

不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究

熊淑萍¹, 姬兴杰^{1,2}, 李春明¹, 杨颖颖¹, 马新明¹, 黄克磊³

(1. 河南农业大学农学院, 河南 郑州 450002; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 河南省焦作市气象局, 河南 焦作 454003)

摘要: 采用等氮技术进行原状土柱法试验, 设置单施尿素(N)、有机肥(OM)和尿素与有机肥配施(N+ OM)3 个处理, 研究了不同肥料处理对土壤铵态氮含量的时空变化以及小麦产量、地上部氮含量和籽粒品质的影响。结果表明, 不同肥料处理下在同深度剖面上在各个时期土壤铵态氮含量分布较均匀。不同肥料处理下, 1.2 m 土体中铵态氮总含量均在抽穗期出现最大值, 在拔节期出现最小值。其中, 在越冬期和拔节期表现为尿素>配施>有机肥, 在抽穗期和扬花期表现为有机肥>配施>尿素, 在灌浆盛期表现为配施>尿素>有机肥, 在成熟期表现为有机肥>尿素>配施。小麦全生育期总含量表现为以尿素最高、配施次之、有机肥最低, 分别为 186.6、184.1 和 183.3 mg·kg⁻¹, 但其差别不显著。有机肥处理土壤剖面上 NH₄⁺-N 含量整体变幅较大, 其次为配施和尿素处理。在 3 种不同肥料处理下地上部每柱总氮含量顺序为配施>尿素>有机肥。配施处理的在叶片、叶鞘和茎秆中的氮含量均低于尿素和有机肥处理, 在颖壳中的氮素含量配施的低于有机肥处理而高于尿素处理。在配施处理下的籽粒氮含量最高, 分别是尿素和有机肥处理的 1.12 和 1.26 倍。尿素、有机肥和配施处理下的氮收获指数分别为 73.09%、70.70%和 75.84%。在配施的处理下, 清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白含量均高于尿素和有机肥处理, 并且产量比尿素和有机肥处理提高了 6.2%和 11.3%。综合考虑小麦产量、品质与生态环境效益, 3 种肥料处理以尿素与有机肥配施为最佳。

关键词: 肥料处理; 时空变化; 铵态氮; 产量; 品质

中图分类号: S147.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-0978-06

Effect of Different Fertilizer Treatments on Spatial-temporal Variations of Soil Ammonium Nitrogen

XIONG Shu-ping¹, JI Xing-jie^{1,2}, LI Chun-ming¹, YANG Ying-ying¹, MA Xin-ming¹, HUANG Ke-lei³

(1.College of Agronomy, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002,China; 2.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Jiaozuo Meteorological Office of Henan Province, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The effects of different fertilizers treatments on the temporal-spatial variations of soil ammonium nitrogen were studied by virtue of soil column methods. The results showed that the contents of ammonium nitrogen in soil were equably distributed in the same depth of soil section plane during every stage under different fertilizers treatments. The max value of ammonium nitrogen contents occurred at booting stage, the min value of ammonium nitrogen contents occurred at jointing stage in the total soil depth of 1.2 m under different fertilizers treatments. Under different fertilizers treatments, the contents of ammonium nitrogen in the total soil of 1.2 m showed carbamide>mixed fertilizer>organic fertilizer during over-winter stage and jointing stage, while, being organic fertilizer>mixed fertilizer>carbamide during booting period and flowering stage, mixed fertilizer>carbamide>organic fertilizer during active grain filling stage and organic fertilizer>carbamide>mixed fertilizer at mature stage. The total contents of ammonium nitrogen during the whole growth stages of winter wheat showed no significant difference between the three treatments. The contents of ammonium nitrogen in soil section plane changed greatly under organic fertilizer treatment, followed by that under mixed fertilizer treatment and carbamide treatment. The contents of total N in shoot of winter wheat per column under different treatments followed the order: combined fertilizer>carbamide>organic fertilizer. The contents of N in leaf, leaf sheath and stem under mixed fertilizer treatment were lower than those under carbamide treatment and organic fertilizer treatment, while the total N contents in chaff showed carbamide treatment>mixed fertilizer treatment>organic fertilizer treatment without exception. The contents of N in grains under mixed fertilizer treatment were 1.12 and 1.26 times of those under carbamide treatment and organic fertilizer treatment respectively.

