

太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征

王鹏¹, 高超², 姚琪¹, 韩龙喜¹, 申霞¹

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

摘要: 在太湖丘陵地区选择 4 种有代表性的土地利用类型进行野外原位试验, 研究自然降雨条件下氮素随地表径流迁移的时空分布特征。试验结果表明, 随地表径流迁移的农田氮素以氨氮为主, 其“次降雨径流平均浓度”中位值占总氮的 44.5%, 亚硝态氮浓度最小, 仅占 1.8%。地表径流中的氮素浓度存在显著的季节性差异, 其分布主要受降水量、气温等气象条件以及农事活动的影响。总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的“多场降雨径流平均浓度”的时间变异性依次减小。菜地径流中总氮、氨氮和硝态氮以及竹林亚硝态氮的 SMC 值最高, 不同土地利用下氮素浓度的空间分布主要与施肥条件以及植被覆盖度有关。各氮素形态 SMC 值的空间变异性小于其时间变异性。旱地和菜地的氮素迁移通量大于板栗林和竹林, 径流量是导致迁移通量存在显著差异的主导因素。

关键词: 土地利用; 非点源污染; 太湖流域; 富营养化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)08-1671-05

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen Losses in Hilly Area of Taihu Lake

WANG Peng¹, GAO Chao², YAO Qi¹, HAN Long-xi¹, SHEN Xia¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Urban and Resource Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Four typical land uses in hilly area of Taihu Lake were studied on temporal and spatial distribution characteristics of nitrogen losses in surface runoff under natural rainfall through experiment in situ. The medium value of event mean concentration (EMC) of ammonia nitrogen (NH_4^+-N) which dominated agricultural N in surface runoff accounted for 44.5% of total nitrogen (TN), while nitrite nitrogen (NO_2^--N) accounted for 1.8%. Concentration of nitrogen in runoff had significantly seasonal variation which was related to meteorologic conditions such as rainfall, temperature, and agricultural activities. Temporal variabilities of site mean concentration (SMC) for TN, NH_4^+-N , NO_3^--N and NO_2^--N were decreased sequentially. The highest SMC value of TN, NH_4^+-N and NO_3^--N in upland runoff and NO_2^--N in bamboo grove were observed. The spatial distribution of nitrogen losses was determined by fertilizer application and vegetation coverage. Spatial variabilities for SMC of nitrogen were less than temporal variabilities. It was found that transportation fluxes of nitrogen in surface runoff from upland and vegetable plot were higher than that from chestnut orchard and bamboo forest which have significantly related to surface runoff volume.

Key words: land use; non point pollution; Taihu Lake Basin; eutrophication

非点源污染由于其发生的随机性、机理过程的复杂性、排放途径和污染物的不确定性以及污染负荷的时空变异性, 给研究和治理工作带来许多困难^[1]。在欧美发达国家, 由于对工业和城镇生活污水等点源污染进行了有效治理, 非点源污染已成为水环境的最大污染源, 其中来自农田的营养盐在非点源污染中所占比例最大^[2,3]。太湖流域人口密集, 是我国工农业最发达的地区之一, 自 20 世纪 80 年代以来, 随着流域经济的快速发展, 人多地少的矛盾日益突出, 对土地资源的利用强度逐渐加大, 化肥用量持续增长, 因此研究太湖流域尤其是太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征对于明确太湖富营养化的治理方向和目标具有重要意义。目前定量研究农田氮素迁移特征多采用以下 2 种方法。①选择

有代表性的小流域, 在河道上布设水质监测点, 通过分析河道水质变化间接反映农田氮素迁移特征^[4,5]。②建立人工控制的径流小区。这种方法又可细分为 2 种类型。一是利用人工降雨装置模拟自然降雨条件, 其优点在于试验条件易于控制, 便于研究不同地形特征和降雨条件对氮素迁移的影响。二是在自然降雨条件下, 进行长期野外原位试验^[6]。由于其试验条件更接近真实环境, 试验结果能更加准确地反映氮素在自然降雨-径流驱动下随地表径流的迁移特征。目前, 有关径流小区的试验研究多采用

收稿日期: 2005-12-15; 修订日期: 2006-04-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50239030); 江苏省自然科学基金项目(BK2001017)

作者简介: 王鹏(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非点源污染、水环境规划与评价, E-mail: hhw@hhu.edu.cn

人工降雨法^[7,8],采用长期野外原位试验进行自然降雨条件下氮素迁移特征的研究较少.此外,小区试验多集中于分析不同土地利用对氮素迁移的影响,即氮素迁移的空间分布特征,对其时间分布特征的研究鲜有报道.本文通过在宜兴梅林小流域选择4种有代表性的土地利用进行野外原位试验,揭示了自然降雨条件下地表径流中氮素浓度的频率分布特征,对比分析了各氮素形态随时间和空间的迁移特征.

