

水氮量对层状包气带土壤氮素迁移累积的影响分析*

商放泽 杨培岭 任树梅

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用田间小区试验,研究夏玉米/冬小麦轮作期间不同水氮处理对0~450 cm 土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和总 N 迁移累积的影响。结果表明,层状包气带土壤的质地和结构对水分、 NO_3^- -N 和总 N 在土层中的分布均有显著影响,而土壤结构只对 NH_4^+ -N 有显著影响。不同水氮处理对土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和总 N 的直接影响深度分别为 400、200 和 120 cm,间接影响深度都为 400 cm。单次灌水量 52.5 mm、单次施氮量 195 kg/hm² 的处理土壤 NO_3^- -N 在 0~250 cm 土层发生明显的迁移现象;而单次灌水量 105 mm、单次施氮量大于等于 130 kg/hm² 的处理在 0~400 cm 土层发生明显的迁移现象。对于“壤土-砂土-壤土”结构的包气带土壤,土壤中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和总 N 质量比从大到小为:380~450 cm 壤土土层、0~120 cm 壤土土层、120~380 cm 砂土土层、380~450 cm 特殊的壤土土层对水分和氮素的迁移起到了阻碍作用。建议当地种植夏玉米/冬小麦期间,单次灌水量为 52.5 mm、施氮量为 65 kg/hm²。

关键词: 施氮量 灌水量 硝态氮 铵态氮 总氮 迁移累积

中图分类号: S152.4; S154.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0112-10

Effects of Nitrogen Fertilizer Application and Irrigation Level on Soil Nitrogen Leaching and Accumulation in Deep Soil

Shang Fangze Yang Peiling Ren Shumei

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the field plot experiments of four chemical N application rates (0, 65, 130 and 195 kg/hm²) and two irrigation levels (52.5 and 105 mm) applied to summer maize and winter wheat growing, the NO_3^- -N, NH_4^+ -N and total nitrogen migration and accumulation in the first 450 cm depth of layered soils for each treatment were studied. The results showed that the soil texture and structure had a significant effect on soil moisture, NO_3^- -N and total nitrogen content and distribution in soil profile, and soil structure had a significant effect on soil NH_4^+ -N content and distribution in soil profile. Fertilization and irrigation had different influence depth on soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N and total nitrogen, and the direct influence depth was 400, 200 and 120 cm, respectively, while the indirect influence depth was 400 cm for all. Soil NO_3^- -N in the treatments that irrigation level was 52.5 mm and nitrogen application rate was 195 kg/hm², and irrigation level was 105 mm and nitrogen application rate greater than or equal to 130 kg/hm² had obvious phenomenon of migration, and the migration depth was 250 and 400 cm, respectively. For the 0~450 cm layered soils that had a loam, sandy soil and loam layer from top to bottom, the average soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N and total nitrogen content were all in the following descending order: 380~450 cm loam layer, 0~120 cm loam layer, and 120~380 cm sandy soil layer. The special 380~450 cm loam layer blocked the migration of water and nitrogen. It was advised to use an irrigation level of 52.5 mm and nitrogen application rate of 65 kg/hm² at a single time in growing summer maize and winter wheat in southeast agricultural region of Beijing.

Key words: Nitrogen application rate Irrigation level NO_3^- -N NH_4^+ -N Total nitrogen Migration and accumulation

收稿日期: 2013-04-16 修回日期: 2013-04-27

* 国家自然科学基金资助项目(51279204)和水利部公益性行业科研专项资助项目(201101051)

作者简介: 商放泽, 博士生, 主要从事水土资源与环境研究, E-mail: shangfangze@126.com

通讯作者: 杨培岭, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境、灌溉理论与技术研究, E-mail: yang-pl@163.com

引言

氮素是作物需求量最大的营养元素之一,但是过量施氮肥不仅降低了氮肥利用效率^[1],而且使土壤中氮素发生迁移和累积^[2],最终进入地下水。世界上 68% 的淡水以地下水的形式存在,1/3 的人口以地下水作为饮用水^[3],但农业生产中质量分数约 30% ~ 50% 的氮肥进入地下水^[4],许多国家地下水中 NO₃⁻-N 浓度有逐年增加的趋势^[5]。长期饮用 NO₃⁻-N 浓度较大的水后,会引起白血病、儿童“蓝婴病”、成人胃癌和直肠癌等诸多疾病^[6-7],NO₃⁻-N 对地下水的污染和对人体健康的危害引起了国内外学者的广泛关注,并在室内和田间对氮素污染问题进行了大量研究^[8-10]。氮素在土壤中的累积是发生淋洗的首要条件,而水分是氮素迁移的载体,施肥、灌水和降水是氮素迁移的主要影响因素^[11-13]。NO₃⁻-N 带负电,容易发生迁移;NH₄⁺-N 能通过反硝化作用转化为 NO₃⁻-N;总 N 中的有机态氮也能矿化为 NO₃⁻-N,因此,研究土壤中 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 的迁移累积具有重要意义。

国内外文献大多研究了深度 200 cm 以内土壤

中 NO₃⁻-N 的淋洗和迁移,但对 NO₃⁻-N 在深层包气带中迁移转化的探讨较少^[14-16];对 NO₃⁻-N 的研究较多,但对 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 的协同研究较少^[17-19]。北京市 70% 的用水来自地下水^[20],而冲积平原东南郊地区形成了特殊的层状包气带土壤,但目前对氮素在深层层状包气带土壤中的迁移规律的研究较少。针对以上特点,本研究旨在了解夏玉米/冬小麦轮作期间不同水氮处理对 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 在 0 ~ 450 cm 土层中的迁移累积的影响,揭示氮素在层状包气带土壤中的运移规律,同时为降低氮素对地下水的污染风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验在北京市水科学技术研究院农业节水中心试验站进行。田间观测与实验室分析相结合,将深度 0 ~ 450 cm 土壤分为 12 层。部分包气带土壤物理特性如表 1 所示,其中田间持水率和饱和含水率是在 105℃ 干燥后蒸发的水的质量与干土质量的比值,其他详见文献[21]。土壤养分如表 2 所示。

表 1 0 ~ 450 cm 包气带土壤物理性质
Tab.1 Physical properties of 0 ~ 450 cm deep vadose zone soils

物理特性	土层深度/cm											
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 120	120 ~ 160	160 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	300 ~ 350	350 ~ 380	380 ~ 400	400 ~ 450
pH 值	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	8.8	8.9	8.8	8.9	8.9	8.4	8.5
干容积密度/g·cm ⁻³	1.36	1.60	1.39	1.40	1.45	1.50	1.50	1.50	1.50	1.48	1.62	1.70
田间持水率/%	21.91	21.00	18.42	22.14	14.56	14.56	14.56	14.56	13.93	13.93	23.88	24.69
饱和含水率/%	31.54	30.38	30.94	34.36	26.32	26.32	26.32	26.32	26.04	26.04	48.00	42.56
饱和导水率/cm·d ⁻¹	15.55	12.31	12.55	20.98	125.78	120.91	155.63	155.63	155.63	155.63	6.45	4.26