收稿日期: 2007-07-18

基金项目: “十五”国家重大科技专项(2001BA804A30-02); “863”计划(2006AA10Z224)

作者简介: 熊淑萍(1976—), 女, 河南南阳人, 硕士, 讲师, 主要从事生理生态与农业信息技术研究。

通讯作者: 马新明 E-mail: xinmingma@371.net

The N harvest indexes of carbamide treatment, organic fertilizer treatment and mixed fertilizer treatment respectively were 73.09%, 70.70% and 75.84%.The contents of albumin, globulin, gliadin and glutenin under mixed fertilizer treatment were highest among the three treatments, the yield increased by 6.2% and 11.3% compared with carbamide treatment and organic fertilizer treatment. So, synthetically considering the benefits of yield, quality and ecological environment, the mixed fertilizer is the best choice among the three different fertilizers treatments.

Keywords: different fertilizers treatments; spatial-temporal variations; ammonium nitrogen; yield; quality

铵态氮是以铵离子(NH₄⁺)形态存在于土壤、植物和肥料中的氮素。土壤中的铵态氮可被土壤胶体吸附,呈交换性铵态氮肥,能直接被植物吸收利用,与硝态氮同属于速效性氮素。铵离子带正电荷,容易被土壤吸附,不仅吸附在土壤表面,还可进入粘土矿物的晶体中,成为固定态铵离子。与硝态氮相比,铵态氮主要被吸附和固定在土壤胶体表面和胶体晶格中,移动性较小,比较容易被土壤“包存”。充分且合理有效利用有机肥与化肥 N 为当前农业可持续发展和生态环境保护的重要课题之一。近年来,国内外对于农田硝态氮研究较多^[1-10]。目前为止,对农田铵态氮的研究较少,而对于不同肥料处理下铵态氮的时空变化研究尚未见报道,为此,设置试验研究了 3 种肥料处理下冬小麦不同生育时期土壤 NH₄⁺-N 的时空变化,旨在进一步探讨华北平原冬小麦产区不同处理肥料对土壤铵态氮及小麦品质与产量的影响,为我国北方小麦种植区合理施肥提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验处理与设计

2005—2006 年试验采用“土柱法”在河南农业大学科教园区进行。土柱管为 PCR 材料,管长 1.2 m,直径 15 cm。在小麦播种前,挖好土坯除去耕层土 20 cm,采用“削土法”把土柱套进 PCR 管子中,保证土壤土层的原始性,而后用过筛后的 20 cm 耕层土填满柱子,以备播种,共设 36 个土柱。供试小麦品种为豫

麦 34,柱内小麦密度按 15 万基本苗计算,播期为 10 月 19 号。在每次取样后,即对小麦灌 2 000 mL 等量的水,遇旱时视情况再灌等量水,保证不同处理间水分处理一致性,小麦生长期间其他管理按高产田要求进行。试验土壤为潮土,试验前土层基础养分状况见表 1。

试验共设 3 个肥料处理,分别为尿素(N)、有机肥(OM)和二者配施(N+OM),其中配施处理有机肥与无机肥的比例为 1:1,3 种处理在等氮条件下施肥,按每 667 m² 施纯氮 15 kg 计算,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,磷、钾肥按 N:P:K=2:1:1 的肥料配比进行施用,氮、磷、钾肥在处理间一致,所有肥料一次性施入 20 cm 土壤耕层。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土样采集

分别于播种前、越冬期、拔节期、抽穗期、扬花期、灌浆盛期和成熟期晴天的上午 10:00 左右,挖出土柱对 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 和 100~120 cm 等 6 个土层取样,每个土层取土壤样品 2 次重复。

