

鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征

余进祥¹, 赵小敏¹, 吕 珩², 刘娅菲²

(1. 江西农业大学 农学院 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 农业部双季稻生理生态与栽培重点开放实验室 江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 江西省农业环境监测站, 江西 南昌 330046)

摘要: 定点监测 2008年鄱阳湖流域水田、水旱轮作、旱地、菜地、桔园、脐橙园和茶园等优势农业利用方式的田间降雨量、径流量及氮、磷的输出形态和负荷, 分析不同农业利用方式的氮、磷输出特征和年输出负荷。结果表明: 鄱阳湖流域不同农业利用方式中, 水旱轮作、旱地、脐橙园、水田、菜地、桔园和茶园等农业利用方式的总氮年输出总负荷分别为 45.3, 44.8, 42.3, 39.7, 35.8, 25.7, 20.0 kg/hm², 其中基础输出负荷分别为 34.9, 30.6, 31.2, 29.9, 21.6, 17.8, 13.1 kg/hm², 本年度输出负荷分别为 10.4, 14.2, 11.1, 9.8, 14.2, 8.0, 6.9 kg/hm²; 总磷年输出总负荷分别为 4.7, 16.4, 25.6, 7.8, 11.7, 18.8, 3.1 kg/hm², 其中基础输出负荷分别为 2.9, 8.8, 7.0, 8.0, 5.4, 5.0, 1.6 kg/hm², 本年度输出负荷分别为 1.7, 7.6, 18.7, 2.5, 6.7, 10.8, 1.5 kg/hm²。颗粒态氮和颗粒态磷是农田地地表径流水相氮、磷输出的主要形态, 分别占 84.1% ~ 90.3% 和 78.7% ~ 92.2%, 但其输出比例都低于人工降雨模拟的研究结果。

关键词: 鄱阳湖流域; 农业利用方式; 氮; 磷; 输出特征; 输出负荷

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 2286(2010)02 - 0394 - 09

Transportation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Various Land - uses in the Poyan Lake Watershed

YU Jin-xiang^{1*}, ZHAO Xiao-min¹, LV Bei², LIU Ya-fei²

(1. College of Agronomy/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Key Laboratory of Physiology, Ecology and Cultivation of Double Cropping Rice, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding of Jiangxi Province, JAU, Nanchang 330045, China; 2. Agricultural Environment Monitoring Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 30046, China)

Abstract: The nutrients transportation characteristics in various land - uses were analyzed by monitoring precipitation, runoff, nutrient load and transportation form in the Poyan Lake watershed in 2008. As far as the load of TN was concerned, the total transportation loads of TN in paddy - arid rotation, orange orchard, paddy land, arid land, vegetable land, mandarin orchard and tea garden, were 45.3, 44.8, 42.3, 39.7, 35.8, 25.7, and 20.0 kg/(hm² · year), respectively. Meanwhile, the basic transportation loads were 34.9, 30.6, 31.2, 29.9, 21.6, 17.8, and 13.1 kg/(hm² · year), respectively, the transportation loads from fertilization were 10.4, 14.2, 11.1, 9.8, 14.2, 8.0, and 6.9 kg/(hm² · year), respectively. As far as the load of TP was concerned, the total transportation loads of TP in those land - uses were 4.7, 16.4, 25.6, 7.8, 11.7,

收稿日期: 2009 - 12 - 31 修回日期: 2010 - 03 - 12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30960186)

作者简介: 余进祥 (1975 -), 男, 博士生, 主要从事农业生态环境保护研究, E-mail: Yu-jinxiang@hotmail.com.

18.8, and 3.1 kg/(hm² · year), respectively. Meanwhile, the basic transportation loads were 2.9, 8.8, 7.0, 8.0, 5.4, 5.0 and 1.6 kg/(hm² · year), respectively, the transportation loads from fertilization were 1.7, 7.6, 18.7, 2.5, 6.7, 10.8 and 1.5 kg/(hm² · year), respectively. The particle nitrogen (PN) and the Particle phosphorus (PP) were the main nutrient transportation forms in agricultural runoff, accounting for 84.1% ~ 90.3% of TN and 78.7% ~ 92.2% of TP which were less than those of artificial rainfall simulation trials.

Key words: the Poyan Lake watershed; land - use; nitrogen; phosphorus; transportation characteristic; transportation load

农业非点源污染成为全球水环境问题的主要成因^[1],但非点源污染物质排放的随机性、间歇性、滞后性和复杂性等特点,导致非点源污染的监测和评估比较困难^[2]。鄱阳湖是世界重要湿地和候鸟栖息地,是我国第一大淡水湖,它汇纳江西省境内赣江、抚河、信江、饶河、修河等 5 大河流及环湖小流域来水,流域面积占全省国土面积的 92.6%,是江西省农业非点源污染的最终接纳水体。近几年来,鄱阳湖水体富营养化程度加剧,流域农业非点源污染呈恶化趋势^[3]。目前,流域尺度的非点源污染监测主要研究手段是空间模型模拟^[4],田间尺度的研究方法则多利用野外或室内人工降雨试验获得有关参数以开展模拟研究^[5-9]。然而,农田营养盐输出过程,除了受土壤质地、坡长、坡度等地形因子影响,还与降雨条件、耕作方式、施肥量及其他农业管理措施等因子相关。在自然界各种因子交互作用的非线性系统中,从微观上抽象瞬时雨强和瞬时营养盐输出的关系很难有明显的直接规律。此外,自然降雨不同于人工降雨,次降雨下雨强变化的连续性和不稳定性,以及异次降雨间特性和相异性。因此,人工降雨模拟很难精确阐述自然条件下农田尺度内降雨、径流和营养盐输出的长期关系,而且人工降雨模拟获得参数用于流域尺度非点源污染研究,其变量参数偏差累积会导致研究结果的不可信。

