

县域尺度稻麦轮作农田土壤无机氮的时空变化 ——以江苏省仪征市为例

宋 歌, 孙 波

(中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要: 区域尺度农田土壤氮素的迁移和转化规律是进行环境风险评价和面源污染治理的基础。本文以仪征市为研究区域, 基于动态的定位采样和地统计学分析, 研究了稻-麦轮作系统中, 经过一个作物生长周期后, 土壤无机氮变化量的空间分布, 并分析土壤和环境因素的影响。研究采用嵌套式网格采样设计, 包括 500 m、1 km 和 5 km 3 种采样间距, 0~20 cm 和 20~40 cm 两个采样深度, 在 2004—2005 年的一个稻-麦轮作周期中采集 4 次土样(水稻施基肥后、水稻收获后、小麦追肥后和小麦收获后)。研究发现, 土壤无机氮具有明显的时空变化特征, 在整个区域上, 表层土壤中硝态氮在稻季增加, 在麦季则大幅降低, 亚表层中变化不显著; 铵态氮在水稻施肥后迅速增加, 随后呈下降趋势。土壤无机氮经历一个作物生长季节的时间变化量的空间分布主要受土壤类型和地形的影响, 稻季时仪征北部漂白铁渗水耕人为土分布区、麦季时西部的丘陵和高岗区以及胥浦河和长江沿岸地区硝态氮的降幅均较大, 存在氮素的淋溶风险, 需要从施肥和管理方式上进行人为调控。

关键词: 硝态氮; 铵态氮; 稻麦轮作; 县域尺度; 时空变化

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0636-07

Spatial and Temporal Changes of Soil Inorganic Nitrogen in Rice-wheat Rotation System at County Scale ——A Case Study in Yizheng County, Jiangsu Province, China

SONG Ge, SUN Bo

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The information on soil nitrogen transference and transformation at regional scale are essential to environmental risk assessment and non-point pollution control. By means of dynamic sampling at fixed site combined with geostatistical analysis, the spatial and temporal distributions of soil inorganic nitrogen at the time of fertilization and crop harvest in a whole rice-wheat rotation in Yizheng County were discussed. The influence of soil intrinsic attributes, environmental factors and anthropic factors was also analyzed. A nested sampling grid was designed with three subgrids at the distances of 5 km, 1 km, and 500 m. In the total 77 sample sites, every site was sampled in two layers, i.e. top layer (0~20 cm) and sub-layer (20~40 cm), and by four times from 2004 to 2005 (i.e. after the rice basal fertilization, the rice harvest, the wheat top dressing fertilization and the wheat harvest, respectively). The results indicated that soil inorganic nitrogen (nitrate-N and ammonium-N) showed temporal and spatial variation features. At the regional scale, nitrate-N in top layer soil increased in rice season, and decreased in wheat season, but the changes in sub-layer were not significant. Ammonium-N increased rapidly after rice basal fertilization and then decreased greatly. The distribution of soil inorganic nitrogen temporal changes through a cycle of crop growth mainly contributed to soil type and terrain. Nitrate-N significantly reduced in the north of Yizheng County where the soil belongs to albic Fe-leachi-stagnic anthrosols during rice season, in the west of this county where the terrain is hill or high mound and in the riparian area of Xupu river and Yangtze river during wheat season, and there was a potential risk of nitrogen leaching and non-point pollution.

Keywords: nitrate-N; ammonium-N; rice-wheat system; county scale; spatial and temporal changes

收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-038); 中科院野外台站研究基金项目“农田系统有机源氮素的区域迁移过程”

作者简介: 宋 歌(1981—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 主要研究方向为区域农田氮素迁移过程与模拟。E-mail: gsong@issas.ac.cn

通讯作者: 孙 波 E-mail: bsun@issas.ac.cn

作为土壤无机氮的主要组分,铵态氮和硝态氮在土壤-植物-大气-水系统的物质循环中不断进行迁移和转化,是土壤肥力中最活跃的因素之一。农田土壤中氮素的迁移是造成氮肥利用率普遍较低,农业生产成本提高和环境污染的主要原因之一。国内外在不同空间尺度上研究了土壤无机氮的空间变异规律,包括小区^[1-4]、田块^[5-8]、自然村^[9,10]、流域^[11]和县域^[12]尺度。这些研究表明,土壤无机氮具有明显的空间变异结构,大多具有中等尺度的空间相关性。研究土壤无机氮的空间变异性是区域尺度上模拟和预测土壤氮素迁移过程的基础^[4],可以为区域农田氮素分区管理^[12,13]、氮素重点控制区设置^[14]以及生态拦截带的建立^[7]提供科学依据。

