Q. Soil NH_4^+ fixation and fertilizer N recovery as affected by soil moisture and fertilizer application methods[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(2): 247-252.
- [21] Cai G X, Cao Y C, Yang N C. Direct estimation of nitrogen gases emitted from flooded soils during denitrification of applied nitrogen[J]. *Pedosphere*, 1991, 1(3): 241-251.
- [22] Cai G X, Yang N C, Lu W F *et al.* Gaseous loss of N from fertilizer applied to a paddy soil in south-eastern China[J]. *Pedosphere*, 1992, 2: 209-217.