本研究在鄱阳湖流域优势农业产业区,选择土壤、耕作方式和施肥等具有代表性的农田,开展自然降雨条件下,为期 1 年的降雨、径流和氮磷等营养盐输出的定点、实地监测和定量分析,分析流域内不同耕作方式、不同施肥方式和不同种植模式下农田氮、磷等营养盐的输出形态、负荷和特征,测定不同农业利用下农田氮磷输出系数,为鄱阳湖流域农业非点污染的监测、评估和控制提供科学参数。

1 方法与材料

1.1 监测点的选择

在鄱阳湖流域内选择土壤类型、作物种类、种植制度、耕作方式、栽培模式等具有代表性的 13 个典型地块作为监测点,其中水田监测点位 3 个,分别位于赣鄱平原、赣抚平原和吉泰盆地等 3 个水稻优势产区;水旱轮作监测点位 3 个,分别位于永丰、章贡和丰城等水旱轮作典型区域;旱地监测点位 2 个,分别位于赣北棉花优势产区和赣中花生优势产区;果园监测点位 2 个,分别位于南丰蜜桔主产区和赣南脐

表 1 监测点位具体信息

Tab 1 Data of the monitoring site

监测点位 Monitoring sites	地址 Location	经纬度 Longitude and latitude	地貌类型 Topography	坡度 Scope	土壤类型 Soil group	土壤质地 Soil texture	肥力水平 Fertilizer level	土地利用方式 Land - use pattern
JXS01	余江县水稻原种场农科所	E116°50'39.1"N 28°12'9.6"E	平原	0	灰潮砂泥田	砂土	中	水田
JXS02	南丰县琴城镇茅店村	E116°32'23.6"N 27°13'56.2"E	山地	9	红泥质砖红壤	轻壤	中	果园
JXS03	兴国县埠头乡松林村山田组	E115°21'14.3"N 26°16'20.4"E	丘陵	26	红泥质砖红壤	砂壤	低	果园
JXS04	章贡区湖边镇梨园下村组	E114°55'40.2"N 25°50'30"E	丘陵	0	黄泥砂田	重壤	高	水旱轮作
JXS05	泰和县澄江镇新池村	E114°49'24.4"N 26°48'48.9"E	平原	0	水南紫泥田	中壤	中	水田
JXS06	进贤县罗溪镇莲塘村	E116°10'45.2"N 28°23'43"E	丘陵	10	黄红泥土	中壤	中	旱地
JXS07	乐平市镇桥镇镇桥村黄村组	E117°3'4.5"N 28°54'19.2"E	平原	0	赤红壤性土	砂壤	中	旱地
JXS08	瑞昌市大塘村肖家组	E115°38'25.2"N 29°38'52.1"E	平原	0	潮黄砂土	砂壤	中	旱地
JXS09	永修县虬津镇麻坛村	E115°22'30.2"N 28°53'20"E	平原	0	灰潮砂泥田	中壤	高	旱地
JXS10	南昌县向塘镇高田村	E115°58'57.6"N 28°4'4.3"E	平原	0	潮砂泥田	砂土	中	水田
JXS11	婺源县紫阳镇岭下村	E117°47'40.1"N 29°15'40.5"E	丘陵	16	紫砂泥	砂壤	中	茶园
JXS12	丰城市良种场	E115°11'20.2"N 28°30'16"E	平原	0	水南紫泥田	中壤	中	水旱轮作
JXS13	永丰县坑头镇马围村马围组	E115°48'56.2"N 26°55'52"E	平原	0	灰潮砂泥田	中壤	高	水旱轮作

橙主产区;蔬菜地监测点位 2 个,分别位于永修、乐平等蔬菜生产优势区;茶园监测点位 1 个,位于婺源绿茶主产区。各点位具体信息见表 1。

1.2 试验设计

设置对照和常规耕作 2 个处理,3 次重复,共 6 个小区,其中常规处理 (N)按当地农民的生产水平进行正常管理(施肥水平见表 2),对照处理 (CK)不施肥、不施农药,其他耕作措施与常规处理相同。

小区为长方形,水田、旱地和菜地的小区面积 24 m^2 ,规格 $4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$;果园和茶园小区面积 32 m^2 ,规格 $4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 。小区间和周边保护行用田埂分隔,田埂为砖和混凝土浇筑的 50 cm 墙体,其中地下部分 30 cm ,地上部分 20 cm 。径流池规格 $0.8 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,配备抽排池、排水槽、标杆尺、径流收集管(水田和水旱轮作利用方式设 2 个集水口,分别用于晒田期、休闲期和灌溉期)。径流池墙体用混凝土浇筑,并做防渗处理,确保各个径流池、集排水接口都不漏水、不渗水,同时,每个径流池加盖,防止雨水直接进入径流内(详细内容见《全国地表径流监测技术规程》)。

