

川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支探析*

朱 波 彭 奎 谢红梅

(水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)
(中国科学院)

摘 要 对川中丘陵区典型小流域农田生态系统 N 素收支分析表明,紫色土丘陵区农田 N 肥施用量较大,旱地、水田 N 肥年施用量分别为 363.5kg hm^{-2} 和 161.8kg hm^{-2} ,化肥 N 占小流域农田 N 素投入的 76.65%。除作物收获外,小流域农田生态系统 N 素年损失量为 129.67kg hm^{-2} ,且以气态损失为主,旱地农田通过径流、淋洗和泥沙等途径损失的 N 素年均 44.34kg hm^{-2} 。小流域农田生态系统 N 素年均盈余 66.8kg hm^{-2} ,农田 N 素盈余加剧了 N 素损失,并已造成小流域农业非点源 N 污染。

关键词 农业生态系统 紫色土 小流域 N 素收支

Nitrogen balance of agro-ecosystem in a typical watershed in the hilly area of central Sichuan Basin. ZHU Bo, PENG Kui, XIE Hong-Mei (Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China), *CJEA*, 2006, 14(1):108~111

Abstract The nitrogen balance of agro-ecosystem in a typical watershed in the hilly area of central Sichuan Basin was studied. The results show that there is an excess application of nitrogen which is 363.5kg hm^{-2} in dryland and 161.8kg hm^{-2} in paddy field, respectively. The chemical nitrogen accounts for 76.65% of the total nitrogen input to the agro-ecosystem. Besides crops' harvest, nitrogen loss from agro-ecosystem amounts to 129.67kg hm^{-2} , mainly by gas. Runoff, leaching and soil erosion are other important losses primarily from slope cropland which averages 44.34kg hm^{-2} . The nitrogen surplus of agro-ecosystem in the small watershed is 66.8kg hm^{-2} , which increases the nitrogen loss and results in non-point source pollution of nitrogen to some extent in this watershed.

Key words Agro-ecosystem, Purple soil, Nitrogen input and output in small watershed

(Received Oct. 13, 2004; revised Nov. 20, 2004)

紫色土普遍缺 N^[1], N 是紫色土农田生态系统中最重要的养分限制因子,但由于农业生产中 N 肥施用量不断增加, N 肥施用的环境问题日益受到广泛关注。合理的 N 肥施用不仅要实现农田土壤的 N 素平衡,而且要求在小流域尺度上避免活性氮的过量输出而造成农业非点源污染^[2,15]。本研究分析了川中丘陵区典型小流域农田生态系统 N 素收支状况,为该区平衡施肥和防止农业 N 素非点源污染提供理论依据。

1 研究区域概况与研究方法

川中丘陵区指四川盆地腹心的丘陵低山区,该区为四川盆地传统农区,也是国家重要的商品粮基地。所选小流域位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡截流村(简称截流小流域),东经 $105^{\circ}27'$,北纬 $31^{\circ}16'$,地处嘉陵江一级支流——涪江支流弥江、湍江的分水岭上,海拔高度 400~600m,面积约 0.35km^2 ,其中小流域旱耕地 15.64hm^2 ,水稻田 3.93hm^2 ,林地 12.14hm^2 ,其他用地 2.93hm^2 。该区属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3°C , 10 年积温 $5000\sim 6000^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 826mm,年无霜期 297d。土壤为钙质紫色土,质地为中壤,土壤 CaCO_3 、有机质、全 N 含量分别为 $131.6(\pm 4.8)\text{g kg}^{-1}$ 、 $7.8(\pm 0.7)\text{g kg}^{-1}$ 、 $0.59(\pm 0.3)\text{g kg}^{-1}$,速效氮、速效磷、速效钾分别为 $44.72(\pm 4.44)\text{mg kg}^{-1}$ 、 $6.94(\pm 1.02)\text{mg kg}^{-1}$ 和 $102.64(\pm 5.91)\text{mg kg}^{-1}$ 。自然植被类型为桤木(*Alder cremastogyne*)和柏木(*Cypresses fineries*)混交林,主要农作物有水稻、玉米、小麦、甘薯、油菜等。在小流域内选择 19 个不同台位的坡地(包括主要坡耕地利用类型)作为定位监测点,测定土壤全 N、有效氮及土壤有机质含量等,记录各点农作物产量、籽粒和秸秆产量、养分投入与产出、有机肥和化肥 N 的施