农田土壤中无机氮还表现出高度的时间变异性,其空间分布方式并非稳定不变的^[2,3,15,16]。已有关于区域尺度农田氮素空间变异的研究大都集中在某一时间点上分析,缺乏对生长季节中土壤无机氮变化的动态研究。而对农田氮素随时间变化的研究大多是通过田间试验^[17-20]或者模拟装置^[21]进行的定位研究,因此无法分析区域分布上的变化规律。

稻-麦轮作系统是我国中亚热带重要的农田生态系统,施肥、耕作等农业活动同时也对环境产生深远的影响。在县域尺度上对施肥造成的环境风险进行评价,首先需要了解农田氮素转化和迁移在空间和时间上的变化规律。本文选择一个典型的稻麦轮作区——江苏省仪征市,通过定位采样,结合经典统计学和地统计学分析,首先研究稻-麦轮作农田土壤无机氮的空间变异结构,然后叠加分析经过一个水稻和小麦生长季后,土壤无机氮时间变化量的空间分布,最后分析影响区域农田土壤氮素时空变化的土壤和环境因素,为该区域由于农业施用氮肥造成的环境风险区的设置提供依据。

1 研究区域概况

仪征市位于江苏省中西部,行政上隶属于江苏省扬州市,总面积 901 km²,位于东经 119°02'~119°22',北纬 34°14'~32°36' 之间,地势由西北向东南低倾,由丘陵、岗地、平原 3 大类型组成,其中丘陵占 10%,岗地占 70%,平原占 20%,丘陵和岗地土壤为下蜀黄土母质,平原圩区系长江冲积物。仪征属于中亚热带季风气候,年均温 15.1 ℃,年降水量 1 100 mm。全市耕地面积 500 km²,农业土壤主要为水耕人为土,多稻-麦轮作,少量耕地为一年两熟旱作^[22]。

2 土壤样品的采集与分析

在仪征市稻-麦轮作农田中,使用嵌套式网格采样方案采集土壤样品,设置了 500 m、1 km 和 5 km 3 种采样间距,以反映不同尺度上土壤氮素的变异特征(图 1)。500 m 和 1 km 样点位于仪征市朴席镇内,分别为 20 个和 18 个;5 km 样点分布在整個仪征市范围内,共 39 个。季节性动态采样包括 4 个时间点,分别为:2004 年 6 月水稻施基肥后、2004 年 9 月水稻收获后、2005 年 3 月小麦追肥后和 2005 年 5 月小麦收获后。在整个县域范围内,北部农民施肥时间较早,因此 5 km 网格点样品的采集由北向南进行;1 km 和 500 m 网格点在朴席镇,农民施肥习惯基本相同,由另一部分人员进行采样,从而尽量减少施肥与采样的时间间隔和采样占用的时间。每个采样点用土钻在 1 m 的直径范围内取 3 点混合,采集 0~20 cm 和 20~40 cm 两个层次。