1.2.2 土壤含水量

将盛有约 20 g 新鲜土样的铝盒在分析天平上称重,准确至 0.01 g,揭开盒盖,后置于已经预热至 105±2℃左右的烘箱中 12 h。取出,盖好盒盖,在干燥器中冷却至室温(约需 30 min)立即称重,重复 3 次^[11]。

1.2.3 土壤铵态氮

表 1 播种前土壤基础养分状况
Table 1 Soil fertility status before sowing

土壤指标	土壤深度/cm					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
全氮/g·kg ⁻¹	1.50	1.08	0.96	0.86	0.82	0.77
有机质/g·kg ⁻¹	14.29	11.32	8.43	5.52	3.35	2.77
速效氮/mg·kg ⁻¹	57.17	39.84	25.32	30.16	19.73	29.79
速效磷/mg·kg ⁻¹	16.9	1.64	1.62	1.51	1.39	1.31
速效钾/mg·kg ⁻¹	119.95	88.45	86.65	65.11	54.34	47.43
硝态氮/mg·kg ⁻¹	9.42	9.32	8.36	5.52	2.88	2.64
铵态氮/mg·kg ⁻¹	7.38	4.03	4.22	4.03	2.69	4.69

称取 10 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤样品于 180 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液,振荡 1 h,过滤,滤液冷冻保存。测定前解冻,采用连续流动分析仪(CFA,TRAACS2000)法测定滤液中的铵态氮(NH_4^+-N)含量。

1.2.4 植株与子粒全氮

取成熟期整株小麦带回实验室,按器官(叶片、颖壳、叶鞘、茎秆和子粒)分开,烘干粉碎,测定全氮按凯氏法^[11]。

2 结果与分析

2.1 不同肥料处理对土壤铵态氮含量时空变化的影响(表 2)

2.1.1 不同肥料处理下土壤铵态氮含量的时间变化

随着小麦生育时期的推进,在 0~20 cm 土层中铵态氮的含量,尿素、有机肥和配施处理的含量变化均表现为在拔节期最低,抽穗期升高,扬花期降低的相同趋势,且配施处理在抽穗期以后一直处于下降的趋势。在 20~40 cm 土层中,在拔节期配施和有机肥的处理铵态氮的含量增加,尿素处理降低;尿素和有机肥处理的最大值出现在扬花期,配施处理的最大值出现在拔节期。在 40~60 cm 土层中,在拔节期尿素和有机肥的处理铵态氮的含量均表现为降低的趋势,并为最小值的出现时期;尿素处理的最大值出现在越冬期,有机肥处理的最大值出现在扬花期,配施处理在抽穗期。在 60~80 cm 土层中,在拔节期有机肥、配施肥的处理铵态氮的含量均表现为下降的趋势,并为最小值的出现时期;有机肥和配施处理在抽穗期铵态氮的含量均表现为上升的趋势,并为最大值的出现时期;三个处理铵态氮的含量在扬花期、灌浆盛期均呈下降趋势。在 80~100 cm 土层中铵态氮的含量,有机肥和配施处理在拔节期呈下降趋势,并为最小值的出现时期;抽穗期均呈现上升趋势,并为最大值出现时期;扬花期、灌浆盛期和成熟期均呈下降趋势。尿素处理在越冬期、拔节期和抽穗期均呈上升趋势,抽穗期出现最大值;扬花期、灌浆盛期和成熟期逐渐呈下降趋势,并在灌浆盛期出现最小值。在 100~120 cm 土层中铵态氮的含量,有机肥和配施处理在越冬期、拔节期出现下降趋势,拔节期为最小值出现时期;抽穗期呈上升趋势,并为最大值出现时期;尿素处理越冬期出现最小值,拔节期、抽穗期和扬花期依次升高,扬花期为最大值出现时期,灌浆盛期和成熟期铵态氮含量呈下降趋势。