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-314)和中国科学院野外台站基金项目资助

收稿日期:2004-10-13 改回日期:2004-11-20

入量等,并对作物籽粒和秸秆采样,计算草籽比;在林地和农地设置 8 个径流观测场,并设计了紫色母岩自然风化观测池^[3],测定母岩养分风化释放量;另在小流域池塘、水田、水井等地选择 18 个水体监测点,每月或降雨产流时采样,估算径流、淋洗和侵蚀的 N 素量,在小流域出口测定径流与泥沙量及其中 N 素含量。用凯氏法(硒粉-硫酸铜-浓硫酸)消煮、蒸馏定 N 法测定土壤和植物(包括籽粒)中全 N 含量,以碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定水样总 N 含量,用铬粒-重铬酸钾-硫酸消煮、蒸馏滴定法测定厩肥和堆肥中全 N 含量^[4]。本研究应用 DNDC(Denitrification-Decomposition)模型的农田/草地版(DNDC67a)计算农田 N 的挥发、硝化和反硝化等损失^[12~14]。

2 结果与分析

2.1 N 素收入参数

N 素养分收入包括化肥、有机肥的施用,作物秸秆还田,降雨带入,播种及紫色母岩风化等。调查显示小流域农田中主要作物化肥纯 N 平均施用量小麦为 135.5kg/hm²,油菜为 98 kg/hm²,大春玉米(套种甘薯)为 228 kg/hm²,水稻为 63.8kg/hm²。其余旱地各作物施肥量参照同季主要作物施肥量计算。川中丘陵区种植习惯旱地

主要为玉米、小麦,因此该区旱地化肥年施 N 量为 363.5kg/hm²;稻田通常种植小春油菜、大春水稻,稻田化肥年施 N 量为 161.8 kg/hm²。此外该区家畜粪便为本区主要厩肥,猪、牛、羊、禽类和人等的排泄物带入 N 量分别为 4.9kg/头、40kg/头、2.3kg/头、0.62kg/头、5.4kg/人。根据畜禽、人口等统计资料计算得农田平均年施有机肥为 52.6 kg/hm²。通过计算可得该小流域旱地与水田施 N 肥量分别为 416.1kg/hm²、214.4kg/hm²。20 世纪 70 年代川中丘陵区开展大规模的植树造林活动,森林覆盖率大幅度提高。林地为农村提供了大部分薪柴,大部分作物秸秆得以还田,增加了物质的再循环速率^[5]。该区作物秸秆还田和播种带入农田生态系统的 N 素见表 1。紫色土为初育土,紫色母岩风化成土速率极快,年成土模数达 1.58~2.55 万 t/km²^[3],紫色土养分循环中最具特色的是紫色母岩的养分输入。试验研究表明^[6],采用聚土免耕技术凿紫色母质改土 10cm,促进紫色岩养分风化释放,可向土壤提供 N7.50kg/hm²,传统平作未凿岩改土仅可得 N0.8kg/hm²,而该小流域约 10% 的旱耕地采用聚土改土技术,经计算小流域农田母岩风化 N 素为 35.84kg。生物固 N 主要为豆科作物、花生和绿豆固 N,因其播种面积小,固 N 量少,估算全年为 2.26kg。1999~2002 年共测定 29 次降雨全 N 含量,得其平均值为 0.115mg/L,1999~2002 年平均降雨 868mm,经计算由降雨带入农田生态系统的 N 素为 19.53kg。