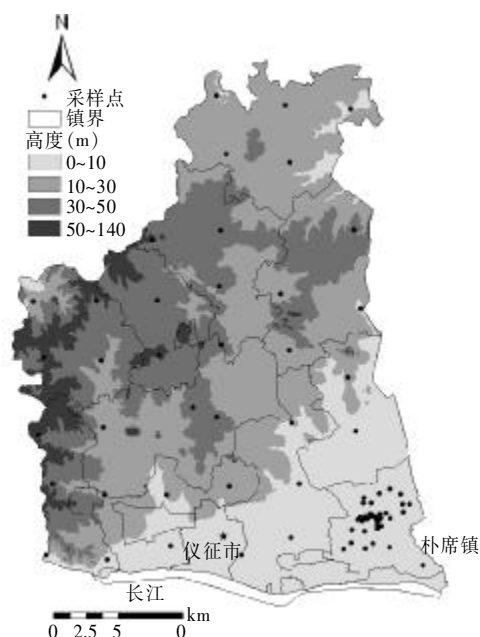


图 1 采样点分布图

Figure 1 The distribution of sample sites

土壤浸提液中硝态氮和铵态氮的测定使用流动分析仪(Bran+Luebbe AA3, 德国),土壤含水量使用烘干法(GB 7172—87),有机质的测定使用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7857—87),pH 为水提,土水比 1:2.5,使用玻璃复合电极测定(GB 7859—87)。数据分析采用经典统计学和地统计学相结合的方法,经典统计学使用 SPSS 10.0,地统计学使用 ArcGIS 8.1 的 Geostatistical Analysis 模块^[23]。

3 结果与讨论

3.1 土壤无机氮的总体变化特征

从仪征市所有采样点的平均值看(表1),稻季土壤硝态氮含量低于麦季,而铵态氮含量的变化相反;土壤表层硝态氮在小麦追肥后达到最高,而铵态氮在水稻基肥后最高;硝态氮与铵态氮的变化呈此消彼长的趋势。这种季节性变化与朱兆良(1992)和王德建等(2001)在太湖平原区稻-麦轮作系统中的研究结果相同^[24,25]。在稻-麦轮作系统中,土壤氮素转化主要是受施肥和水旱交替的耕作方式的影响,稻季在淹水条件下硝化作用较弱,施入的铵态氮肥转化为硝态氮的比例较少;而麦季良好的土壤通气状况利于硝化作用进行,铵态氮多转化为硝态氮。

在不同深度的土层中(表1),表层(0~20 cm)土壤无机氮含量均高于亚表层(20~40 cm)。但是,在水稻施肥插秧后,表层硝态氮含量($4.99 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$)低于亚表层($5.25 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$),这与连纲等(2003)在太湖地区对稻季农田养分淋洗特征进行的研究一致^[26]。这种现象可能与淹水条件下不同土层氧化还原特性各异和硝酸根离子不易被土壤吸附的特性有关。另外,0~20 cm也是作物根系密集区,作物对硝态氮的吸收利用,也是其浓度低的原因。土壤中的交换性铵容易被吸附,在0~40 cm土层内的分布差异较硝态氮小。

从变异程度上看(表1),土壤无机氮受施肥、灌水等人因素为影响大,变异系数都很高,且施肥季节的变异系数显著高于作物收获期(P 值为0.012),但表层与亚表层之间,硝态氮与铵态氮之间差异不显著。

3.2 土壤无机氮的空间变异特征

仪征市土壤无机氮的空间变异表现出明显的各向异性,其中硝态氮在水稻种植后的表层和小麦收获后的亚表层中空间变异较弱(表2)。从长轴方位角看,土壤无机氮的主要变化方向在不同的季节以及不同深度的土层中并不同步变化,说明其空间分布受到多种因素的综合作用。

不同季节土壤硝态氮的空间变异程度变化很大,基底效应大多在50%~75%,具有中等程度的空间相关性。土壤铵态氮的基底效应大多低于50%,具有较强的空间相关性,在水稻和小麦收获期基底效应低于25%,表现出强烈的空间相关性。在同一季节相同深度的土层中,土壤硝态氮的基底效应高于铵态氮,说明其空间相关性较小。土壤硝态氮的空间变异主要受灌溉、耕作和施肥等外在的随机因素影响,而铵态氮更多地受到土壤性质、母质和地形等结构性因素的影响。

3.3 土壤无机氮的季节变化特征

将水稻和小麦生长季前后两个取样时期的土壤表层和亚表层无机氮含量作配对样本 t 检验,结果表

表1 土壤硝态氮和铵态氮的统计特征($n=77$)

Table 1 Statistical features of soil nitrate and ammonium nitrogen ($n=77$)