表 2 监测点位施肥水平

Tab 2 The fertilization rate of monitoring sites

kg/hm²

监测点位 Monitoring sites	有机肥 Organic fertilizer			化肥 Mineral fertilizer			施肥总量 Total fertilizer		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
JXS01				274.5	33	72	274.5	33	72
JXS02				175.5	76.5	118.5	175.5	76.5	118.5
JXS03	258	45	150	472.5	94.5	180	730.5	139.5	328.5
JXS04				259.5	36	153	259.5	36	153
JXS05				262.5	69	130.5	262.5	69	130.5
JXS06	3	1.5	6	433.5	58.5	106.5	436.5	61.5	111
JXS07	27	3	10.5	139.5	15	136.5	166.5	19.5	147
JXS08	39	3	6	231	13.5	60	270	15	66
JXS09				225	97.5	186	225	97.5	186
JXS10				285	49.5	213	285	49.5	213
JXS11				180			180		
JXS12				273	73.5	139.5	273	73.5	139.5
JXS13	88.5	13.5	19.5	241.5	157.5	151.5	330	171	171

1.3 监测内容

1.3.1 基础土样品分析 试验前,分 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 采集、制备基础样品,确保每个样品不少于 10.0 kg ,风干后测定有机质、总氮、总磷、速效磷、碱解氮、pH 值。同时,分 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 采集新鲜土壤样品 1.0 kg ,置于封口袋中,冷冻保存,用于测试土壤硝态氮。监测周期结束后,用土钻采集各小区 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 样品,土样分 2 份,其中 1 份风干,另 1 份冷冻保存,每份不少于 1.0 kg ,分析指标同试前基础土样。

1.3.2 降雨量监测 在每个监测点位旁安装量雨器 1 台,监测各点位 2008 全年的自然降雨次数和单次降雨量。一般每天早上 9:00 记录降水量,作为前 1 d 24 h 的降水量。降水大于 5 mm ,采集降水水样 2 个,1 个供分析测试用,1 个作为备用,每个水样不少于 500 mL 。水样测试指标分别为总氮 (TN)、硝态氮 ($\text{NO}_3 - \text{N}$)、铵态氮 ($\text{NH}_4 - \text{N}$)、总磷 (TP)、pH 等。

1.3.3 径流量监测 每次暴雨停止后 5 h ,测量径流池内径流深度,计算各小区的径流量(表 3)。水田和水旱轮作点位,在水田的灌水区,关闭下排水口,把上排水口调至与灌溉水平齐位置;休闲期和晒田期,则关闭上排水口,打开下排水口。

在记录径流量后即采集径流水样。采样前,先用清洁工具充分搅匀径流池中径流水,然后用清洁容器在径流池不同部位、不同深度多点位取样(至少 8 点),置于清洁塑料桶或盆中。用清洁量筒准确量取 2000 mL 径流水样,用定量滤纸过滤,滤液分装于 2 个样品瓶中,每个水样不少于 500 mL ,其中 1 个

供分析测试用,另 1 个作为备用;泥沙烘干、称重,作为侵蚀泥沙样品。测试指标包括泥沙的总氮和总磷,径流水总氮、硝态氮、铵态氮、总磷、可溶性磷、pH 值。

表 3 径流监测情况

Tab 3 Rainfalls data from monitoring sites

监测点位 Monitoring sites	土地利用方式 Land - use pattem	暴雨监测次数 / 次 Rainfall times	监测径流平均量 / L Average runoff rate	监测降雨量 / mm Rainfall rate
JX01	水田	21	18 269. 2	1 189
JX02	果园	19	15 480. 0	1 112
JX03	果园	20	13 765. 8	1 193
JX04	水旱轮作	25	18 183. 4	1 154
JX05	水田	20	18 887. 3	1 174
JX06	旱地	20	15 413. 7	1 140
JX07	菜地	18	11 782. 3	1 031
JX08	旱地	16	15 091. 8	1 088
JX09	菜地	21	14 979. 9	1 107
JX10	水田	20	15 937. 9	977
JX11	茶园	19	10 594. 5	1 392
JX12	水旱轮作	19	19 741. 2	1 257
JX13	水旱轮作	19	19 220. 9	1 218

1.4 测试方法

总氮测定用碱性过硫酸钾消解分光光度法 (GB11894 - 89);总磷测定用钼酸铵分光光度法 (GB11893 - 89);铵态氮测定用靛酚蓝法 (GB17378. 4);硝态氮用酚二磺酸分光光度法 (GB/T7480 - 87);水溶性磷测定用《水和废水监测分析法》(第 4 版);pH 测定用电极法。数据统计全部使用 SPSS15. 0 软件。