表 2 0 ~ 450 cm 包气带土壤养分
Tab.2 Soil nutrients content in 0 ~ 450 cm deep vadose zone soils

养分	土层深度/cm											
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 120	120 ~ 160	160 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	300 ~ 350	350 ~ 380	380 ~ 400	400 ~ 450
有效磷含量/mg·kg ⁻¹	22.85	50.90	9.03	2.47	2.21	0.90	1.06	0.66	0.80	1.46	13.60	8.99
速效钾含量/mg·kg ⁻¹	103.27	94.33	70.07	40.72	16.88	18.29	18.23	21.48	20.73	23.17	277.13	244.17
有机质含量/g·kg ⁻¹	12.32	12.19	6.57	4.17	0.72	0.73	0.86	0.82	0.83	1.16	19.71	19.15

1.2 试验设计

试验供试夏玉米为纪元 1 号,2011 年 7 月 5 日人工播种,2011 年 10 月 17 日收获,行距 55 cm,株距 25 cm,生育期 104 d,夏玉米播种前施过磷酸钙(P₂O₅施用量 65 kg/hm²)和氯化钾(K₂O 施用量 65 kg/hm²)。供试冬小麦为京旺 10 号,2011 年 10 月 20 日人工播种,2012 年 6 月 24 日收获,行距 15 cm,生育期 244 d,冬小麦播种前施过磷酸钙(P₂O₅施用

量 65 kg/hm²),试验区包气带土壤结构示意图如图 1 所示。试验设置 6 个处理,每个处理 3 个重复,共有 18 个小区,随机排列,每个小区面积 4 m × 5 m,同时用宽 25 cm、高 65 cm 的土埂围住,小区之间有 2 m 的隔离带。设置的 6 个处理分别记为 N0W1、N1W1、N2W1、N3W1、N2W2 和 N3W2,其中 N0、N1、N2、N3 分别表示每次追施纯氮量为 0、65、130 和 195 kg/hm²;W1、W2 分别表示每次灌水量为 52.5 和

105 mm。其中灌水量 105 mm、施氮量 130 kg/hm² 的 N2W2 处理为东南郊地区传统灌水量和习惯施氮量。氮肥选用尿素(氧素质量分数 47%),灌溉水选用地下水,灌水方式为沟灌。试验期间降水量如表 3 所示,施肥和灌水时间如表 4 所示,试验期间总水量如表 5 所示,总水量为降水量与灌水量之和^[21]。

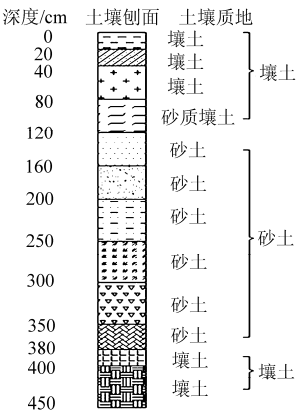


图 1 试验区土壤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of vadose zone soils in study area

表 3 试验期间降水量

Tab.3 Rainfall distribution during test			
日期	降水量 /mm	日期	降水量 /mm
2011-07-07	14.0	2011-08-24	9.5
2011-07-15	41.2	2011-09-01	3.1
2011-07-17	23.7	2011-09-08	1.4
2011-07-20	5.0	2011-09-10	5.9
2011-07-21	23.0	2011-09-16	7.2
2011-07-24	68.9	2011-09-17	1.0
2011-07-27	6.8	2011-10-13	15.1
2011-07-29	1.6	2011-10-14	1.6
2011-07-30	73.2	2012-04-19	21.8
2011-08-07	1.6	2012-04-24	39.3
2011-08-09	62.4	2012-05-20	2.3
2011-08-13	1.2	2012-06-03	1.8
2011-08-14	0.6	2012-06-06	2.1
2011-08-15	11.2	2012-06-21	10.1
2011-08-16	27.5	2012-06-22	5.0

表 4 施肥和灌水时间

Tab.4 Fertilizer and irrigation schedule		
日期	施肥情况	灌水情况
2011-07-21	夏玉米第 1 次追肥	
2011-07-26		夏玉米第 1 次灌水
2011-08-30	夏玉米第 2 次追肥	
2011-09-02		夏玉米第 2 次灌水
2011-09-22		夏玉米第 3 次灌水
2011-10-24		冬小麦第 1 次灌水
2012-04-11	冬小麦第 1 次追肥	冬小麦第 2 次灌水
2012-05-12	冬小麦第 2 次追肥	冬小麦第 3 次灌水
2012-05-29		冬小麦第 4 次灌水

表 5 2 种灌水处理的总水量
Tab.5 Rainfall, frequency of irrigation and total water during test

日期	降水量 /mm	灌水 次数	总水量/mm	
			W1 处理	W2 处理
2011-07-04~2011-08-08	259.0	1	311.5	364.0
2011-08-09~2011-08-29	112.4	0	112.4	112.4
2011-08-30~2011-09-20	18.6	1	71.1	123.6
2011-09-21~2011-10-17	16.7	1	69.2	121.7
2011-10-18~2011-11-20	0	1	52.5	105.0
2011-11-21~2012-04-10	0	0	0	0
2012-04-11~2012-05-11	61.1	1	113.6	166.1
2012-05-12~2012-06-24	21.3	2	126.3	231.3

1.3 样品取样和测定方法

于 2011 年 7 月 4 日第 1 次(试验前)、2011 年 8 月 8 日第 2 次(夏玉米拔节期)、2011 年 8 月 29 日第 3 次(夏玉米抽雄期)、2011 年 9 月 20 日第 4 次(夏玉米灌浆期)、2011 年 10 月 17 日第 5 次(夏玉米收获)、2011 年 11 月 20 日第 6 次(冬小麦越冬前)、2012 年 4 月 10 日第 7 次(冬小麦拔节期)、2012 年 5 月 11 日第 8 次(冬小麦灌浆期)和 2012 年 6 月 24 日第 9 次(冬小麦收获)采集土壤样品,共分为 0~20、20~40、40~80、80~120、120~160、160~200、200~250、250~300、300~350、350~380、380~400 和 400~450 cm 共 12 层进行采样,在夏玉米和冬小麦收获时测产。土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量利用紫外分光光度计测定,总 N 根据半微量凯式法测定。

用 Sigmaplot 10.0 软件、Excel 2007 软件和 SPSS 17.0 软件作图和分析数据。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量对包气带土壤质量含水率的影响

水分是氮素迁移的载体,土壤水分的下渗与氮素的迁移转化密切相关。不同灌水量处理土壤中质量含水率的变化如图 2 所示。包气带土壤 0~120 cm 为壤土,120~380 cm 为砂土,380~450 cm 为壤土,形成“壤土-砂土-壤土”的层状包气带结构,这是因为试验地点通州区为永定河和潮白河冲积平原,容易产生不同质地的土壤分层叠加的现象,与此相对应,包气带土壤中含水率呈“高-低-高”分布。从图 2 和表 5 可知,第 1 次至第 5 次取样期间(夏玉米生育期),该时期总降水量为 406.7 mm,占全年降水量的 83.2%,同时有 3 次灌水,W1 和 W2 处理总水量分别达到了 564.2 和 721.7 mm,导致包气带土壤含水率逐渐增加,与第 1 次取样相比,第 5 次取样的 W1 和 W2 处理在 380~400 cm 土层的质量含水