1 材料与方法

1.1 流域及试验小区概况

梅林小流域位于宜兴市东南(31°20' N, 119°51' E),面积 122hm²,距太湖约 9km,属典型的太湖丘陵小流域.该地区全年温暖湿润,年均降雨量 1 150mm,年平均气温 15.5℃.土地利用类型主要有水稻田、旱地、茶园、竹林、板栗林、菜地和梨园等.其中水稻田主要分布在地势低平的地区,板栗林和竹林等分布于流域丘陵坡地.

在流域内选择 4 种有代表性的土地利用类型(板栗林、竹林、旱地和菜地)建立径流小区.每个径流小区设置 2 个重复,分别称为上池和下池.在小区末端设置地表径流收集池,用以计量地表径流量.旱

地小区主要种植玉米和油菜,菜地种植大豆和丝瓜.试验小区保持原有耕作方式,记录全年施用化肥和有机肥的品种、数量以及时间.各小区的面积、坡长、坡度以及施肥情况见表 1.

表 1 径流小区地形特征及施肥情况
Table 1 Topographic characteristics and fertilizer application rates of runoff plots

小区	面积/m ²	坡长/m	坡度/(°)	氮肥(以 N 计) /kg·hm ⁻²
板栗上池	61.54	12.2	4.22	96.0
板栗下池	61.54	12.2	6.55	127.5
竹林上池	42.81	11.5	7.38	144.0
竹林下池	42.81	11.5	7.53	144.0
旱地上池	42.81	11.5	4.67	486.0
旱地下池	42.81	11.5	4.94	486.0
菜地上池	42.81	11.5	2.90	320.0
菜地下池	42.81	11.5	2.49	373.5

1.2 采样及分析方法

采集各小区土壤样本,风干后过 1mm 筛,经草酸钠分散后采用吸管法分析颗粒级配,采用环刀法测定土壤容重,土壤 pH 值采用 pH 计在 V(水):m(土)=2.5:1 条件下测定,有机质采用重铬酸钾容量法-水合热法测定,总氮采用开氏消煮法,采用碱解扩散法测定水解氮.供试土壤理化性质见表 2.

表 2 供试土壤理化性质
Table 2 Physical and chemical characteristics of the soils studied

土壤	土壤容重 /g·cm ⁻³	土壤机械组成/%			pH	有机质 /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	水解氮 /g·kg ⁻¹
		1~0.05mm	0.05~0.001mm	<0.001mm				
板栗林	1.36	24	62.8	13.2	6.15	44.9	2.02	0.20
竹林	1.11	17.2	67.8	15.0	4.66	87.9	3.09	0.30
旱地	1.11	7.4	70.5	22.1	4.90	21.4	1.27	0.17
菜地	1.22	12.2	67.1	20.7	5.33	27.5	1.39	0.15

于 2004-01-10~2005-02-10 期间,收集了 9 场降雨的径流样本.停雨后测量各小区径流量,径流样品静置 3h 后,抽取上清液测定 TN 含量;水样经 0.45μm 滤膜过滤后,测定 NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 含量.TN 采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度法测定,NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的测定分别采用纳氏比色法、酚二磺酸法和 N-(1-萘基)乙二胺光度法.

1.3 降雨径流平均浓度

在任意一场降雨径流事件中,由于降雨强度的随机性变化较大,使得径流中污染物浓度也呈现显著变化.因此,通常采用“次降雨径流平均浓度”(event mean concentration, EMC)来反映某场降雨地表径流中的污染物平均浓度,其定义为污染物瞬

时浓度的流量加权平均值^[9].本次试验中径流收集池水样的污染物浓度即为 EMC.

由于不同场次降雨的强度随时间呈显著变化,而且流域内不同时期的施肥和植被覆盖情况各异,使得地表径流所引起的污染物浓度的随机变化不仅表现在一场降雨径流过程中,而且也表现为不同场次降雨径流 EMC 值的随机性变化.因此,对于多场降雨径流事件,往往采用“多场降雨径流平均浓度”(site mean concentration, SMC)代表某一地点的长期径流平均浓度^[10],以每场降雨的径流量为权重按式(1)计算 SMC.

$$SMC = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times EMC_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

式中, W_i 为第 i 场降雨的径流量 (m^3); EMC_i 为第 i 场降雨的“次降雨径流平均浓度” ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); n 为降雨场次。