1.5 监测地块土壤肥力状况

各监测地块土壤肥力见表 4。

表 4 各监测地块肥力水平

Tab 4 The fertilization level of monitoring sites

监测点位 Monitoring sites	pH	有机质 / (g · kg ⁻¹) Organic matter	全氮 / (g · kg ⁻¹) TN	全磷 / (g · kg ⁻¹) TP	铵态氮 / (mg · kg ⁻¹) NH ₄ - N	硝态氮 / (mg · kg ⁻¹) NO ₃ - N	可溶性磷 / (mg · kg ⁻¹) DP
JX01	5. 67	25. 20	0. 88	0. 2	0. 49	30	14. 66
JX02	5. 72	31. 50	2. 00	0. 51	0. 42	44	15. 29
JX03	4. 94	36. 22	0. 70	0. 26	0. 84	27	14. 48
JX04	6. 21	41. 33	0. 35	0. 15	0. 30	8	14. 67
JX05	6. 56	32. 59	0. 68	0. 36	0. 54	13	19. 31
JX06	6. 71	25. 21	1. 14	0. 12	0. 68	20	18. 85
JX07	6. 42	13. 87	1. 13	0. 05	0. 76	11	17. 62
JX08	5. 38	10. 04	0. 68	0. 25	0. 17	14	13. 51
JX09	6. 01	19. 2	1. 51	0. 12	0. 87	12	12. 44
JX10	6. 3	11. 94	0. 87	0. 17	0. 66	4	10. 90
JX11	5. 01	13. 23	0. 83	0. 51	0. 37	8	2. 62
JX12	6. 37	14. 69	0. 51	0. 08	0. 40	10	2. 42
JX13	4. 83	3. 67	0. 44	0. 14	0. 46	15	2. 26

2 结果与分析

2.1 氮的输出特征

不同农业利用方式中(表 5),水旱轮作、旱地、脐橙园、水田、菜地、桔园和茶园等农业土地利用方式的总氮年输出总负荷(常规处理)分别为 45.3, 44.8, 42.3, 39.7, 35.8, 25.7, 20.0 kg/hm²,总氮年基础输出负荷(对照处理)分别为 34.9, 30.6, 31.2, 29.9, 21.6, 17.8, 13.1 kg/hm²,施肥措施导致农田总氮本年度输出负荷(差值)分别为 10.4, 14.2, 11.1, 9.8, 14.2, 8.0, 6.9 kg/hm²。可见,鄱阳湖流域不同农业利用方式中,总氮的基础输出负荷明显高于年度输出负荷,是农田总氮地表输出负荷的主要来源。耕作强度较大的水旱轮作、旱地、脐橙、水田等总氮基础输出负荷较高;菜地、桔园、茶园等耕作强度小、地表覆盖较好的利用方式总氮基础输出负荷较低,施肥水平较高的菜地和脐橙园等总氮年度输出负荷明显高于其他农业利用方式。

表 5 不同土地利用方式氮、磷输出负荷

Tab 5 Transportation load of N and P from different land-use

土地利用方式 Land-use pattern	处理 Treatment	总氮 / (kg · hm ⁻²) TN	硝态氮 / (kg · hm ⁻²) NO ₃ - N	铵态氮 / (kg · hm ⁻²) NH ₄ - N	可溶性氮 / (kg · hm ⁻²) DN	颗粒态氮 / (kg · hm ⁻²) PN	总磷 / (kg · hm ⁻²) TP	可溶性磷 / (kg · hm ⁻²) DP	颗粒态磷 / (kg · hm ⁻²) PP
水田 Paddy land	CK	29.9	1.5	1.5	3.0	26.9	5.4	1.0	4.3
	N	39.7	2.8	2.6	5.4	34.3	7.8	1.6	6.2
	D	9.8	1.3	1.1	2.5	7.4	2.5	0.6	1.9
水旱轮作 Paddy - arid rotation	CK	34.9	2.4	1.3	3.7	31.2	2.9	0.5	2.4
	N	45.3	3.4	2.1	5.6	39.8	4.7	0.9	3.7
	D	10.4	1.0	0.8	1.8	8.6	1.7	0.4	1.3
旱地 Arid land	CK	30.6	1.2	1.3	2.5	28.1	8.8	1.7	7.1
	N	44.8	2.9	2.1	5.0	39.8	16.4	3.0	13.4
	D	14.2	1.7	0.8	2.5	11.7	7.6	1.3	6.3
菜地 Vegetable land	CK	21.6	1.6	0.8	2.4	19.1	5.0	0.8	4.2
	N	35.8	4.1	1.6	5.7	30.1	11.7	2.1	9.6
	D	14.2	2.5	0.8	3.3	11.0	6.7	1.3	5.4
脐橙园 Orange orchard	CK	31.2	1.0	1.1	2.2	29.0	7.0	0.7	6.3
	N	42.3	1.7	2.4	4.1	38.2	25.6	2.0	23.6
	D	11.1	0.6	1.3	1.9	9.2	18.7	1.3	17.3
桔园 Tangerine orchard	CK	17.8	0.9	1.1	2.0	15.7	8.0	1.2	6.8
	N	25.7	1.7	2.0	3.7	22.0	18.8	2.7	16.1
	D	8.0	0.8	0.9	1.7	6.3	10.8	1.6	9.3
茶园 Tea garden	CK	13.1	0.9	0.7	1.6	11.5	1.6	0.3	1.3
	N	20.0	1.7	1.3	3.0	17.0	3.1	0.6	2.5
	D	6.9	0.8	0.6	1.4	5.5	1.5	0.3	1.2