率分别增加了 9.99% 和 12.36%，而在 400 ~ 450 cm 土层分别增加了 10.85% 和 13.07%，说明水分运移到了 380 ~ 450 cm 土层。夏玉米生育期间，除 40 ~ 80 和 380 ~ 450 cm 土层质量含水率有明显增加外，其他土层质量含水率波动变化但增加不明显，因为表层土壤水分容易蒸发损失以及被

夏玉米根系吸收，而 120 cm 以下砂土导水率大，持水能力较差。第 5 次至第 9 次取样期间（冬小麦生育期），总降水量只有 82.4 mm，但第 7 次至第 9 次取样期间的 3 次灌水引起了 0 ~ 120 cm 土层质量含水率的增加，并在 80 ~ 120 cm 土层出现峰值。

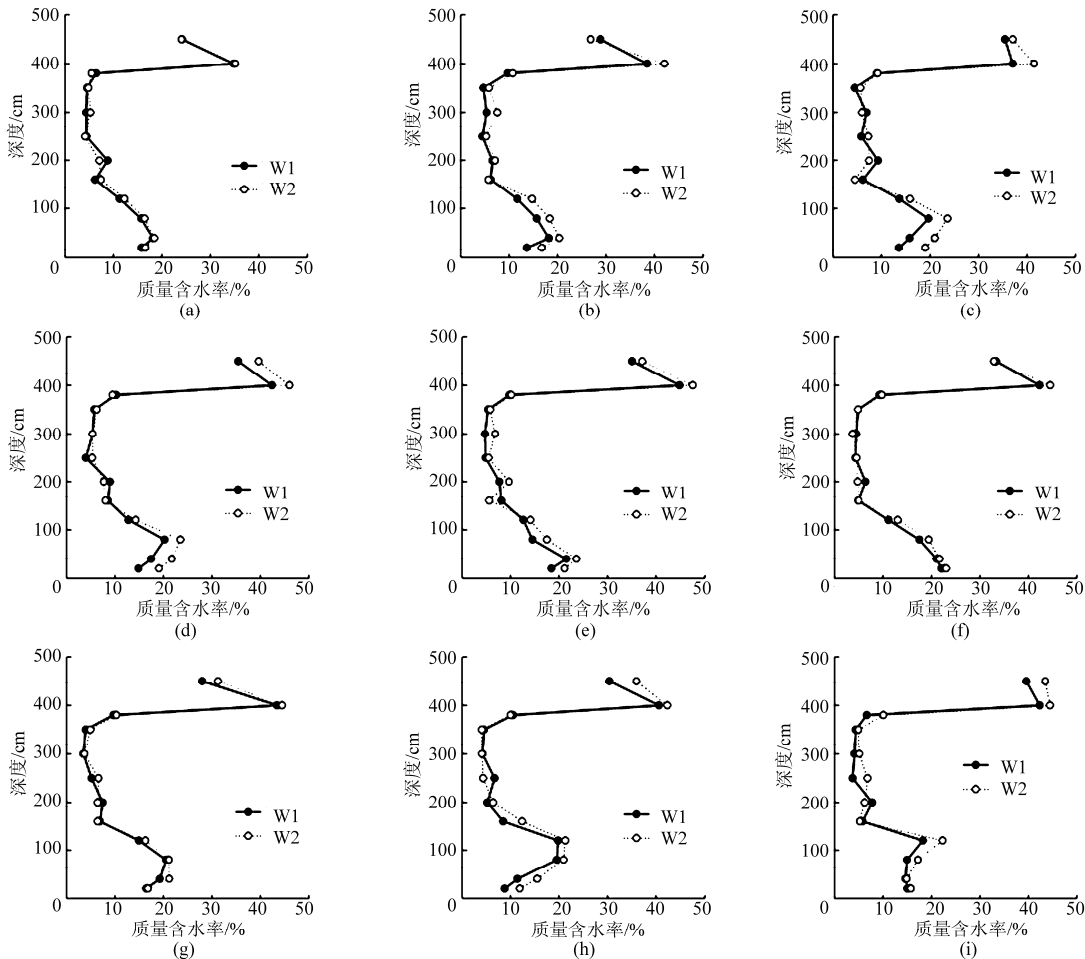


图 2 不同灌水量对包气带土壤质量含水率的影响

Fig. 2 Effect of irrigation level on soil moisture content in vadose zone soils

(a) 第 1 次取样 (b) 第 2 次取样 (c) 第 3 次取样 (d) 第 4 次取样 (e) 第 5 次取样
(f) 第 6 次取样 (g) 第 7 次取样 (h) 第 8 次取样 (i) 第 9 次取样

试验期间土壤质地和结构影响土壤水分的分布，土壤质量含水率在 40 ~ 80、80 ~ 120 和 380 ~ 450 cm 壤土土层中较高，在砂土土层中较低。灌水量越多，包气带土壤质量含水率也越高，夏玉米生育期间土壤质量含水率的变幅大于冬小麦生育期间。380 ~ 450 cm 壤土土层阻碍了水分的下渗。

2.2 不同水氮处理对层状包气带土壤 NO_3^- -N 迁移累积的影响

不同水氮处理对土壤 NO_3^- -N 的影响如图 3 所示， NO_3^- -N 质量比在 0 ~ 50 mg/kg 之间。夏玉米生育期间，灌水量为 105 mm（传统灌水量）的 N2W2 和 N3W2 处理由于降水和 3 次灌水使 NO_3^- -N 随水分发生迁移淋洗，土壤 NO_3^- -N 质量比在 0 ~ 20、80 ~

120、380 ~ 400 cm 壤土土层较高，在 160 ~ 200 和 250 ~ 300 cm 砂土土层也相对较高，因为撒施尿素后，部分氮素会停留在 0 ~ 20 cm 表层土壤；而从图 3 知，壤土和砂土交界层容易使土壤水分滞留，没有水分的下渗， NO_3^- -N 也很难发生迁移；至于砂土中增加的 NO_3^- -N，是由于非连续的降水和灌水使水分只能到达该层， NO_3^- -N 不能继续下移。N3W1 处理 NO_3^- -N 在 0 ~ 250 cm 土层发生迁移，而 N0W1、N1W1 和 N2W1 处理无明显的迁移现象，表明对于灌水量 52.5 mm、施氮量小于等于 130 kg/hm²（习惯施氮量）的处理，夏玉米根系吸收了大部分的水分和养分。冬小麦生育期间，同样只有 N3W1、N2W2 和 N3W2 处理发生明显的迁移和累积，而且主要发