表 2 小流域作物种植面积及产量(1999~2000)

Tab.2 Plant area and yields of crops in the watershed from 1999 to 2000

项 目 Items	小麦 Wheat	玉米 Maize	油菜 Rape	水稻 Rice	甘薯 Sweet potato	花生 Peanut	绿豆 Mung bean
种 植 面 积 / hm ²	13.47	14.7	4.8	3.9	15.5	0.14	0.02
播 种 量 / kg·hm ⁻²	187.5	45.0	1.05	180.0	300.0	187.5	105.0
单 产 / kg·hm ⁻²	4005.0	4569.0	1600.5	8610.0	3855.0	2130.0	2100.0
总 产 量 / kg	53947.4	67164.3	7682.4	33579.0	59752.5	298.2	42.0

候等多种因素的影响,其变幅较大^[7]。表 3 为该区作物 N 素养分实测结果。作物养分消耗量是指每生产 100kg 经济产品需要消耗的养分数量,是农田养分支出的重要部分。根据作物养分含量和草/籽值,各作物养分消耗量计算式为:

$$C_N = 100\text{kg} \times [NA + (N/M \times NB)] \quad (1)$$

式中, C_N 为作物 N 素养分消耗量(g/kg), NA 为作物籽粒含 N 量(%), N/M 为作物草籽比, NB 为作物各副

表 1 作物秸秆还田与种子带入 N*

Tab.1 Total N of returned straws and seeds

项 目 Items	小麦 Wheat	玉米 Maize	油菜 Rape	水稻 Rice	甘薯 Sweet potato	花生 Peanut	绿豆 Mung bean
副产品还田率/ %	100.0	78.0	100.0	27.0	5.0	75.0	100.0
还 田 总 N / kg	147.4	320.8	94.1	81.2	65.5	22.4	1.28
播 种 量 / kg·hm ⁻²	187.5	45.0	10.5	180.0	300.0	187.5	105.0
种 子 总 N / kg	38.9	9.26	0.9	38.5	14.9	3.64	0.36

*表中秸秆作饲料的部分记入家畜排泄物中,此处扣除;种子 N 含量按收获籽粒的 N 含量计算。

2.2 养分支出参数

作物养分的吸收是养分循环中的主要特征之一,也是养分支出的主要内容,作物养分吸收量与作物产量及养分含量有关。表 2 为小流域各类作物近几年平均产量。作物养分含量受施肥、土壤养分、水分、气

表 3 作物 N 素养分平均含量*
Tab.3 Average N contents of crops

项 目 Items	N 素含量/ g·kg ⁻¹ N Content						
	小麦 Wheat	玉米 Maize	油菜 Rape	水稻 Rice	甘薯 Sweet potato	花生 Peanut	绿豆 Mung bean
籽 粒	15.4	14.0	16.9	11.5	3.2	34.9	42.5
副产物	3.3	12.7(叶) 2.1(茎) 3.5(芯)	3.5	5.6	21.3	26.5、 10.0(壳)	10.0

* 甘薯、花生为新鲜样品测定,除特别说明外,副产物指茎叶混合样,下同。

主要是 NH₄HCO₃, 损失较大, DNDC 模型计算获得本区旱地气态 N (氨挥发与反硝化) 年损失量为 70.89kg/ hm², 水田气态 N 损失为 30.0kg/ hm², 气态 N 为本区农田 N 素的主要损失途径。有机肥(厩肥和还田秸秆)在堆积、运移、使用等各环节均有损失,难以精确计算。据前人试验结果并