CK:对照;N:常规处理;D:差值。

CK: control; N: normal treatment; D: difference

不同农业利用方式中,农田径流中颗粒态氮(PN)的输出负荷都大大高于可溶性氮(DN)的输出负荷,占总氮(TN)的 84.1%~90.3%,颗粒态氮(PN)是地表径流水相氮素输出的主要形态。可溶性氮中硝态氮(NO₃-N)仅占 4.0%~11.5%,铵态氮(NH₄-N)占 4.5%~7.8%,而且不同农业利用方式中的差异较大,这与人工模拟降雨研究的不同农业利用方式总氮输出形态特征相似^[6-7,11-13]。分析其原因:虽然径流对表土泥沙冲刷是均匀的,对小于 1 mm 粒级的土粒无选择性,但在侵蚀区表面存在雨滴剥离分散团聚体和径流选择搬运细颗粒的同时,还存在较粗颗粒沉积甚至覆盖在侵蚀表面的过程,引起被选择搬运的侵蚀泥沙变粗,最终导致不同农业利用方式侵蚀泥沙粒径分布特征,即 1~0.05 mm 与 0.05~0.01 mm 两个粒径都接近 80%^[14]。而且土壤中氮素主要以有机氮形态存在,它一般占全氮的 95%以上,土壤中有有机氮很多是和无机胶体,甚至和非胶体的矿质土粒密切结合而成复合体形态的氮^[6]。侵蚀泥沙颗粒分析结果(表 6)也表明,不同农业利用方式中,流失泥沙中大颗粒(>0.01 mm)占到 80%以上。因此,

不同农业利用方式农田中,径流对土壤颗粒的选择性搬运作用对农田总氮的输出负荷和输出形态影响较大,总氮输出形态主要是与侵蚀泥沙中大颗粒(>0.01 mm)结合的颗粒态氮,大粒径土壤颗粒(>0.01 mm)应是径流中氮的主要运输载体。

从总氮的输出特征(表 7)分析,常规处理的硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄-N)等可溶性氮输出比例明显高于对照处理;而且水田、桔园和脐橙园等田间可溶性氮输出以铵态氮为主(NH₄-N),水旱轮

表 6 流失泥沙的颗粒分析

Tab 6 Particle analysis of sediments

土地利用方式 Land - use pattern	分级 /mm Group			
	1 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	< 0.005
水田 addy land	34.6	48.7	9.3	7.4
水旱轮作 Paddy - arid rotation	37.8	46.5	8.4	7.3
旱地 Arid land	41.2	45.9	7.6	5.3
菜地 Vegetable land	42.3	43.6	7.9	6.2
茶园 Tea garden	53.4	31.8	10.5	4.3
桔园 Tangerine orchard	46.7	39.4	9.2	3.9
橙园 Orange orchard	54.1	30.2	7.9	5.8

表 7 不同利用方式 N、P 的输出特征

Tab 7 Transportation characteristics of N and P from land - use pattern

土地利用方式 Land - use pattern	处理 Treatment	%					
		硝态氮 NO ₃ - N	铵态氮 NH ₄ - N	可溶性氮 DN	颗粒态氮 PN	可溶性磷 DP	颗粒态磷 PP
水田 Paddy land	CK	5.0	5.0	10.0	90.0	18.5	79.6
	N	7.1	6.5	13.6	86.4	20.5	79.5
	D	13.3	11.2	25.5	75.5	24.0	76.0
水旱轮作 Paddy - arid rotation	CK	6.9	3.7	10.6	89.4	17.2	82.8
	N	7.5	4.6	12.4	87.9	21.3	78.7
	D	9.6	7.7	17.3	82.7	23.5	76.5
旱地 Arid land	CK	3.9	4.2	8.2	91.8	19.3	80.7
	N	6.5	4.7	11.2	88.8	18.3	81.7
	D	12.0	5.6	17.6	82.4	17.1	82.9
菜地 Vegetable land	CK	7.4	3.7	11.1	88.4	16.0	84.0
	N	11.5	4.5	15.9	84.1	17.9	82.1
	D	17.6	5.6	23.2	77.5	19.4	80.6
茶园 Tea garden	CK	3.2	3.5	7.1	92.9	10.0	90.0
	N	4.0	5.7	9.7	90.3	7.8	92.2
	D	5.4	11.7	17.1	82.9	7.0	92.5
桔园 Tangerine orchard	CK	5.1	6.2	11.2	88.2	15.0	85.0
	N	6.6	7.8	14.4	85.6	14.4	85.6
	D	10.0	11.3	21.3	78.8	14.8	86.1
脐橙园 Orange orchard	CK	6.9	5.3	12.2	87.8	18.8	81.3
	N	8.5	6.5	15.0	85.0	19.4	80.6
	D	11.6	8.7	20.3	79.7	20.0	80.0