项目	深度/cm	时间	最小值/ $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准误/ $\text{mgN} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数
$\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$	0~20	2004-06	0.51	27.52	4.99	0.63	1.12
		2004-09	0.52	14.11	6.78	0.36	0.46
		2005-03	2.54	134.27	20.62	2.57	1.09
		2005-05	4.68	37.25	13.21	0.80	0.53
	20~40	2004-06	0.80	18.18	5.25	0.40	0.67
		2004-09	0.85	12.00	5.25	0.27	0.45
		2005-03	0.57	60.15	9.01	1.14	1.11
		2005-05	1.63	44.94	9.05	0.67	0.65
$\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$	0~20	2004-06	2.60	30.12	10.01	0.71	0.62
		2004-09	2.38	5.05	3.08	0.06	0.18
		2005-03	<LD	20.16	2.43	0.41	1.49
		2005-05	0.46	10.73	2.43	0.18	0.67
	20~40	2004-06	1.33	9.11	4.15	0.18	0.37
		2004-09	2.12	4.93	2.85	0.06	0.18
		2005-03	<LD	36.81	2.01	0.53	2.33
		2005-05	0.17	4.16	1.87	0.10	0.45

注:最小值中<LD表示测定结果低于仪器检测限。

表 2 土壤硝态氮和铵态氮的空间变异结构分析

Table 2 The spatial variation of soil nitrate and ammonium nitrogen

项目	深度/cm	时间	变异函数模型	变程/m		长轴方位角/°	偏基台	块金值	基底效应/%
				长轴	短轴				
NO ₃ ⁻ -N	0~20	2004-06	块金	17 028	—	—	0.000	1.03	100
		2004-09	球状	711	156	287.9	14.4	0.000	0
		2005-03	球状	1 083	182	336.6	0.442	0.369	45.5
		2005-05	球状	1 778	273	9.6	0.034 1	0.084 0	71.1
	20~40	2004-06	球状	3 556	1 404	73.2	0.895	0.560	38.5
		2004-09	球状	830	418	73.7	0.432	0.503	53.8
		2005-03	球状	11 853	10 030	298.9	0.286	0.418	59.3
		2005-05	球状	2 726	—	—	0.074 3	0.138	64.9
NH ₄ ⁺ -N	0~20	2004-06	球状	10 744	8 639	301.2	0.172	0.187	52.0
		2004-09	球状	1 559	483	42.5	0.037 4	3.66×10 ⁻⁵	0.097 9
		2005-03	指数	2 252	346	3.3	0.125	0.074 2	37.3
		2005-05	球状	356	125	357.6	0.199	0.000	0
	20~40	2004-06	球状	1 778	944	54.4	0.060 2	0.054 2	47.4
		2004-09	球状	948	305	76.3	0.016 7	0.006 66	28.5
		2005-03	球状	1 185	191	332.8	0.147	0.133	47.5
		2005-05	高斯	711	156	291.4	0.666	0.196	22.7