2.1.2 不同肥料处理下土壤铵态氮含量的空间变化

在越冬期,尿素处理下土壤铵态氮含量在 40~60 cm 土层中出现最大值,有机肥处理在 80~100 cm 土层中累积量最大,配施处理的累积量最大值均出现在 100~120 cm 土层中,其中尿素处理在 100~120 cm 土层中含量最少。在拔节期,有机肥和配施处理下土壤铵态氮含量的最大值出现在 20~40 cm 土层中,尿素处理的出现在 60~80 cm 土层中。在孕穗期,3 种处理表现大致相似的趋势即随着土壤深度的增加铵态氮的含量趋于增加,其中有机肥处理表现最为明显。在扬花期,有机肥处理下铵态氮含量的最大值出现在 40~60 cm 土层中;配施处理出现在 60~80 cm 土层中;尿素处理随着土壤深度的增加,铵态氮的含量逐渐增加,趋势很明显。在灌浆盛期,尿素和配施处理下铵态氮含量的最大值出现在 0~20 cm,有机肥处理出现在 20~40 cm 土层中,在 100~120 m 的土层中有有机肥处理下铵态氮含量的累积量最少。在成熟期,各个土层中铵态氮含量变化不大,累积量最大值除配施处理外均出现在 0~20 cm 土层中,其他处理的出现在 20~40 cm 土层中。

2.2 1.2 m 土体中铵态氮含量变化

试验结果表明(表 3),3 种肥料处理处理下,1.2 m 土体中铵态氮总含量均在抽穗期出现最大值,在拔节期出现最小值,原因可能是由于氮肥水解、硝化作用、挥发作用以及土壤对 NH_4^+-N 的净固定作用所致,拔节期是冬小麦大量吸收利用养分时期,故土壤 NH_4^+-N 含量明显下降。在越冬期和拔节期表现为尿素>配施>有机肥,抽穗期和扬花期表现为有机肥>配施>尿素,灌浆盛期表现为配施>尿素>有机肥,成熟期表现为有机肥>尿素>配施。小麦全生育期尿素、有机肥和配施处理下铵态氮总含量分别为 186.6,183.3 和 184.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以尿素处理最高,但差别不大。

2.3 小麦全生育期不同深度土壤铵态氮含量

由表 4 可知,有机肥处理土壤剖面上 NH_4^+-N 含量整体变幅较大,其次为配施和尿素处理,这与有机肥释放缓慢有关。各处理土壤 NH_4^+-N 含量在剖面上分配较均匀,表明土壤颗粒和土壤胶体对 NH_4^+-N 具有很强的吸附作用,但也因土壤中所进行的交换反应及无机态氮的有机化、硝化和反硝化等作用,使土壤 NH_4^+-N 难以迁移至更深层次^[12,13]。

2.4 不同肥料处理对地上部氮含量的影响

由表 5 可知在各处理下地上部每柱总氮含量顺序为配施>尿素>有机肥。配施处理在叶片、叶鞘和茎

表 2 土壤铵态氮的时空变化(mg·kg⁻¹)
Table 2 Spatial-temporal variations of soil NH₄⁺-N

生育时期	处理	土壤深度/cm					
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
越冬期	N	6.850	5.052	8.192	4.769	3.954	2.812
	OM	1.102	3.203	4.791	6.424	6.613	5.686
	N+OM	2.900	5.511	5.396	5.907	4.172	5.898
拔节期	N	4.578	4.418	4.077	7.084	4.957	3.620
	OM	0.794	5.543	4.035	2.819	2.781	2.973
	N+OM	2.837	7.195	4.507	2.745	3.282	2.724
抽穗期	N	5.233	4.607	6.697	6.231	6.621	5.822
	OM	5.032	5.782	6.461	6.843	7.583	8.684
	N+OM	6.264	4.997	5.573	7.343	7.127	6.838
扬花期	N	5.176	5.769	5.834	6.330	6.505	6.950
	OM	3.352	7.064	7.867	6.405	6.251	7.259
	N+OM	5.742	4.923	4.536	7.256	6.390	5.826
灌浆盛期	N	5.574	5.127	5.254	4.287	4.725	4.933
	OM	4.731	5.455	5.034	4.783	5.211	2.978
	N+OM	5.605	4.554	5.546	5.393	4.991	5.243
成熟期	N	5.550	4.726	4.895	4.320	4.576	4.497
	OM	5.480	4.530	5.134	5.318	4.529	4.774
	N+OM	4.412	4.830	4.522	4.152	4.476	4.462