2 结果与讨论

2.1 氮素随地表径流迁移的频率分布特征

由于不同场次降雨条件下随地表径流迁移的氮素浓度呈随机变化, 因此研究其频率分布特征对揭示其时空分布特征具有重要意义。图 1 为试验小区各氮素形态的 EMC 值箱式图, 反映了 4 种土地利用下多场降雨径流事件氮素 EMC 值的基本分布特征。图 1 中箱体的中线为 EMC 的中位值, 箱体的上、下 2 条线分别代表 P75 和 P25 对应的 EMC 值, 箱体的上、下 2 个短横线分别代表 EMC 的最大和最小值。

由图 1 可以看出, 4 种氮素形态的 EMC 中位值从大到小依次为总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮。由于亚硝态氮的化学性质不稳定, 易被氧化还原, 因此其 EMC 中位值最小, 仅为 0.14 mg/L , 占总氮的 1.8% 。氨氮的 EMC 中位值为 3.49 mg/L , 占总氮的 44.5% , 其浓度高于硝态氮的原因主要是 4 种土地利用的土壤均呈酸性, 抑制了硝化反应的进行。经过统计, 总氮和氨氮的 EMC 最大值分别达到 21.33 mg/L 和 16.97 mg/L , 而其最小值仅为 2.48 mg/L 和 0.72 mg/L , 可见这 2 种氮素形态 EMC 值的变化范围很大。

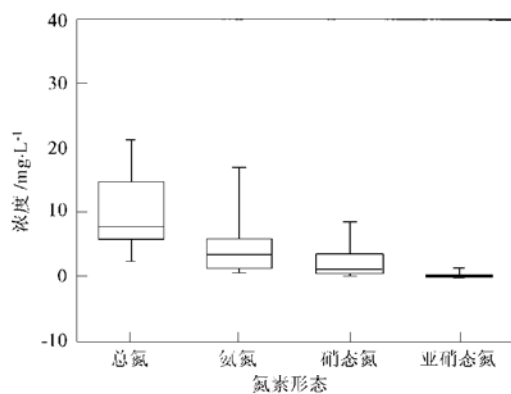


图 1 氮素 EMC 值箱式图

Fig. 1 Boxplot of EMC value of nitrogen

图 2 更加直观地描述了总氮 EMC 值在各浓度区间的频率分布情况。由图 2 可见, 总氮 EMC 值的频率分布存在 2 个峰值, 分别位于 $6 \sim 8 \text{ mg/L}$ 和 $16 \sim 18 \text{ mg/L}$ 之间, 其出现频次占样本总数的 27.8% 和 11.1% 。在对 2 个峰值的出现时间进行分析后发

现, 前 1 个峰值对应的降雨事件均出现在 6、7 月份, 而后 1 个峰值出现在 11 月至来年 1 月份, 说明秋冬季地表径流中总氮的平均浓度高于春夏季, 表现出鲜明的季节分布特征。这种差别是由以下 2 方面原因造成的, 一方面秋冬季降水量和地表径流量均少于春夏 2 季, 氮素在土壤中积累。另一方面, 秋冬季平均气温低于春夏季, 抑制了氨挥发以及硝化-反硝化的反应速度, 降低了土壤氮素损失量, 造成径流中氮素浓度偏高。

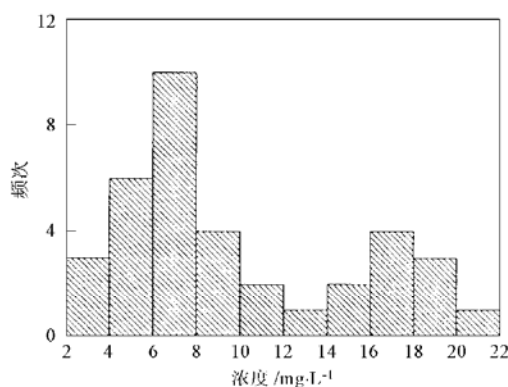


图 2 总氮 EMC 值频率分布直方图

Fig. 2 Frequency distribution histogram of EMC value of total nitrogen

2.2 氮素随地表径流迁移的时间分布特征

氮素浓度频率分布的分析表明, 受降水量和气温的影响, 径流中总氮的平均浓度存在明显的季节分布特征。为了进一步分析各氮素形态迁移的时间分布特征, 将 9 场降雨事件按发生时间分为春、夏、秋、冬 4 种, 计算每个季节各氮素形态的 SMC 值, 并绘制柱状对比图, 如图 3 所示。