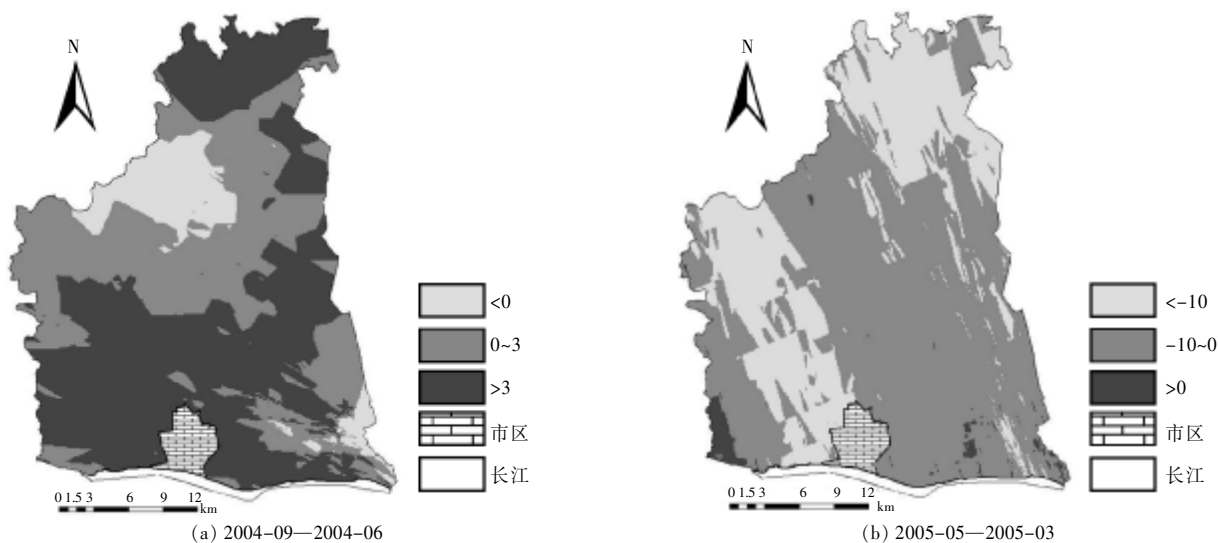
注:基台值为块金值与偏基台值之和,基底效应是块金值与基台值的比值。

明,与施肥后的取样相比,收获后表层土壤硝态氮含量均发生显著变化(P 值分别为 0.008 和 0.002),而亚表层均无显著变化(P 值分别为 1.000 和 0.969);水稻生长季前后两个取样时期的表层和亚表层土壤铵态氮含量发生显著变化(P 值均为 0.000),而在小麦生长季前后两个取样时期的比较中没有显著变化(P 值分别为 0.997 和 0.794)。

在空间变异分析基础上,利用普通克里格法插值获得土壤无机氮含量的空间分布图,在 ArcGIS 中生

成相应的栅格图,然后进行空间叠加分析获得土壤无机氮在稻季和麦季的变化分布图。表 3 列出了水稻和小麦生长季前后两次采样之间,土壤无机氮的变化幅度以及处于不同变化幅度的区域面积占总面积的比例;图 2 和图 3 仅给出了一个作物生长季前后,在统计学上有显著差异的表层土壤硝态氮变化量以及稻季土壤铵态氮变化量的空间分布图。

在水稻生长季期间(2004 年 6—9 月),表层土壤中硝态氮含量基本呈增加的趋势(表 3),增幅主

图 2 表层土壤硝态氮含量季节变化分布图(mgN·kg⁻¹)Figure 2 The change maps of soil nitrate nitrogen (mgN·kg⁻¹) in top layer

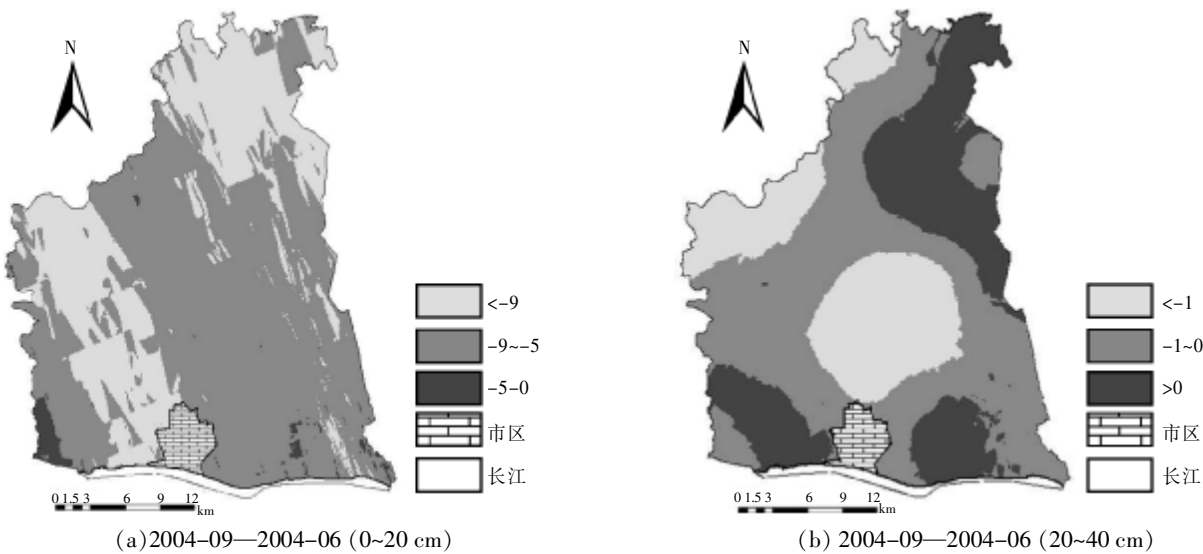


图 3 土壤铵态氮含量稻季变化分布图($\text{mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Figure 3 The change maps of soil ammonium nitrogen ($\text{mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$) in rice campaign