表 3 1.2 m 土体中铵态氮总含量(mg·kg⁻¹)
Table 3 Total NH₄⁺-N contents in 1.2 m soil body

处理	越冬期	拔节期	抽穗期	扬花期	灌浆盛期	成熟期
N	31.628	26.733	35.212	34.565	29.899	28.564
OM	27.819	18.946	40.385	38.199	28.192	29.765
N+OM	29.784	23.290	38.143	34.673	31.331	26.855

表 4 小麦全生育期不同深度土壤铵态氮含量变化
Table 4 Changes of NH₄⁺-N content in different depths of soil during whole period of wheat growth

土壤深度/cm	N/mg·kg ⁻¹	OM/mg·kg ⁻¹	N+OM/mg·kg ⁻¹
0~20	5.714±1.136	3.137±2.343	4.551±1.713
20~40	5.094±0.676	5.133±1.930	5.874±1.321
40~60	6.134±2.057	5.951±1.916	5.040±0.533
60~80	5.309±1.021	4.831±2.012	5.044±2.299
80~100	5.288±1.334	5.182±2.401	5.204±1.922
100~120	4.317±1.505	5.828±2.855	4.781±2.057
总和	31.854±7.729	30.063±13.458	30.495±9.846

表 5 成熟期植株各器官氮积累量与比例
Table 5 N accumulation and distribution rate in different parts of plant at mature stage

器官	N/g·柱 ⁻¹	比例	OM/g·柱 ⁻¹	比例	N+OM/g·柱 ⁻¹	比例
叶片	0.176	5.34%	0.159	5.26%	0.172	4.84%
颖壳	0.177	5.36%	0.265	8.76%	0.250	7.03%
叶鞘	0.264	8.02%	0.169	5.60%	0.196	5.50%
茎秆	0.270	8.19%	0.293	9.69%	0.242	6.79%
子粒	2.406	73.09%	2.136	70.70%	2.698	75.84%
总量	3.292		3.022		3.557	

秆中的氮含量均低于尿素和有机肥处理,在颖壳中的氮素含量配施处理低于有机肥处理而高于尿素处理,说明小麦植株体内氮素在配施处理下向子粒的转运率相对较高。在配施处理下的子粒氮含量最高,分别是尿素和有机肥处理的 1.12 和 1.26 倍。氮收获指数^[13] (NHI,Nitrogen harvest index):子粒氮积累量与植株地上部氮积累量之比×100(%)。尿素、有机肥和配施处理下的氮收获指数分别为 73.09%、70.70%和 75.84%。

2.5 不同肥料处理小麦子粒蛋白质组分与产量的比较

蛋白质含量是小麦品质的主要指标之一。试验结果表明(表 6),3 种肥料处理处理下,小麦子粒中清蛋白、球蛋白和谷蛋白的百分含量均表现为配施>有机肥>尿素,小麦子粒中醇溶蛋白的百分含量表现为配施>尿素>有机肥。在配施的处理下,各项品质指标均优于尿素和有机肥处理,并且产量比尿素和有机肥处理分别提高了 6.2%和 11.3%,说明尿素和有机肥配施有利于提高小麦品质和产量。

3 结语与讨论

氮肥在施入土壤后,其转化与运移是十分复杂的物理-化学-生物学的过程。而 NH₄⁺-N 在土壤剖面中的分布更直接地决定于作物生长、气候条件、灌溉方式以及土壤性质等因素^[14-16]。铵态氮是一种有效态氮素,可被植物直接吸收利用^[14],被植物吸收后立即参与含氮有机物的合成^[14]。王西娜等^[19]认为土壤铵态氮的数量不因种植与否而异,只是随时间变化存在高低变化。对矿质态氮而言,主要影响土壤中硝态氮的累积量及其在土壤剖面中的分布,而对铵态氮却无显著影响。铵态氮不是黄土高原旱地土壤矿质态氮的主要累积形式^[20],其数量随生育期的变化及在土壤剖面的分布不受施氮的影响,在土壤剖面上分布变化差异较小。