生在 0 ~ 120 cm 土层,虽然冬小麦生育期间灌水 4 次,但降水量很少,水分非连续入渗的频率大幅降低,减少了水分运载 NO_3^- -N 并不断向下层土壤迁移的能力。根据图 3 中 NO_3^- -N 累积峰位置、追肥时间和取样时间估算 NO_3^- -N 的迁移速度,夏玉米生育期间,N3W2 和 N2W2 处理 NO_3^- -N 迁移至 400 cm 深,分别用时 38 d 和 86 d, NO_3^- -N 迁移速度分别为 10.53 和 4.65 cm/d,N3W1 处理迁移至 250 cm 深,用时 60 d, NO_3^- -N 迁移速度为 4.17 cm/d,灌水量和施氮量越大, NO_3^- -N 迁移深度越深,迁移速度也越快。

不同水氮处理土壤中 NO_3^- -N 的累积量如表 6 所示。0 ~ 120 cm 土层中,N0W1 处理 NO_3^- -N 损失,其他处理 NO_3^- -N 累积量随施氮量的增加而增加,表明施氮肥使 0 ~ 120 cm 土层 NO_3^- -N 盈余;120 ~ 380 cm 土层中,N3W1、N2W2 和 N3W2 处理累积量

相对较大,因为这 3 种处理施氮量和灌水量较大;380 ~ 450 cm 土层中, NO_3^- -N 累积量从大到小为: N3W2、N2W2、N3W1、N2W1、N1W1、N0W1,说明水氮处理对 NO_3^- -N 的影响深度已达 400 cm,施氮量和灌水量越大,累积量越多。9 次取样 NO_3^- -N 质量比平均值在 0 ~ 120、120 ~ 380 和 380 ~ 450 cm 土层分别为 6.40、2.71 和 12.04 mg/kg,方差分析表明不同土层中 NO_3^- -N 质量比差异显著($\alpha < 0.05$),说明土壤质地和结构影响 NO_3^- -N 的分布。

夏玉米/冬小麦轮作期间,不同水氮处理对 NO_3^- -N 的直接影响深度达 400 cm,N0W1、N1W1 和 N2W1 处理没有发生明显的迁移;N3W1 处理 NO_3^- -N 在 0 ~ 250 cm 土层迁移;N2W2 和 N3W2 处理 NO_3^- -N 在 0 ~ 400 cm 土层迁移。380 ~ 450 cm 壤土土层阻碍了 NO_3^- -N 的迁移, NO_3^- -N 在该土层大量累积。

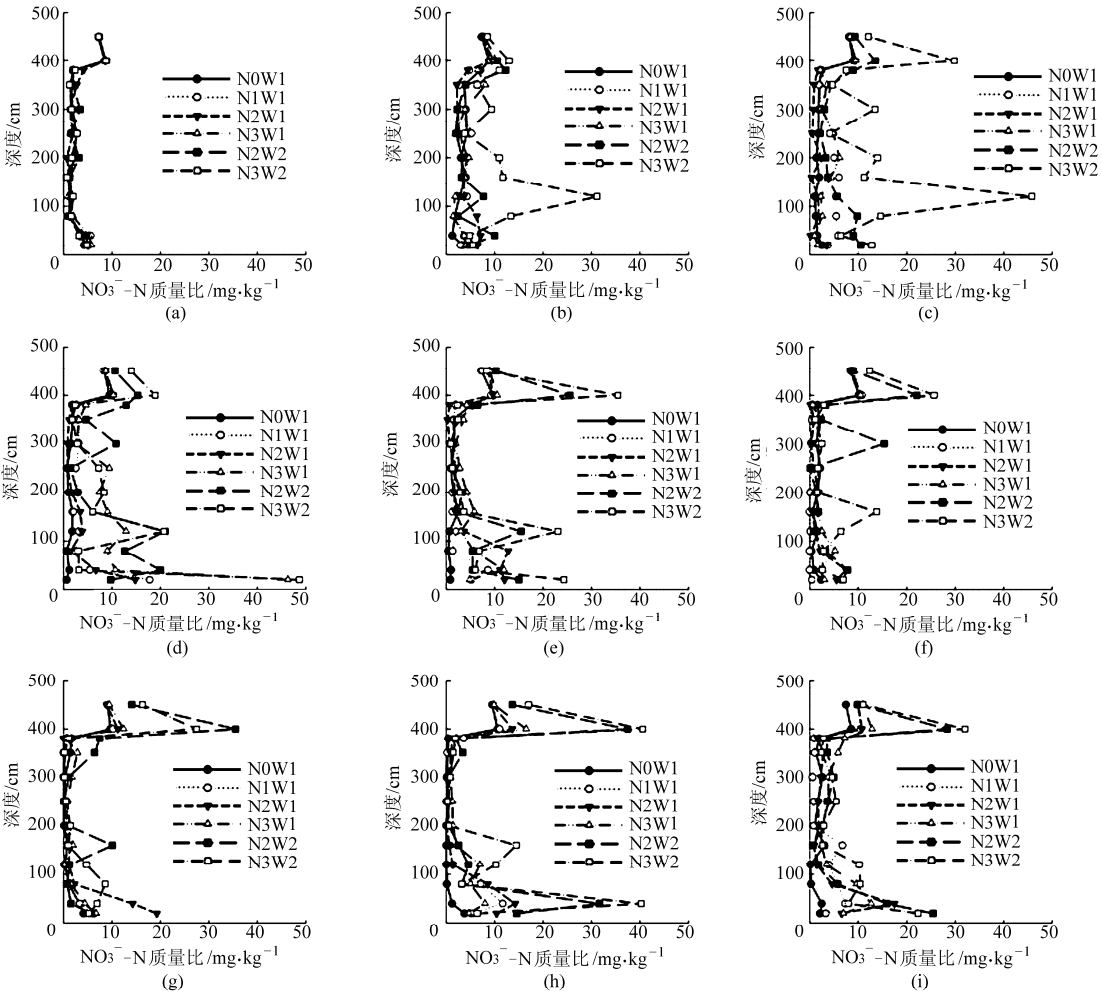


图 3 不同水氮处理对包气带土壤 NO_3^- -N 质量比的影响

Fig. 3 Effect of N-fertilizer and irrigation level on soil NO_3^- -N content in vadose zone soils

(a) 第 1 次取样 (b) 第 2 次取样 (c) 第 3 次取样 (d) 第 4 次取样 (e) 第 5 次取样
(f) 第 6 次取样 (g) 第 7 次取样 (h) 第 8 次取样 (i) 第 9 次取样