表 3 土壤硝态氮和铵态氮的季节变化幅度
Table 3 The variation range of soil nitrate and ammonium nitrogen in rice and wheat campaigns

项目	生长季 ⁽¹⁾	深度/cm	变化幅度/ $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$	占总面积的百分数/%
$\text{NO}_3^{-}\text{-N}$	稻季	0~20	< 0	11
			0 ~ 3	44
			> 3	45
		20~40	< 0	12
			0 ~ 1.5	62
			> 1.5	26
	麦季	0~20	< -10	36
			-10 ~ 0	60
			> 0	4
$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$	稻季	0~20 ⁽²⁾	< -9	29
			-9 ~ -5	40
			-5 ~ 0	30
		20~40	< -1	35
			-1 ~ 0	53
			> 0	12
	麦季	0~20	< -1	16
			-1 ~ 0	63
			> 0	21
		20~40	< -1	1
			-1 ~ 0	77
			> 0	22

注:(1) 稻季为 2004 年 9 月取样土壤中硝态氮和铵态氮含量与对应的点在 2004 年 6 月含量的差值;麦季为 2005 年 5 月取样土壤中硝态氮和铵态氮含量与对应的点在 2005 年 3 月含量的差值。(2) 稻季表层土壤铵态氮的变化幅度中还有 1% 的区域面积在 $> 0 \text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,表中没有列出。

要分布在 $0\sim3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两级中,占总面积的 89%;亚表层略有增加,增幅主要分布在 $0\sim1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两级中,占总面积的 88%。这是因为水稻施肥期处于淹水状态,土壤无机氮以铵态氮为主;到了收获时田面水排干,通气状况变好,残留在土层中的铵态氮逐渐被氧化为硝态氮,因此与水稻施肥期相比,收获时土壤中的硝态氮含量普遍增加。但在仪征市北部漂白铁渗水耕人为土分布较多,土壤的侧向淋溶强烈,导致表层和亚表层硝态氮的淋失(图 2a)。

在小麦生长季期间(2005 年 3—5 月),与施肥后的取样相比,收获后的表层土壤硝态氮含量大幅降低(表 3),降幅主要分布在 $0\sim10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两级中,占总面积的 96%;亚表层变化不显著,在部分地区有小幅度增加,增幅主要分布在 $0\sim2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两级中,占总面积的 64%。这说明,在麦季由于植物的吸收和硝态氮的淋溶,表层土壤硝态氮含量降低,但亚表层中植物吸收较少,以及表层淋溶下来的硝态氮补给等原因使得硝态氮含量变化不大。从整个区域上看(图 2b),在西部丘陵和高岗区的骨干河流胥浦河和南部的长江沿岸,土壤硝态氮的降低幅度较大,这与河流沿岸地下水位较低,硝态氮的淋溶作用强有关。

铵态氮在稻季表层土壤中下降幅度最大(表 3),降幅为 $0\sim5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5\sim9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域占总面积的 99%;亚表层土壤铵态氮下降幅度较小,降幅为 $0\sim1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域占总面积的 88%。仪征市西部地形以丘陵和高岗为主,土层

较浅,土壤质地疏松,一旦土壤处于比较干燥的状态,硝化作用就会将大量铵态氮转化为硝态氮。因此该区域的土壤铵态氮在稻季的下降幅度较大,但仪征市中部铵态氮降幅较大的原因还有待于进一步研究(图3)。

麦季施肥到收获后土壤铵态氮变化不显著,下降幅度较小(表3),降幅多集中在 $0\sim 1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $>1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两级中,在表层占总面积的 79%,在亚表层占 78%。麦季土壤硝化作用强烈,2005 年 3 月的采样中表层土壤铵态氮仅为 $2.43\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$,而硝态氮高达 $20.62\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$,亚表层中分别为 $2.01\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.01\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$,这说明整个区域上采样时间的滞后使得施入土壤的铵态氮肥和尿素已经有相当一部分转化为硝态氮。因此麦季土壤铵态氮变化量较小与麦季追肥后的采样时间偏后有关。