不同肥料处理下,1.2 m 土体中铵态氮总含量均在抽穗期出现最大值,在拔节期出现最小值,这是由于拔节期冬小麦对养分吸收开始加快所致。在越冬期和拔节期表现为尿素>配施>有机肥,在抽穗期和扬

花期表现为有机肥>配施>尿素,在灌浆盛期表现为配施>尿素>有机肥,在成熟期表现为有机肥>尿素>配施,这与有机肥分解释放慢的特点有关。小麦全生育期尿素、有机肥和配施处理下铵态氮总含量分别为 186.6、183.3 和 184.1 mg·kg⁻¹,处理间差异较小,以尿素处理最高,有机肥处理最小,这与有机肥分解释放慢的特点有关。有机肥处理土壤剖面上 NH₄⁺-N 含量整体变幅较大,其次为配施和尿素处理,这也与有机肥释放缓慢有关。说明有机肥和尿素配施能有效增加土壤中的小麦可利用铵态氮素的含量与时间。

孙传范等^[13]研究了不同施氮水平下增铵营养对小麦生长和氮素利用的影响,认为中氮水平下增铵营养处理的小麦生长具有明显的优势,氮素利用率高,子粒产量最高。本研究认为,3 种肥料处理下地上部每柱总氮含量顺序为配施>尿素>有机肥。在配施处理下的子粒氮含量最高,分别是尿素和有机肥处理的 1.12 和 1.26 倍。尿素、有机肥和配施处理下的氮收获指数分别为 73.09%、70.70%和 75.84%。3 种肥料处理之间以配施的氮素收获指数最高。3 种肥料处理之间比较,配施处理下的各项蛋白质组分指标均优于尿素和有机肥处理,并且产量比尿素和有机肥处理分别提高了 6.2%和 11.3%。有机肥与无机肥配施的施肥措施能有效提高小麦的产量和品质,这与以往的研究一致^[22-25]。综合考虑小麦产量和品质、经济效益和生态效益,3 种肥料处理以尿素与有机肥配施措施为最适合我国北方小麦种植区的施肥方式。

参考文献:

[1] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J].中国农业科学,2004,37(5):692-698.
LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Yun-gui, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(5): 692-698.
[2] 李晓欣,胡春胜,程一松.不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮累积的影响[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):38-41.
LI Xiao-xin, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song. Effects of different fertilizers on crop yields and nitrate accumulation[J]. *Agricultural Re-*

表 6 3 种肥料处理下小麦子粒蛋白质组分与产量比较

Table 6 Comparisons of wheat grain qualities and yields between three different fertilizer treatments

处理	清蛋白/%	球蛋白/%	醇溶蛋白/%	谷蛋白/%	产量/kg·hm ⁻²
N	1.75	0.95	3.43	3.23	6861.59
OM	1.97	1.24	2.66	3.33	6543.50
N+OM	2.03	1.25	3.70	4.48	7316.00

search in the Arid Areas, 2003, 21(3):38–41.