表 6 不同水氮处理对包气带土壤 NO₃⁻-N 累积量的影响

日期	N0W1			N1W1			N2W1			N3W1			N2W2			N3W2		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2011-07-04	38.78 ^a	73.08 ^a	88.74 ^a	50.27 ^a	78.25 ^a	88.94 ^a	41.88 ^a	76.22 ^a	89.30 ^a	49.10 ^a	65.71 ^a	90.40 ^a	43.65 ^a	88.27 ^a	91.03 ^a	43.51 ^a	68.46 ^a	90.44 ^a
2011-10-17	11.62 ^b	76.22 ^a	92.87 ^a	59.91 ^a	62.69 ^b	92.23 ^a	88.60 ^b	45.62 ^b	104.80 ^b	99.18 ^b	157.15 ^b	110.10 ^b	131.13 ^b	97.60 ^a	137.16 ^b	160.70 ^b	82.42 ^a	142.74 ^b
2012-06-24	16.33 ^b	76.13 ^a	91.67 ^a	86.94 ^b	67.71 ^b	117.75 ^b	108.04 ^c	76.09 ^a	120.23 ^c	132.96 ^c	163.44 ^b	135.54 ^c	127.06 ^b	130.02 ^b	175.94 ^c	156.03 ^b	139.32 ^b	197.81 ^c
累积量	-22.45	3.05	2.93	36.67	-10.54	28.81	66.16	-0.13	30.93	83.86	97.73	45.14	83.41	41.75	84.91	112.52	70.86	107.37
合计	-16.47			54.94			96.96			226.73			210.07			290.75		

注：A、B 和 C 分别代表 0 ~ 120 cm 土层、120 ~ 380 cm 土层和 380 ~ 450 cm 土层，同一列不同字母表示 α=0.05 水平上差异显著，下同。

2.3 不同水氮处理对层状包气带土壤 NH₄⁺-N 迁移累积的影响

不同水氮处理对土壤 NH₄⁺-N 的影响如图 4 所示，NH₄⁺-N 质量比在 0 ~ 5 mg/kg 之间，只有 NO₃⁻-N 的 1/10。第 1 次至第 3 次取样期间，土壤中 NH₄⁺-N 质量比最高，迁移转化较为活跃，因为该时期降水和灌水产生的总入渗水量最大、气温较高，有利于水分携带部分 NH₄⁺-N 迁移及硝化/反硝化反应的发生。

在夏玉米其他生育期和冬小麦生育期，0 ~ 380 cm 土层中 NH₄⁺-N 质量比较低并且相对稳定，因为这些时段降水量较少、气温相对较低。9 次取样期间，在 0 ~ 200 cm 土层中，施氮量和灌水量较大的 N3W1、N2W2 和 N3W2 处理 NH₄⁺-N 质量比较大，N0W1 处理最小；而在 200 ~ 380 cm 土层中，不同处理 NH₄⁺-N 质量比大小随机变化，说明不同水氮处理对 NH₄⁺-N 的影响深度主要为 200 cm。

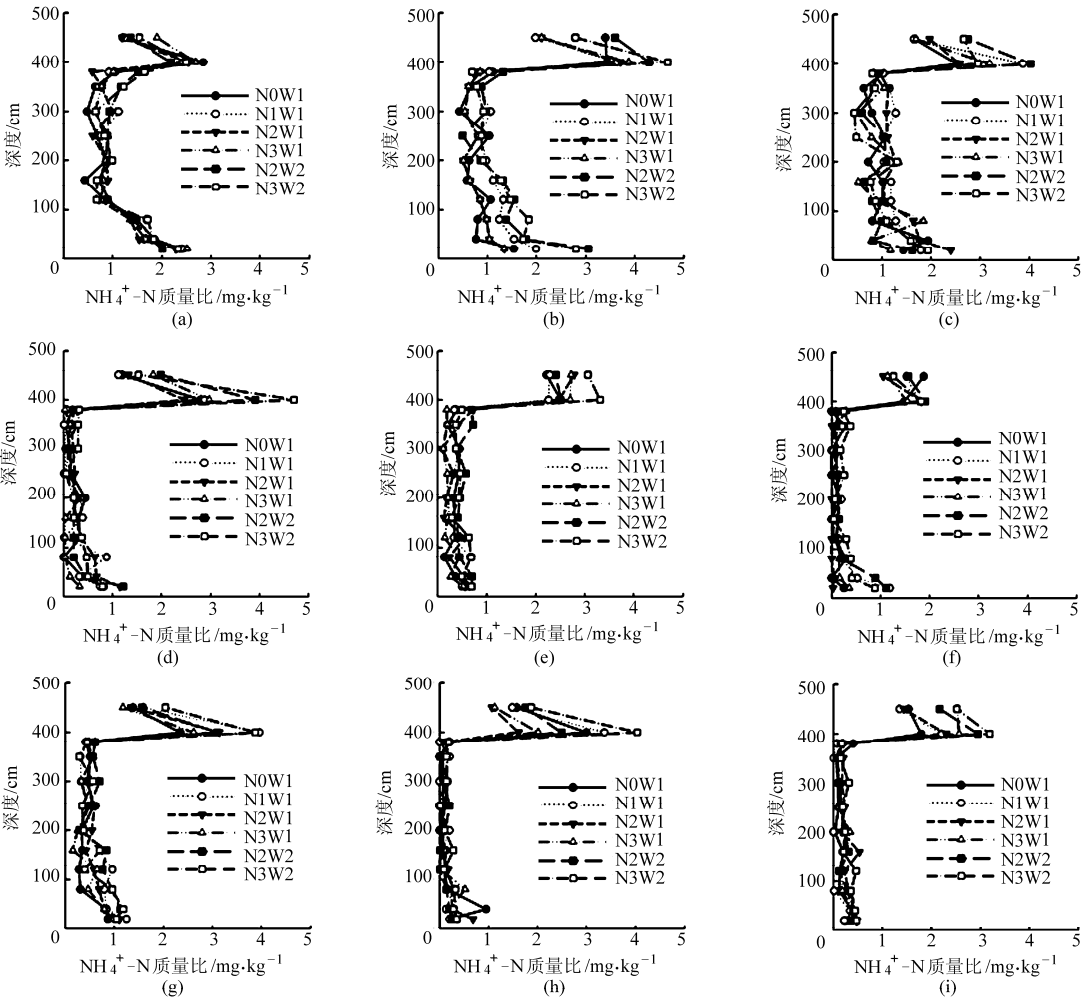


图 4 不同水氮处理对包气带土壤 NH₄⁺-N 质量比的影响

Fig. 4 Effect of N-fertilizer and irrigation level on soil NH₄⁺-N content in vadose zone soils
(a) 第 1 次取样 (b) 第 2 次取样 (c) 第 3 次取样 (d) 第 4 次取样 (e) 第 5 次取样
(f) 第 6 次取样 (g) 第 7 次取样 (h) 第 8 次取样 (i) 第 9 次取样

不同水氮处理土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的累积量见表 7。0 ~ 120 cm 土层中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能被作物根系直接吸收利用, 随着作物生育期推进, 根系不断吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 导致所有处理中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失; 120 ~ 380 cm 土层中, 砂土粘粒和土壤胶体含量都较低, 砂土中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不易被吸附, 同时砂土含水率较低, 孔隙大, 有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化反应的发生, 120 ~ 380 cm 土层中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失; 380 ~ 450 cm 土层中, 除 N0W1 处理外, 其他处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积, 因为 380 ~ 400 cm 土层含水率基本达到饱和状态, 在厌氧条件下, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 容易发生反硝化反应, 进而增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 由于该层土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积量受到灌水和施氮量的影响, 而土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的累积量表现出随施氮量和灌