3.4 县域尺度上影响土壤无机氮季节变化的主要因子

针对土壤无机氮的变化量,选择施肥量、土壤水分变化量、土壤类型、土壤有机质含量、土壤 pH 值、地形和采样点距村庄的距离等因子进行多元线性回归分析。其中,土壤类型有水耕淡色潮湿锥形土、普通铁渗水耕人为土、漂白铁渗水耕人为土、普通铁聚水耕人为土、底潜铁聚水耕人为土和底潜筒育水耕人为土 6 个亚类^[27]。地形分为沿江平原、低平岗、平岗、高岗和丘陵。经过逐步回归分析,得到不同时间段和不同深度土层的土壤无机氮变化量与影响因素间的线

性相关方程,方程的复相关系数表征土壤无机氮变化量与影响因子间线性相关性的强弱,偏相关系数表征在控制了其他影响因子后,该因子与土壤无机氮变化量之间相关性的强弱(表4)。

在一个特定时间点上,影响农田土壤无机氮空间分布的内在因素主要是土壤有机质和 pH,其次是地形;外在因素主要是施肥,其次是耕作方式。而在一个施肥方式相差不大和种植作物品种比较单一的区域中,土壤无机氮在作物生长季(施肥-收获)中变化量的空间分布主要受土壤类型和地形的影响(表4)。在稻季表层土壤中,硝态氮的变化主要受水分变化的影响,这与稻季特有的水分管理方式有关。在麦季,土壤硝态氮和铵态氮的变化量之间关系密切,这是土壤中氮素形态转化的反映。

漂白铁渗水耕人为土侧向淋溶较强,其表层土壤中硝态氮的降幅较大。在稻季,其余 5 种土壤表层硝态氮的增幅在 $0.26\sim 4.65\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$,而漂白铁渗水耕人为土表层硝态氮降低了 $1.81\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$;在麦季表层硝态氮降幅为 $40.73\text{ mgN}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅次于底潜筒育水耕人为土。底潜筒育水耕人为土分布在丘陵山地的岗地上,土层较浅,30 cm 左右即出现母质层,开垦时间较短,肥料投入强度大,因此土壤无机氮在施肥后降低幅度也较大。高岗地区的土壤类型以底潜筒育水耕人为土为主,稻季表层土壤中硝态氮增加较少而铵态氮

表 4 土壤无机氮季节变化的影响因子逐步回归分析

Table 4 Stepwise regression analysis of factors affecting to the seasonal changes of soil inorganic nitrogen

土壤无机氮变化量			显著影响因子	偏相关系数	复相关系数	
NO ₃ ⁻ -N	稻季	表层	稻季表层水分变化量	0.520	0.535	
			漂白铁渗水耕人为土	-0.230		
		亚表层	底潜筒育水耕人为土	-0.258	0.258	
			麦季	表层		麦季表层铵态氮变化量
	漂白铁渗水耕人为土	-0.354				
	亚表层	底潜筒育水耕人为土		-0.269		
		麦季亚表层铵态氮变化量		0.520	0.565	
	沿江平原			0.273		
	NH ₄ ⁺ -N	稻季		表层	普通铁渗水耕人为土	-0.304
			高岗 High mound		-0.237	
亚表层			普通铁聚水耕人为土	-0.522	0.524	
			稻季施肥量	0.246		
麦季		表层	麦季表层硝态氮变化量	0.545	0.697	
			底潜筒育水耕人为土	-0.265		
		亚表层	高岗	-0.239		
			麦季亚表层硝态氮变化量	-0.464	0.650	
				0.350		

注:偏相关系数为负值,表示随着影响因子增加相应的土壤无机氮含量降低。

降低最多,麦季表层土壤的硝态氮和铵态氮均降低最多,因此对表层铵态氮变化量的偏相关系数为负。

4 结论

在稻-麦轮作系统中,受水旱交替的耕作方式和施肥的影响,农田土壤中硝态氮的含量在稻季低于麦季,铵态氮则反之,这种相互消长的现象反映了土壤不同形态无机氮的转化。表层土壤硝态氮在稻季基本呈增加的趋势,在麦季大幅降低,但在亚表层变化不大,这说明麦季土壤表层硝态氮向下迁移;铵态氮在水稻施肥后迅速增加,随后呈下降趋势。