CK:对照;N:常规处理;D:差值。

CK: control; N: normal treatment; D: difference

作、旱地、菜地和茶园则以硝态氮 ($\text{NO}_3 - \text{N}$) 为主。此外,因农田施肥措施而引起的总氮本年度输出负荷中,硝态氮 ($\text{NO}_3 - \text{N}$) 和铵态氮 ($\text{NH}_4 - \text{N}$) 输出比例都高于基础输出负荷和输出总负荷,水旱轮作、旱地、水田、桔园、桔园、菜地和茶园等农业土地利用方式的可溶性氮输出比例分别为 17.3%、17.6%、25.5%、20.3%、21.3%、23.2% 和 17.1%。显然,农业生产中,土地利用方式不同,其可溶性氮输出形态特征也存在差异,而施肥措施明显提高了农田中铵态氮和硝态氮等可溶性氮的输出负荷,在一定程度上影响氮的输出形态特征。

纵观每次暴雨总氮的输出特征(表 8),水田、水旱轮作、旱地、菜地、茶园、桔园和脐橙园等可溶性氮(DN) 单次暴雨输出比例分别为 4.6% ~ 67.4% ($n=20$)、2.3% ~ 57.5% ($n=25$)、5.8% ~ 58.3% ($n=16$)、7.0% ~ 83.2% ($n=18$)、5.5% ~ 42.2% ($n=19$)、9.4% ~ 40.7% ($n=19$) 和 3.8% ~ 25.0% ($n=20$),其中水田、桔园和脐橙园中铵态氮 ($\text{NH}_4 - \text{N}$) 输出比例差异较大;水旱轮作和菜地中硝态氮 ($\text{NO}_3 - \text{N}$) 输出比例差异较大,茶园、旱地中铵态氮 ($\text{NH}_4 - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3 - \text{N}$) 输出比例差异不大。分析原因:降雨初期,侵蚀作用处于主导地位,营养盐随颗粒进入径流,导致径流中营养盐以颗粒态为主;到降雨中后期,由于土壤中细颗粒物减少,侵蚀作用减弱,而径流量持续增大,径流中的稀释作用开始起主导地位,从而导致颗粒态的营养盐浓度降低,而可溶性营养盐的浓度变化不大,这可能会导致最终径流中可溶性营养盐输出形态不一致^[15]。也就是说,每次暴雨的持续时间、降雨强度的连续性和稳定性、土壤中的可溶性氮(DN)含量的不同,导致总氮的输出形态特征也不同。即降雨持续时间越长,土壤中可溶性氮含量越高,径流中可溶性氮输出比例越高;相反,降雨强度越大,持续时间越短,颗粒态氮的输出比例越高。可溶性氮(DN)与区径流量呈显著相关($r=0.9572, n=1562$),也证明了单次暴雨间可溶性氮(DN)变异较大的结果。但是单次暴雨间农田氮的输出形态特征差异并没有改变全年农田氮素输出形态以颗粒态氮为主的特征,这主要是因为可溶性氮输出比例较高的暴雨次数很少,只是出现在施肥时期。说明鄱阳湖流域农田氮素的输出负荷和输出形态的主要影响因子还是径流对土壤颗粒的选择性搬运作用,即侵蚀泥沙径粒分布特征。暴雨持续时间、径流量、耕作和施肥等措施影响单次暴雨的输出负荷和输出形态,显著增加总氮本年度输出负荷和可溶性氮输出比例,导致总氮总输出负荷中可溶性氮输出比例高于人工降雨模拟结果。同时,种植模式的条件相同,春耕前期和冬闲季节常规处理与对照处理总氮的输出负荷相近;生产季节,常规处理总氮输出负荷明显高于对照处理,是年输出负荷的主要阶段。

表 8 不同利用方式单次暴雨 N、P 输出特征

Tab 8 Transportation characteristics of N and P for every rainfall

土地利用方式 Land - use pattem	暴雨监测 次 Rainfall times	硝态氮 $\text{NO}_3 - \text{N}$	铵态氮 $\text{NH}_4 - \text{N}$	可溶性氮 DN	颗粒态氮 PN	可溶性磷 DP	颗粒态磷 PP
水田 Paddy land	20	0.1 ~ 3.8	1.8 ~ 28.8	4.6 ~ 67.4	32.6 ~ 95.4	17.3 ~ 90.4	9.6 ~ 82.7
水旱轮作 Paddy - arid rotation	25	1.2 ~ 51.8	1.2 ~ 26.3	2.3 ~ 57.5	42.5 ~ 97.7	8.0 ~ 87.2	12.8 ~ 92.0
旱地 Arid land	16	1.4 ~ 39.6	1.7 ~ 36.8	5.8 ~ 58.3	41.7 ~ 94.2	28.1 ~ 90.6	9.4 ~ 71.9
菜地 Vegetable land	18	3.4 ~ 68.4	0.9 ~ 20.8	7.0 ~ 83.2	16.8 ~ 93.0	38.1 ~ 92.5	7.5 ~ 61.9
茶园 Tea garden	19	3.3 ~ 23.7	1.6 ~ 28.0	5.5 ~ 42.2	57.8 ~ 94.5	23.3 ~ 96.4	3.6 ~ 76.7
桔园 Tangerine orchard	19	3.1 ~ 17.0	5.2 ~ 29.1	9.4 ~ 40.7	59.3 ~ 90.6	22.4 ~ 84.4	15.6 ~ 77.6
脐橙园 Orange orchard	20	1.2 ~ 9.5	2.1 ~ 16.2	3.8 ~ 25.0	75.0 ~ 96.2	21.4 ~ 82.5	17.5 ~ 78.6