水量增加而增大的现象, 表明水氮处理对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响间接影响了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。9 次取样 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比平均值在 0 ~ 120、120 ~ 380 和 380 ~ 450 cm 土层分别为 0.78、0.45 和 2.40 mg/kg, 方差分析表明 380 ~ 450 cm 土层 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比与其他 2 个土层差异显著 ($\alpha < 0.05$), 说明土壤结构影响 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤中的分布。

夏玉米/冬小麦轮作期间, 不同水氮处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的直接影响深度为 200 cm, 间接影响深度为 400 cm。在 0 ~ 200 cm 土层中, 施氮量和灌水量的增加引起土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的增加。380 ~ 450 cm 壤土土层阻碍了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的迁移, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在该土层大量累积。

表 7 不同水氮处理对包气带土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积量的影响

Tab. 7 Effect of N-fertilizer and irrigation level on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ accumulation in vadose zone soils kg/hm²

日期	N0W1			N1W1			N2W1			N3W1			N2W2			N3W2		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2011-07-04	25.32 ^a	25.80 ^a	19.40 ^a	25.43 ^a	33.36 ^a	18.37 ^a	22.69 ^a	30.63 ^a	18.34 ^a	24.78 ^a	31.15 ^a	24.86 ^a	23.97 ^a	38.93 ^a	18.62 ^a	25.44 ^a	37.42 ^a	21.16 ^a
2011-10-17	5.50 ^b	13.70 ^b	27.00 ^b	8.66 ^b	12.16 ^b	26.76 ^b	7.54 ^b	11.28 ^b	31.64 ^b	5.46 ^b	6.98 ^b	31.87 ^b	8.85 ^b	20.80 ^b	28.62 ^b	10.79 ^b	15.4 ^b	36.79 ^b
2012-06-24	3.37 ^b	5.110 ^c	18.84 ^a	2.99 ^c	3.25 ^c	19.69 ^a	5.70 ^b	9.52 ^b	20.24 ^a	4.33 ^b	6.83 ^b	29.78 ^b	4.50 ^c	6.36 ^c	28.03 ^b	7.32 ^b	8.29 ^c	31.76 ^b
累积量	-21.95	-20.69	-0.56	-22.44	-30.11	1.32	-16.99	-21.11	1.90	-20.45	-24.32	4.92	-19.47	-32.57	9.41	-18.12	-29.13	10.60
合计	-43.20			-51.23			-36.20			-39.85			-42.63			-36.65		

2.4 不同水氮处理对层状包气带土壤总 N 迁移累积的影响

不同水氮处理对土壤总 N 的影响如图 5 所示, 总 N 质量比在 0 ~ 1 600 mg/kg 之间。夏玉米和冬小麦生育期间, 总 N 在包气带中的分布规律非常一致, 总 N 中 95% 以上是有机态氮, 其主要来源是土壤有机质, 0 ~ 120 cm 壤土土层有机质含量较多 (表 2), 并随深度增加而减小, 因此总 N 质量比也随深度增加而减少; 120 ~ 380 cm 砂土土层有机质含量最少, 因此该土层总 N 质量比最小; 380 ~ 450 cm 壤土土层有机质含量较多, 总 N 质量比较大, 总 N 在 380 ~ 400 cm 土层出现峰值。在 0 ~ 120 cm 土层中, 不同水氮处理总 N 质量比从大到小为: N3W1、N2W2 和 N3W1 处理, 并且都大于 N2W1 和 N1W1 处理, N0W1 处理最小, 说明施氮量和灌水量越大, 0 ~ 120 cm 土层中总 N 越多。120 ~ 380 cm 土层总 N 质量比的大小随机变化, 说明不同水氮处理对总 N 的影响深度为 120 cm。

不同水氮处理土壤中总 N 的累积量如表 8 所示。0 ~ 120 cm 土层中, 除施氮量最多的 N3W1 和 N3W2 处理总 N 有累积外, 其他处理土壤中总 N 损

失, 因为该深度是作物根系主要的分布区域, 作物对无机态氮的不断吸收刺激总 N 发生矿化作用, 产生的无机态氮不断被作物吸收, 同时总 N 可能发生的淋溶损失、气态损失和硝化/反硝化损失等共同导致土壤总 N 减少; 380 ~ 450 cm 土层中, 总 N 的增加主要是无机态氮增加和不同形态氮素发生物理、化学和生物反应的结果, 与不同水氮处理对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响类似, 该层土壤中灌水和施氮处理引起的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的增加间接导致总 N 的增加。9 次取样总 N 质量比平均值在 0 ~ 120、120 ~ 380 和 380 ~ 450 cm 土层分别为 682.00、233.76 和 1 094.89 mg/kg, 方差分析表明不同土层中总 N 质量比差异显著 ($\alpha < 0.05$), 说明土壤质地和结构影响总 N 在土壤中的分布。

夏玉米/冬小麦轮作期间, 不同水氮处理对总 N 的直接影响深度为 120 cm, 间接影响深度为 400 cm, 施氮量和灌水量的增加有利于土壤中总 N 的增加, 但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比范围之和不到总 N 质量分数范围的 5%, 总 N 变化幅度较小, 施无机氮肥和灌水对土壤总 N 的影响有限。整个试验期间, 土壤总 N 在 380 ~ 450 cm 土层大量累积。