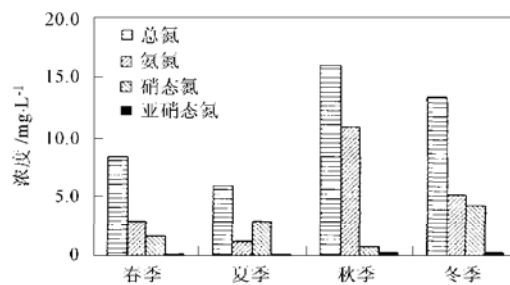


图 3 氮素 SMC 值的时间分布

Fig. 3 Temporal distribution of SMC value of nitrogen

与总氮相似, 秋冬季氨氮的平均浓度也显著高于春夏两季, 其中秋季地表径流中的氨氮 SMC 值最高, 为 10.9 mg/L , 是夏季氨氮 SMC 值的 9.5 倍。秋季氮素浓度偏高主要是由 2004-11-13 的降雨事

件造成的. 经过调查, 旱地和菜地小区在 10 月底至 11 月初施用了秋季基肥, 造成降雨前期土壤的氮素含量显著增加; 此外, 该场降雨的降雨量高达 61mm, 降雨-径流与表土的相互作用程度较强; 加上低温对氨挥发和硝化反应的抑制, 导致该场降雨径流的氨氮平均浓度达到 14.17 mg/L, 显著高于其它降雨事件.

由图 3 还可以发现, 夏季氨氮的 SMC 值小于硝态氮, 与其它季节 2 种氮素的关系正好相反, 这主要是由于夏季高温加速了氨挥发和硝化反应速度, 使土壤氨氮含量下降, 导致地表径流中的氨氮浓度偏低. 由以上分析可以看出, 地表径流中氮素浓度的时间分布主要受降水量、气温等气象条件以及农事活动的影响.

为了检验各氮素形态浓度随时间的变异性, 对不同季节总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮的 SMC 值进行标准差分析, 结果显示 4 种氮素形态 SMC 值的标准差分别为 4.58、4.25、1.53 和 0.064, 说明其时间变异性呈依次减小的趋势.

2.3 氮素随地表径流迁移的空间分布特征

氮素迁移的空间分布特征主要表现在不同土地利用方式对氮素随地表径流迁移的影响, 是生态环境对土地利用/土地覆被变化 (land use/cover change, LUCC) 最重要的响应之一^[11]. 通过对比不同土地利用下地表径流中氮素浓度的差异, 可以明确在太湖流域丘陵地区, LUCC 对氮素浓度空间分布的影响程度. 图 4 给出了 4 种土地利用下各氮素形态 SMC 值的对比图. 由图 4 可以看出, 总氮 SMC 值从大到小依次为菜地、旱地、板栗林和竹林, 这与不同土地利用下的施肥量和植被覆盖度有关. 由表 1 可见, 一方面菜地和旱地的施肥强度高于板栗林和竹林, 另一方面竹林和板栗林的地表被大量凋谢物覆盖, 植被覆盖度较高, 雨滴击溅产生的能量被大大削弱, 有效减轻了降雨-径流与表土的相互作用程度. 4 种土地利用的氨氮 SMC 值基本相当, 其中菜地最大, 竹林最小; 而硝态氮 SMC 值的差异相对较大, 浓度最高的仍然为菜地, 达到 3.6 mg/L, 是板栗林的 2.5 倍. 竹林亚硝态氮的 SMC 值高于其余 3 种土地利用, 为 0.28 mg/L, 占总氮的 4%.

由图 4 还可以发现, 板栗林、竹林、旱地和菜地的氨氮与硝态氮 SMC 比值存在较大差异, 分别为 2.8、1.7、1.2 和 1.2. 板栗林和竹林的 SMC 比值相对较高, 这可能是因为竹林和板栗林地表的大量凋谢物使土壤的通气条件较差, 抑制了硝化反应. 以上

分析表明地表径流中氮素浓度的空间分布主要与施肥条件以及植被覆盖度有关.

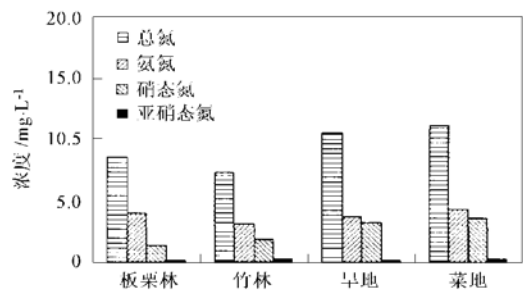


图 4 氮素 SMC 值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of SMC value of nitrogen

为了对比地表径流中氮素浓度时间与空间变异性, 计算了 4 种土地利用下各氮素形态浓度的标准差. 结果显示总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮 SMC 值的标准差分别为 1.72、0.53、0.99 和 0.059, 均小于不同季节各氮素形态 SMC 值的标准差, 尤其是总氮和氨氮的标准差仅为后者的 37.6% 和 12.5%, 说明 4 种氮素形态 SMC 值的空间变异性小于其时间变异性, 即在环太湖丘陵地区, 降水量和气温等气候条件对地表径流中氮素平均浓度的影响程度大于土地利用的影响.