综上所述,暴雨的持续时间、径流量、侵蚀泥沙量及施肥等因素都会影响单次降雨中农田氮素的输出负荷和输出特征,其中侵蚀泥沙年输出总负荷和径粒分布特征是影响鄱阳湖流域农业不同土地利用方式总氮输出总负荷的主要因素。暴雨持续时间、径流量、施肥水平等因素影响单次降雨的可溶性氮的输出负荷和输出比例,从而影响不同土地利用方式的本年度输出负荷(年度地表流失量)。

2.2 磷的输出特征

不同的农业利用方式中,脐橙园、桔园、旱地、菜地、水田、水旱轮作、茶园等总磷年输出总负荷分别为 25.6, 18.8, 16.4, 11.7, 7.8, 4.7, 3.1 kg/hm²,其中年基础输出负荷分别为 7.0, 8.0, 8.8, 5.0, 5.4, 2.9, 1.6 kg/hm²,本年度输出负荷分别为 18.7, 10.8, 7.6, 1.28, 6.7, 2.5, 1.5 kg/hm²。可见,不同农业利用方式中,脐橙园、桔园和旱地等总磷的地表流失量高于其他土地利用方式。有机肥施用水平较高的脐橙园、桔园和菜地等土地利用方式的总磷本年度流失量明显高于基础流域量,地表径流流失量以本年度流失量为主;旱地、水田、水旱轮作和茶园等土地利用方式总磷的基础流失高于本年度流失量,地表径流流失量以基础流失量为主。

不同农业利用方式中总磷的输出形态中可溶性磷与颗粒态磷的输出负荷分别为 7.8%~21.3%和 78.7%~92.2%,与人工降雨模拟中总磷的输出也以颗粒态磷为主的结果^[5,16-17]相似,但可溶性磷输出比例明显高于人工降雨模拟的研究结果。分析其原因:降雨初期,径流所带出的泥沙主要是细颗粒及粘粒为主的表层浮土,尽管流出泥沙量不高,但粒径较小,对磷素的强附作用强,径流中颗粒态磷含量高;随着降雨的持续,土壤含水量较高,径流中的泥沙粒径相对较粗,大颗粒(1~0.05 mm和 0.05~0.01 mm)占到 70~80%,此径粒对磷的吸附性小,含磷量低,所以随着降雨的增多,径流中颗粒态磷的含量逐渐降低^[14]。不同农业利用方式侵蚀泥沙分析结果表明,流失泥沙中大颗粒(>0.01 mm)占到 80%以上,与上述结论相吻合。说明径流对土壤颗粒的选择性搬运作用影响农田磷素的输出负荷和输出形态特征,即降雨持续时间越长,径流对土壤颗粒的选择性搬运作用越明显,径流中可溶性磷的输出比例越大。相关分析结果表明,可溶性磷(DP)与农田径流量呈极显著相关($r=0.9986$, $n=1562$),而颗粒态磷(PP)与农田径流量呈显著负相关($r=-0.9243$, $n=1562$),进一步说明降雨的持续时间对磷素输出形态特征的影响。

不同土地利用方式单次暴雨磷的输出特征,相对氮而言,其变异更大:水田、水旱轮作、旱地、菜地、茶园、桔园和脐橙园等可溶性磷的比例分别为:17.3%~90.4%, 8.0%~87.2%, 28.1%~90.6%, 38.1%~92.5%, 23.3%~96.4%, 22.4%~84.4%和 21.4%~82.5%;田间颗粒态磷输出比例分别为 9.6%~82.7%、12.8%~92.0%、9.4%~71.9%、7.5%~61.9%、3.6%~76.7%、15.6%~77.6%和 17.5%~78.6%。不同农业利用方式的全年历次暴雨总磷输出负荷,除水旱轮作外(2个峰值),其他都只出现 1 个峰值,而且以有机肥为主的菜地、桔园和脐橙园的峰值对照与常规处理的差异明显。同时,春耕前和冬闲季节对照与常规处理的总磷输出负荷相近。这可能是农业生产中,磷肥一般都用作基肥导致施用次数相对氮肥少的原因。显然,农田磷肥施用时间是磷素输出负荷最大时间,施肥影响磷素输出特征。

显然,农田磷素输出特征不同于氮素,暴雨持续时间、径流量、侵蚀泥沙负荷和施肥措施等因子不仅影响单次降雨中农田磷素的输出负荷和特征,还在一定程度上影响磷素的年输出总负荷和输出特征。

3 结 论

(1) 鄱阳湖流域的优势农业利用方式中,水旱轮作、旱地、脐橙园、水田、菜地、桔园和茶园等农业利用方式的总氮年输出总负荷分别为 45.3, 44.8, 42.3, 39.7, 35.8, 25.7, 20.0 kg/hm²,其中年基础输出负荷分别为 34.9, 30.6, 31.2, 29.9, 21.6, 17.8, 13.1 kg/hm²,本年度输出负荷分别为 10.4, 14.2, 11.1, 9.8, 14.2, 8.0, 6.9 kg/hm²。脐橙园、桔园、旱地、菜地、水田、水旱轮作、茶园等总磷年输出总负荷分别为 25.6, 18.8, 16.4, 11.7, 7.8, 4.7, 3.1 kg/hm²,其中基础输出负荷分别为 7.0, 8.0, 8.8, 5.0, 5.4, 2.9, 1.6 kg/hm²,本年度输出负荷分别为 18.7, 10.8, 7.6, 6.7, 2.5, 1.7, 1.5 kg/hm²。