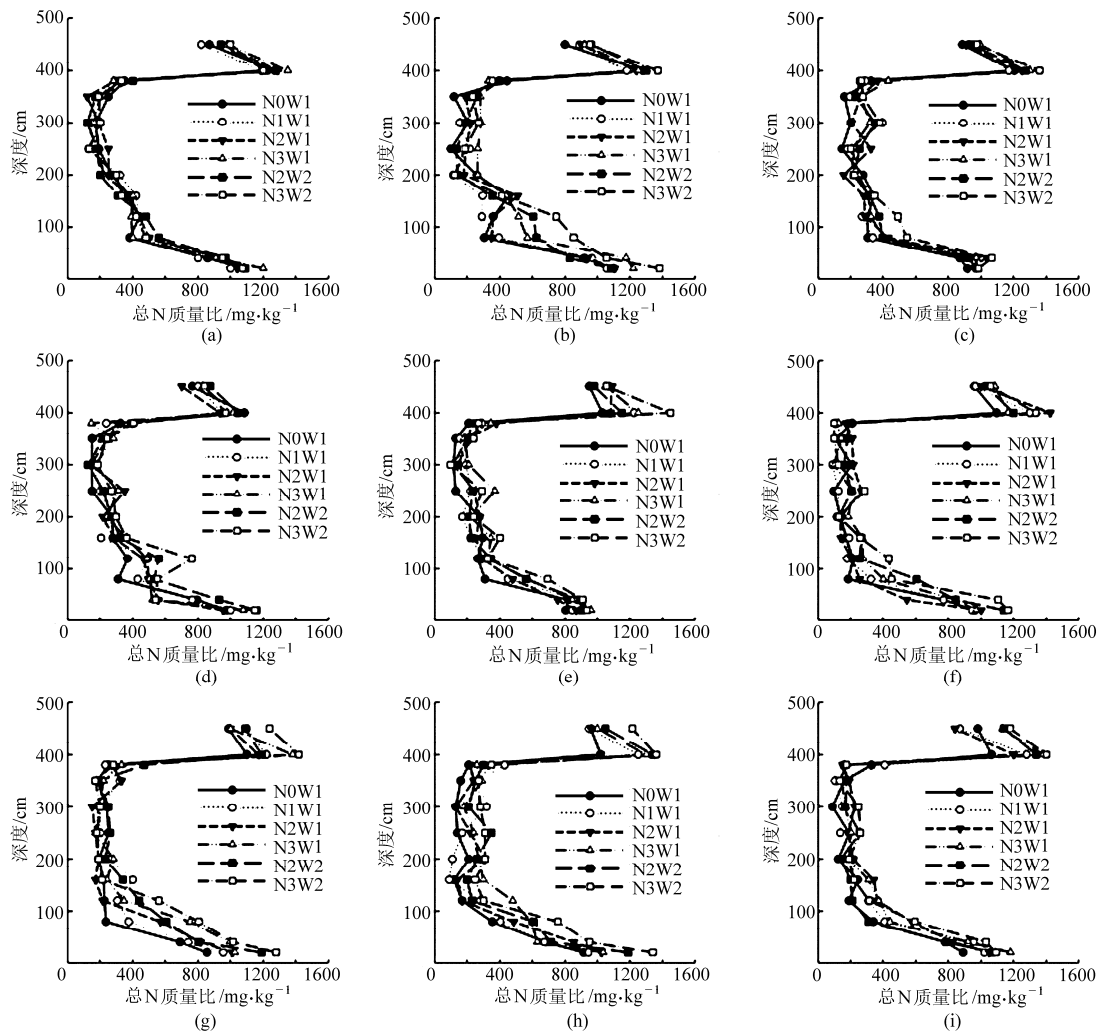


图 5 不同水氮处理对包气带土壤总 N 质量比的影响

Fig. 5 Effect of N-fertilizer and irrigation level on soil total nitrogen content in vadose zone soils

(a) 第 1 次取样 (b) 第 2 次取样 (c) 第 3 次取样 (d) 第 4 次取样 (e) 第 5 次取样

(f) 第 6 次取样 (g) 第 7 次取样 (h) 第 8 次取样 (i) 第 9 次取样

表 8 不同水氮处理对包气带土壤总 N 累积量的影响

Tab.8 Effect of N-fertilizer and irrigation level on soil total nitrogen accumulation in vadose zone soils																		kg/hm ²
日期	N0W1			N1W1			N2W1			N3W1			N2W2			N3W2		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2011-07-04	10 270 ^a	9 950 ^a	11 510 ^a	10 360 ^a	9 140 ^a	10 820 ^a	11 130 ^a	9 080 ^a	12 250 ^a	10 580 ^a	9 040 ^a	12 700 ^a	11 870 ^a	8 310 ^a	11 940 ^a	10 980 ^a	9 080 ^a	12 390 ^a
2011-10-17	8 020 ^b	7 100 ^b	11 410 ^a	9 300 ^b	7 880 ^b	13 110 ^b	9 080 ^b	9 020 ^a	12 760 ^a	10 360 ^a	10 580 ^b	12 980 ^a	10 370 ^b	7 990 ^a	12 060 ^a	11 140 ^a	9 680 ^a	13 660 ^b
2012-06-24	7 880 ^b	6 900 ^b	11 780 ^a	9 840 ^{ab}	7 300 ^b	11 540 ^a	10 730 ^{ab}	8 430 ^b	11 030 ^b	10 680 ^a	7 500 ^c	14 080 ^b	8 310 ^c	7 200 ^b	14 030 ^b	11 330 ^a	7 990 ^b	14 570 ^c
累积量	-2 390	-3 050	270	-520	-1 840	720	-400	-650	-1 220	100	-1 540	1 380	-3 560	-1 110	2 090	350	-1 090	2 180
合计	-5 170			-1 640			-2 270			-60			-2 580			1 440		

3 讨论

作者对夏玉米季不同施氮水平对包气带土壤氮素的影响进行过研究^[2],但本次试验研究时段为夏玉米/冬小麦轮作期间,试验增加了灌水量处理,同时针对的包气带为具有明显分层的特殊包气带,本次研究同样具有创新性。与“壤土-砂土-壤土”的包气带土壤结构对应,土壤含水率呈现“高-低-高”

的现象,并在壤土和砂土的交界处 80~120、380~400 cm 土层出现峰值。从土壤水迁移的机理来说,在相同含水率条件下,上层壤土的土壤水吸力大于下层砂土的土壤水吸力,导致水分从壤土到砂土下渗困难,引起水分在 80~120 cm 壤土土层累积,同理,水分从上层砂土入渗到下层壤土非常容易,水分在 380~400 cm 壤土土层累积,同时土壤孔隙、非毛管空隙等也影响土层中水分的下渗^[21~22]。另外,由

表 1 知,壤土田间持水率和饱和含水率都大于砂土,特别是 380 ~ 400 cm 壤土,其饱和含水率达 48%,同时土壤中的粘粒含量较多时,饱和导水率也较小^[23],说明该层壤土具有极强的持水能力,380 ~ 400 和 400 ~ 450 cm 土层特殊的组合实际上起到了阻止水分进一步向深层土壤迁移的作用。无机态氮 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和其他形式的氮素的迁移和累积与水分密切相关,380 ~ 450 cm 土层对水分的阻碍作用也使以水分作为迁移载体的 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 难以继续向深层土壤迁移,导致氮素大量累积并发生复杂的转化反应,这表明虽然“壤土-砂土-壤土”的包气带土壤结构中砂土土层的存在有利于水分和氮素的迁移和淋洗,但是 380 ~ 450 cm 特殊的壤土土层对水氮的阻碍是地下水免受氮素污染的天然屏障。

本研究发现施氮量和灌水量越大,氮素累积越多,这与其他学者的研究结论相似^[24~25],但只有 N3W1、N2W2 和 N3W2 处理在包气带土壤中表现出了明显的迁移累积现象。N0W1、N1W1、N2W1、N3W1、N2W2 和 N3W2 处理夏玉米籽粒产量分别为 5 912、6 601、6 670、6 795、6 698 和 7 108 kg/hm²,冬小麦籽粒产量分别为 4 719、5 078、5 129、5 113、5 139 和 5 328 kg/hm²,方差分析表明 N1W1 和 N2W1 和 N3W1 处理夏玉米和冬小麦籽粒产量无显著差异。综合考虑不同水氮处理对地下水的污染风险、对产量的影响、施氮肥的经济成本和灌溉对水资源的消耗,当地可考虑 1/2 传统灌水量 (52.5 mm) 与 1/2