考虑紫色土实际情况,本研究以施入厩肥 N 的 30% 作为损失计算^[9],故有机肥气态 N 年损失量为 15.8 kg/ hm²。因化肥和有机肥年施用量较大,由此损失的 N 素养分可能成为环境污染的重要因素。农田土壤养分的淋洗、径流和土壤侵蚀等是农田养分支出的重要组成部分。余贵芬等研究表明^[10],紫色土旱作中 NH₄-N 易被土壤吸持,移动性小,但易发生硝化作用变成 NO₃⁻-N 随水流失,因此旱作土壤 N 素淋洗主要考虑 NO₃⁻-N 的移动。根据 DNDC 模型,结合多年观测资料计算得该区旱地与水田 N 素淋洗分别为 9.48 kg/ hm²、4.91kg/ hm²,集水区旱地与水田 N 素淋溶分别为 148.2kg、19.3kg。试验观测表明该小流域坡地径流系数为 0.32,旱地地表径流总 N 相当于 N 肥施用量的 7.3%,水田(含两季田)径流 N 损失约为施肥量的 4.8%,计算得该区旱地径流 N 为 475.1kg,水田径流 N 为 40.4kg。紫色土区因土壤抗蚀性弱,降雨集中,坡耕地面积大,水土流失严重,由此带走的养分不容忽视。该区农田径流场 1998~2002 年连续 5 年观测结果表明,坡度为 5° 的坡耕地侵蚀模数为 5.61t/ hm²,测得坡耕地泥沙平均含 N 量为 0.80g/ kg,经计算得小流域旱坡地土壤年侵蚀 N 总量为 70.1kg;水田(含两季田)侵蚀模数为 1.83t/ hm²,水田泥沙多年平均含 N 量为 0.96g/ kg,经计算得小流域水田泥沙损失 N 量为 6.9kg。

表 5 紫色土典型小流域农田 N 素养分收支

Tab.5 Nitrogen balance in the typical watershed of purple soil

项 目 Items	收入 N/ kg Input N	占收入比例 % Ratio of input	项 目 Items	支出 N/ kg Output N	占支出比例 % Ratio of output
化 肥	6321.0	76.65	作物养分消耗	4324.8	62.32
厩 肥	1029.4	12.48	化肥反硝化、挥发	1226.2	17.67
秸秆还田	732.7	8.88	厩肥气态损失	309.2	4.46
种 子	106.5	1.29	秸秆 N 损失	319.3	4.60
生物固 N	2.3	0.03	淋 溶	167.5	2.41
降 雨	19.5	0.24	地表径流与泥沙	592.5	8.54
母岩风化	35.8	0.43			
收入合计	8247.2	100.00	支 出 合 计	6939.5	100.00
平 衡	+ 1307.7				

来源^[5],施用量达 52.6kg/ hm²,占稻田施肥量的 32.5%。秸秆还田带入的养分占有一定比重,但由于该区森林面积较大(35%),农村薪柴富足,秸秆还田的潜力较大,极可能增加有机肥源比例。此外若能充分利用

产物含 N 量(%)。根据表 2、表 3 及作物草籽比计算该区作物 N 素吸收总量其结果见表 4。肥料 N 气态损失仅指化学 N 肥的反硝化和挥发等,以及有机肥(主要是厩肥)的 N 素损失。肥料 N 的气态损失较为复杂,国内运用¹⁵N 进行了为数不多的田间定位实验结果发现,我国化肥 N 利用率很低,仅 30%~35%^[8]。因土壤为钙质紫色土(pH 8.3),而农田施用的 N 肥主

表 4 作物草籽比及其 N 素养分吸收量

Tab.4 Ratio of by-product to product and total N outputs of the different crops

项 目 Items	小麦 Wheat	玉米 Maize	油菜 Rape	水稻 Rice	甘薯 Sweet potato	花生 Peanut	绿豆 Mung bran
草 / 籽	1.39	0.55(叶) 0.65(茎) 1.00(芯)	3.4	1.6	2.13	2.65、 0.25(壳)	1.0
N 含量/ g·kg ⁻¹	20.0	25.9	28.8	20.5	8.7	62.3	50.1
N 吸收量/ kg	1078.2	1736.2	221.2	687.1	522.1	17.8	2.12