(2) 不同农业利用方式中,颗粒态氮和颗粒态磷是农田地表径流水相氮、磷输出的主要形态,分别占 84.1%~90.3%和 78.7%~92.2%,与人工模拟降雨研究的结果相似。单次降雨间,不同农业利用方式农田可溶性氮、磷的输出比例差异较大:水田、水旱轮作、旱地、菜地、茶园、桔园和脐橙园等农田可

溶性氮的输出负荷分别占总氮的 4.6% ~ 67.4% ($n=20$)、2.3% ~ 57.5% ($n=25$)、5.8% ~ 58.3% ($n=16$)、7.0% ~ 83.2% ($n=18$)、5.5% ~ 42.2% ($n=19$)、9.4% ~ 40.7% ($n=19$)和 3.8% ~ 25.0% ($n=20$);可溶性磷的输出负荷分别占总磷的 17.3% ~ 90.4% ($n=20$)、8.0% ~ 87.2% ($n=25$)、28.1% ~ 90.6% ($n=16$)、38.1% ~ 92.5% ($n=18$)、23.3% ~ 96.4% ($n=19$)、22.4% ~ 84.4% ($n=19$)和 21.4% ~ 82.5% ($n=20$)。次间自然降雨中可溶性氮、磷的输出负荷的时空变异导致农田地表径流中可溶性氮、磷的年输出总负荷也明显高于人工模拟降雨的研究结果。

(3) 地表径流对土壤颗粒的选择性作用是影响农田氮、磷输出负荷和特征的主要因子。但因土壤中氮、磷理化特性不同,单次暴雨中农田总氮、总磷输出负荷和输出特征还受到降雨持续时间、径流量、耕作强度和施肥水平等因素影响。

(4) 相对人工降雨模拟,研究全年自然降雨条件下,农业不同利用方式的氮、磷年输出负荷和输出特征,可全面综合不同次暴雨间降水强度、持续时间,不同季节土壤中氮磷养分含量的差异,以及农业施肥、耕作等管理措施对土壤下垫面条件的影响,可减少农业非点源评估中变量参数的累积偏差,提高研究的可信度。

参考文献:

- [1] EPA (841 - B - 03 - 004). National Management Measures for the Control of Nonpoint pollution from Agriculture [M]. U S Environmental Protection Agency Office of Water (4503T), CAB I Publishing, 2003.
- [2] Shortle J S, Abler D G. Environmental policies for agricultural pollution control [M]. Department of Agricultural Economics and Rural Sociology Pennsylvania State University, USA, CAB I Publishing, 2001.
- [3] 汪晓鸿,樊哲文,崔丽娟,等. 鄱阳湖湿地生态系统评估 [M]. 北京:科学出版社, 2004: 103 - 111.
- [4] FtLauderdale Watershed - scale nonpoint source pollution modeling and decision support system based on oModel - GIS - RDBMS Linkage [J]. Awra Symposium on GIS and Water Resources, 1996: 22 - 26.
- [5] 梁涛,王红萍,张秀梅,等. 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25 (4): 483 - 490.
- [6] 黄满湘,章申,唐以剑,等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程 [J]. 土壤与环境, 2001, 10 (1): 6 - 10.
- [7] 李恒鹏,金洋,李燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与土壤中流氮素流失比较 [J]. 水土保持学报, 2008, 22 (2): 6 - 9.
- [8] 吴希媛,张丽萍,倪含斌,等. 青山湖流域不同地表覆盖降雨径流中氮磷流失过程研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22 (1): 56 - 59.
- [9] 马琨,王兆骞,陈欣,等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究 [J]. 水土保持学报, 2002, 10 (3): 16 - 19.
- [10] 第一次全国污染源普查办公室. 农业源产排污系数测算实施方案 [M]. 北京:中国农业出版社, 2007: 17 - 34.
- [11] 梁涛,张秀梅,章申,等. 西苕河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.
- [12] 肖强,张维理,王秋兵,等. 太湖流域麦田土壤氮素流失过程的模拟研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (6): 731 - 736.
- [13] 吴希媛,张丽萍,张妙仙,等. 不同雨强下坡地氮流失特征 [J]. 生态学报, 2007, 27 (11): 4576 - 4582.
- [14] 郟瑞卿,孙彦君,王继红,等. 不同利用方式及施肥对黑土地表磷素养分流失的影响 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (4): 701 - 705.
- [15] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征 [J]. 环境科学学报, 2007, 27 (2): 326 - 331.
- [16] 徐泰平,朱波,汪涛,等. 不同降雨侵蚀力条件下紫色土坡农田的养分流失 [J]. 水土保持研究, 2006, 13 (6): 139 - 144.
- [17] 虞培谦,王晓燕,房孝铎,等. 石匣小区氮磷坡面流失特征研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24 (4): 19 - 45.