在仪征市范围内,农田土壤硝态氮和铵态氮在作物生长季变化量的空间分布主要受土壤类型和地形的影响。麦季土壤中硝态氮和铵态氮的变化量之间关系密切,说明土壤中无机氮形态的转化过程控制了其变化的空间分布。

仪征市北部的漂白铁渗水耕人为土分布区稻季土壤硝态氮含量降幅较大,西部丘陵和高岗区以及胥浦河和长江沿岸地区在麦季土壤硝态氮含量降幅较大,这些区域的氮素淋溶风险较大,需要从施肥和管理方式上进行人为调控,防止农业面源污染的发生。

参考文献:

- [1] Sharmasarkar F C, Sharmasarkar S, Zhang R D, et al. Micro-spatial variability of soil nitrate following nitrogen fertilization and drip irrigation[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, 116: 605-619.
- [2] Li J S, Li B, Rao M J. Spatial and temporal distributions of nitrogen and crop yield as affected by nonuniformity of sprinkler fertigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76: 160-180.
- [3] Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale [J]. *Geoderma*, 2002, 105: 259-275.
- [4] 张玉铭,毛任钊,胡春胜,等. 华北太行山前平原农田土壤养分的空间变异性研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2049-2054.
- [5] Meirvenne M V, Maes K, Hofman G. Three-dimensioned variability of soil nitrate-nitrogen in an agricultural field [J]. *Biol Fertil Soils*, 2003, 37: 147-153.
- [6] 胡克林,李保国,林启美,等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(3): 33-38.
- [7] 王彩绒,吕家珑,胡正义,等. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 17-20.
- [8] Formosa L, Singh B. Spatial variability of ammonium and nitrate in soils near a poultry farm [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120: 659-669.
- [9] 赵良菊,肖洪浪,郭天文,等. 甘肃省灌漠土土壤养分空间变异特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 70-74, 102.
- [10] 王宏庭,金继运,王 斌,等. 土壤速效养分空间变异研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(4): 349-354.
- [11] 白军红,欧阳华,邓 伟,等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局[J]. *地理研究*, 2004, 23(5): 614-622.
- [12] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 79-88.
- [13] Soest F V, Stein A, Dekkers A L M, et al. A quantitative evaluation of monitoring networks for region-specific nitrate reduction policies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, 61: 215-225.
- [14] Cheng S J, Chen W L. Contamination potential of nitrogen compounds in the heterogeneous aquifers of the Choushui River alluvial fan, Taiwan[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 79: 135-155.
- [15] Cain M L, Subler S, Evans J P, et al. Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability [J]. *Oecologia*, 1999, 118: 397-404.
- [16] Sun B, Zhou S L, Zhao Q G. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of sub-tropical China [J]. *Geoderma*, 2003, 115: 85-99.
- [17] Rasiah V. Temporal dynamics of soil nitrate-N after termination of forage phases in corn-forage rotation [J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, 29: 201-206.
- [18] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Field Crop Research*, 2003, 83: 111-124.
- [19] 吴永成,周顺利,王志敏,等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J]. *生态学报*, 2005, 25(7): 1620-1625.
- [20] 马兴华,于振文,梁晓芳,等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 630-634.
- [21] 单艳红,杨林章,颜廷梅,等. 水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 115-121.
- [22] 谢潮生,林德宝,王永弟,等. 仪征土壤志[M]. 仪征: 仪征县土壤普查办公室, 1985. 1-3.
- [23] 姚永慧,潘志强,孙英君,等. ArcGIS 地统计分析实用指南[M]. 北京: ArcInfo 中国技术咨询与培训中心, 北京中科永生数据科技有限公司, 2002. 89-245.
- [24] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 94-96.
- [25] 王德建,林静慧,夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 16-18.
- [26] 连 纲,王德建,林静慧,等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1879-1883.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 第三版, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 1-275.

致谢:感谢江苏省仪征市土肥站王长松站长,孔祥英农艺师对于采样的帮助;感谢教剑英高级实验师对样品测定的指导。