- [3] 黄满湘, 章 申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗漏计测定冬小麦–夏玉米轮作期硝态氮淋失[J]. 环境科学学报, 2003, (1):11–16.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang. Soil core lysimeter study of nitrate leaching from a winter wheat summer maize rotation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, (1):11–16.
- [4] Hutson J L, et al. A retentivity function for use in soil water simulation models [J]. *J Soil Sci*, 1987, 38:105–113.
- [5] Knight Ora R E, et al. Simulation of solute transport using a CTMP [J]. *Water Resort Re Res*, 1987, 28(10):1917–1925.
- [6] Jatro J D, Lotse E G, Simmons K E, et al. A field study of macrospore flow under saturated conditions using a bromide tracer [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(5):376–380.
- [7] Strebel O, Duynisveld W H M, Bottcher J. Nitrate pollution of groundwater in western Europe [J]. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 1989, 26(3/4):189–214.
- [8] 邓建才, 陈效民, 柯用春, 等. 土壤水分对土壤中硝态氮水平运移的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3):280–284.
- DENG Jian-cai, CHEN Xiao-min, KE Yong-chun, et al. Influence of soil moisture on the horizontal transport of nitrate–N in the soil [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3):280–284.
- [9] 张庆忠, 陈 欣, 沈善敏. 农田土壤硝酸盐累积与淋失研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2):233–238.
- ZHANG Qing-zhong, CHEN Xin, SHEN Shan-min. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):233–238.
- [10] 王朝辉, 宗志强, 李生秀. 菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (9):1091–1094.
- WANG Zhao-hui, ZONG Zhi-qiang, LI Sheng-xiu. Difference of several major nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (9):1091–1094.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Agrochemical Analysis of Soil [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素与 DCD 和有机物料配施条件下氮素的转化和去向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2):81–186.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Nitrogen transformation and fate in soil under the conditions of mixed application of urea with DCD or different organic materials [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2):81–186.
- [13] 孙传范, 戴廷波, 曹卫星. 不同施氮水平下增铵营养对小麦生长和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1):33–38.
- SUN Chuan-fan, DAI Ting-bo, CAO Wei-xing. Effect of the enhanced ammonium nutrition on the growth and nitrogen utilization of wheat under different N levels [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (1):33–38.
- [14] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 302–304.
- LI Yun-zhu, LI Bao-guo. Soil Solution Transport [M]. Beijing: Science Press, 1998. 302–304.
- [15] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 192–198.
- HUANG Chang-yong. Soil Science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 192–198.
- [16] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学, 2006, 27(6):1217–1222.
- CHEN Xiao-min, WU Hua-shan, SUN Jing-hong. Time-spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu Lake region [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(6):1217–1222.
- [17] 李晓鸣, 孙 彬, 孙 磊, 等. 黑土土壤硝态氮时空变异对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2):241–244.
- LI Xiao-ming, SUN Bin, SUN Lei, et al. Influence of nitrate–N space time differentiation to Ch. Cabbage nitrate content in black soft [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2):241–244.
- [18] 白军红, 崔保山, 李晓文, 等. 向海芦苇沼泽湿地土壤铵态氮含量的季节动态变化[J]. 草业学报, 2006, 15(1):117–119.
- BAI Jun-hong, CUI Bao-shan, LI Xiao-wen, et al. Ammonium nitrogen concentration seasonal dynamics in soils from reed wetlands in Xiang-hai [J]. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2006, 15(1):117–119.
- [19] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 种植玉米与休闲对土壤水分和矿质态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6):1179–1185.
- WANG Xi-na, WANG Zhao-hui, LI Sheng-xiu. Influence of planting maize and fallowing on soil moisture and mineral nitrogen [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6):1179–1185.
- [20] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO_3^- -N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 538–546.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Accumulation and movement of NO_3^- -N in soil profile in winter wheat–summer maize rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 538–546.
- [21] 吕凤荣, 刘康峰, 刘媛媛, 等. 有机肥对小麦产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2000, 16 (3):39–40.
- LV Feng-rong, LIU Kang-feng, LIU Yuan-yuan, et al. Effects of organic fertilizer on wheat yield and qualities [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2000, 16(3):39–40.
- [22] 姜 东, 戴廷波, 荆 奇, 等. 有机无机肥长期配合施用对冬小麦子粒品质的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7):1548–1555.
- JIANG Dong, DAI Ting-bo, JING Qi, et al. Effects of long-term application of manure and fertilizers on grain quality and yield of winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1548–1555.
- [23] 樊虎玲, 郝明德, 李志西. 黄土高原旱地化肥和有机肥配施对小麦品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5):72–76.
- FAN Hu-ling, HAO Ming-de, LI Zhi-xi. Effect of long-term fertilization on quality of wheat in dryland of Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(5):72–76.
- [24] 林 葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994(试刊):6–18.
- LIN Bao, LIN Ji-xiong, LI Jia-kang. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994:6–18.