迁移通量指随地表径流迁移的单位面积氮素流失量. 通过对比不同土地利用下的迁移通量, 有利于明确影响氮素迁移的主导因素, 对控制农业非点源污染具有重要意义. 图 5 对比了 4 种土地利用在 9 场降雨条件下各氮素形态的总迁移通量. 由图 5 可见, 旱地的总氮迁移通量最大, 其次为菜地, 板栗林次之, 竹林最小, 不同土地利用下总氮的迁移通量介于 164.3~806.28 mg/m² 之间, 氨氮和硝态氮迁移通量的大小排列与总氮相似. 其中旱地 4 种氮素形态的迁移通量分别为竹林的 4.9、4.1、5.9 和 1.8 倍. 由定义可知, 迁移通量等于径流中氮素浓度与径

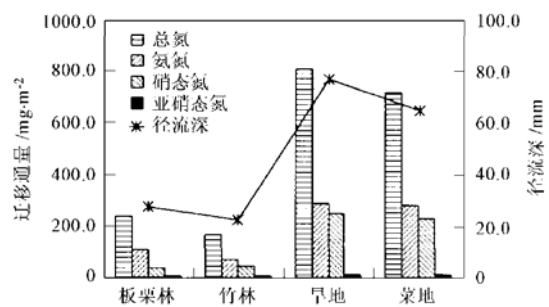


图 5 氮素迁移通量的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of transport fluxes of nitrogen

流深的乘积. 通过比较图 4 和图 5 可以发现, 与氮素平均浓度相比, 不同土地利用的氮素迁移通量与径流深有更好的响应关系, 这说明不同土地利用下的径流量差异是导致氮素迁移通量存在显著差异的主导因素.

3 结论

在环太湖丘陵地区进行的野外原位试验结果表明, 随地表径流迁移的农田氮素以氨氮为主, 其“次降雨径流平均浓度”(EMC)的中位值占总氮的 44.5%, 亚硝态氮浓度最小, 占 1.8%. 秋冬季各氮素形态的平均浓度高于春夏季, 表现出鲜明的季节分布特征. 地表径流中氮素浓度的时间分布主要受降水量、气温等气象条件以及农事活动的影响, 而其空间分布主要与施肥条件以及植被覆盖度有关. 各氮素形态平均浓度的空间变异性小于其时间变异性, 即在环太湖丘陵地区, 降水量和气温等气候条件对地表径流中氮素平均浓度的影响程度大于土地利用的影响. 9 场降雨条件下的总氮迁移通量介于 164.3~806.28 mg/m², 其中旱地最高, 竹林最小, 径流量是导致氮素迁移通量存在显著差异的主导因素.

致谢: 宜兴市宜城镇农技站的吴国鞋先生承担了大量的田间管理工作, 在此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] Novotny V, Chesters G. Handbook of nonpoint pollution: sources and management [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1981. 81~103.
- [2] Tim U S, Jolly R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/ water quality model [J]. J. Environ. Qual., 1994, 23(1): 25~35.
- [3] Carpenter S R, Carcao N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559~568.
- [4] 杨金玲, 张甘霖, 张华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响 [J]. 环境科学, 2003, 24(1): 16~23.
- [5] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506~510.
- [6] Barton A P, Fullen M, Mitchell D J, et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 104(2): 343~357.
- [7] Kumar R, Ambasht R S, Srivastava A, et al. Reduction of nitrogen losses through erosion by *Leonotis nepetaefolia* and *Sida acuta* in simulated rain intensities [J]. Ecological Engineering, 1997, 8(3): 233~239.
- [8] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程 [J]. 地理学报, 2002, 57(4): 389~396.
- [9] Shelley P E, Driscoll E D, Sartor J D. Probabilistic characterization of pollutant discharges from highway stormwater runoff [J]. Sci. of the Total Envir., 1987, 59(3): 401~410.
- [10] Thomson N R, McBean E A, Snodgrass W, et al. Sample size needs for characterizing pollutant concentrations in highway runoff [J]. Journal of Envir. Engrg., 1997, 123(10): 1061~1065.
- [11] Turner II B L. The sustainability principle in global agendas: implication for understanding land use/land cover change [J]. The Geographical Journal, 1997, 163(2): 133~140.