习惯施氮量 (65 kg/hm²) 的 N1W1 处理进行夏玉米/冬小麦轮作。

4 结 论

(1)层状包气带土壤中,土壤质地和结构对水分、NO₃⁻-N 和总 N 在土层中的分布有显著影响,只有土壤结构对 NH₄⁺-N 在土层中的分布有显著影响。

(2)不同水氮处理对土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 的直接影响深度分别为 400、200 和 120 cm,间接影响深度都为 400 cm。单次灌水量 52.5 mm、单次施氮量小于等于 130 kg/hm²的处理土壤 NO₃⁻-N 不会发生明显的迁移现象,单次灌水量 52.5 mm、单次施氮量 195 kg/hm²的处理土壤 NO₃⁻-N 在 0 ~ 250 cm 土层发生明显的迁移现象,而单次灌水水量为 105 mm、单次施氮量大于等于 130 kg/hm²的处理在 0 ~ 400 cm 土层发生明显的迁移现象,而且灌水量和施氮量越大,NO₃⁻-N 迁移速度越快。

(3)对于“壤土-砂土-壤土”结构的层状包气带土壤,土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总 N 质量比从大到小为:380 ~ 450 cm 壤土土层、0 ~ 120 cm 壤土土层、120 ~ 380 cm 砂土土层,380 ~ 450 cm 特殊的壤土土层对水分和氮素的迁移起到了阻碍作用,是防止地下水受氮素污染的天然屏障。

(4)建议当地种植夏玉米/冬小麦时,灌水量为传统灌水量的一半 (单次 52.5 mm)、施氮量为习惯施氮量的一半 (单次 65 kg/hm²)。

参 考 文 献

1 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010,16(2):296 ~ 303.

Liu Xinyu,Ju Xiaotang,Zhang Lijuan,et al. Effect of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2010,16(2):296 ~ 303. (in Chinese)

2 商放泽,杨培岭,李云开,等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(7): 103 ~ 110.

Shang Fangze,Yang Peiling,Li Yunkai,et al. Effects of different inorganic nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(7):103 ~ 110. (in Chinese)

3 United Nations Environment Programme (UNEP). Global environment outlook 2000[M]. Earthscan,UK: Earthscan Publications Ltd. , 1999.

4 Eickhout B,Bouwman A F,van Zeijts H. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2006,116(1 ~ 2):4 ~ 14.

5 Thorburn P J,Biggs J S,Weier K L,et al. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal northeastern Australia [J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2003,94(1):49 ~ 58.

6 Knobeloch L,Salna B,Hogan A,et al. Blue babies and nitrate-contaminated well water[J]. Environmental Health Perspectives, 2000,108(7):675 ~ 678.

7 Gulis G,Czompolyova M,Cerhan J R. An ecologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence Intrnava district,Slovakia[J]. Environmental Research,2002,88(3):182 ~ 187.

8 Nettleton W D,Peterson F F. Landform,soil,and plant relationships to nitrate accumulation,central Nevada[J]. Geoderma,2011, 160(3 ~ 4):265 ~ 270.

9 Perego A,Basile A,Bonfante A,et al. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy)[J]. Agriculture,

- Ecosystems & Environment,2012,147:57 ~ 65.
- 10 商放泽,杨培岭,任树梅,等. 施肥模式对日光温室土壤铵态氮和硝态氮的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(7):73 ~ 78.
Shang Fangze, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of fertilization patterns on NH_4^+ -N and NO_3^- -N in solar greenhouse soils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 73 ~ 78. (in Chinese)
- 11 Liang X Q, Xu L, Li H, et al. Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 36(9 ~ 11): 395 ~ 400.
- 12 Sharma P, Shukla M K, Sammis T W, et al. Nitrate-nitrogen leaching from three specialty crops of New Mexico under furrow irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 71 ~ 80.
- 13 Zhao B Q, Li X Y, Liu H, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: the risk of groundwater pollution by nitrate [J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58(3 ~ 4): 177 ~ 183.
- 14 Gheysari M, Mirlatifi S M, Homaei M, et al. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 946 ~ 954.
- 15 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 57 ~ 64.
Du Jun, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 57 ~ 64. (in Chinese)
- 16 Kleeberg A, Heidenreich M. Release of nitrogen and phosphorus from macrophyte stands of summer dried out sediments of a eutrophic reservoir[J]. Archiv Für Hydrobiologie, 2004, 159(1): 115 ~ 136.
- 17 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33 ~ 39.
Ye Youliang, Li Long. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 33 ~ 39. (in Chinese)
- 18 陈淑峰, 吴文良, 胡克林, 等. 华北平原高产粮区不同水氮管理下农田氮素的淋失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 65 ~ 73.
Chen Shufeng, Wu Wenliang, Hu Kelin, et al. Characteristics of nitrate leaching in high yield farmland under different irrigation and fertilization managements in north China plain[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 65 ~ 73. (in Chinese)
- 19 Kundu M C, Mandal B, Sarkar D. Assessment of the potential hazards of nitrate contamination in surface and groundwater in a heavily fertilized and intensively cultivated district of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 146(1 ~ 3): 183 ~ 189.
- 20 杨忠山, 窦艳兵, 王志强. 北京市地下水水位下降严重原因分析及对策研究[J]. 中国水利, 2010(19): 52 ~ 54.
Yang Zhongshan, Dou Yanbing, Wang Zhiqiang. Analysis on the reasons of the decline of ground water level in the primary water supply source area of Beijing and the countermeasures[J]. China Water Resources, 2010(19): 52 ~ 54. (in Chinese)
- 21 商放泽, 杨培岭, 任树梅. 再生水灌溉对深层包气带土壤盐分离子影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 98 ~ 106.
Shang Fangze, Yang Peiling, Ren Shumei. Effects of reclaimed water irrigation on soil salinity in deep vadose zone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 98 ~ 106. (in Chinese)
- 22 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44 ~ 51.
Chen Lijuan, Feng Qi, Wang Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 44 ~ 51. (in Chinese)
- 23 管孝艳, 杨培岭, 吕焱. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 44 ~ 50.
Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Lü Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 44 ~ 50. (in Chinese)
- 24 刘微, 赵同科, 王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(3): 27 ~ 30.
Liu Wei, Zhao Tongke, Wang Liying. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on NO_3^- -N content and distribution in soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(3): 27 ~ 30. (in Chinese)
- 25 Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amounts of water on desalinization and permeability behaviour of chloride and sulphate-dominated saline soils[J]. Agricultural Water Management, 1996, 31(3): 225 ~ 235.
- 26 张展羽, 陈晶晶, 张文祥, 等. 农业小流域“田-沟”系统氮素时空变化分析[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(1): 61 ~ 65.
Zhang Zhanyu, Chen Jingjing, Zhang Wenxiang, et al. Analysis of temporal and spatial variation of nitrogen in field ditch system of small agricultural watershed[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(1): 61 ~ 65. (in Chinese)
- 27 张勇勇, 吴普特, 赵西宁, 等. 垄沟灌溉施氮土壤水氮分布特征试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 440 ~ 448.
Zhang Yongyong, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Experiment on water and nitrogen distribution in soils under ridge furrow irrigation with ammonium nitrate solution[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 440 ~ 448. (in Chinese)