2.3 典型小流域 N 素收支状况

川中丘陵区典型小流域农田生态系统 N 素总体平衡计算结果见表 5。由表 5 可知该区 N 素盈余为 1307.7kg,按耕地 19.57hm² 计算,平均盈余为 66.8kg/ hm²。化肥和厩肥仍是农田 N 素来源的主体,二者之和占 N 素总投入的 89.13%。目前该区农田化肥平均使用量较高,若完全不施化肥 N,农田将出现 N 素严重亏缺。根据不同作物和土壤,适当增加化肥施用量可大幅提高作物产量。本区尽管化肥施用和比例逐年增加,但有机厩肥仍然是农田 N 素的重要

紫色母岩易风化成土、且养分风化释放快的特点,通过凿岩改土,既能增厚土层,又能提供养分,可一定程度缓解对化肥的依赖^[11]。该区旱地和水田中 N 素总损失量大,为 2537.6kg,平均损失为 129.67kg/hm²,且主要为 N 素气态损失,占 N 素支出总量的 27%,其中约 22% 是通过化肥和厩肥的硝化-反硝化和氨挥发以气态形式进入大气,农田 N 素的这种迁移不仅造成养分的大量损失,且可能造成如 N₂O 等大气环境污染。而农田通过径流、淋洗和土壤侵蚀等途径损失的 N 素为 760kg,其中旱地高于水田,约占总量的 91%,年均 44.34kg/hm²,这部分 N 素往往是引起地下水和地表水 NO₃⁻-N 浓度增加的主要原因之一。本区地下水 NO₃⁻-N 含量已达 10(±0.39)mg/L,部分地下水 NO₃⁻-N 含量高达 14.2mg/L,已不太适于饮用,而区内地表径流平均 NO₃⁻-N 含量为 1.06(±0.26)mg/L,也已高于水体富营养化的低限。

3 小 结

化肥、厩肥、作物秸秆和母岩风化是川中丘陵区 N 素养分的主要收入,其中化肥和厩肥是农田 N 素来源的主体,决定了农田 N 素的盈亏状况。旱地、水田年化肥施 N 量分别为 363.5kg/hm²、161.8kg/hm²,化肥 N 占 N 素总投入的 76.65%。作物养分消耗、厩肥和化肥的损失以及土壤侵蚀是川中丘陵区 N 素养分的主要支出,小流域农田生态系统 N 素损失严重,为 129.67kg/hm²,其中以 N 素气态损失为主,占支出总量的 27%;农田通过径流、淋洗和泥沙等途径损失的 N 素为 760kg,旱地损失量约占水土流失总量的 91%,年均 44.34kg/hm²。川中丘陵区农田生态系统 N 素已有积累,年均盈余 66.8kg/hm²,农田 N 素平衡依赖化肥,而肥料 N 的利用率低,农田 N 素通过氨挥发、反硝化及水土流失损失,已导致小流域非点源 N 污染。未来的肥料管理应充分利用当地丰富的有机资源如秸秆,适当减少化肥 N 的施用且少施碳铵,提高化肥利用率,有效缓解农业非点源 N 污染威胁。

参 考 文 献

- 1 李仲明.中国紫色土(上).北京:科学出版社,1991
- 2 彭 奎,朱 波.试论农业养分的非点源污染与管理.环境保护,2001(1):15~17
- 3 朱 波,高美荣,刘刚才等.紫色页岩风化侵蚀及其环境效应.水土保持学报,1999,5(3):33~37
- 4 孙鸿烈,刘光崧.土壤理化分析与剖面描述.北京:中国标准出版社,1996.33~35
- 5 朱 波,彭 奎,高美荣等.川中丘陵农业生态系统演替.山地学报,2003,21(1):56~62
- 6 朱 波,李同阳,张先婉.耕作制度对紫色土养分循环的影响.山地研究,1996,14(增刊):51~54
- 7 朱 波等.紫色土肥力要素的剖面分异与肥力潜力.西南农业学报,2000,13(4):50~57
- 8 鲁如坤,刘鸿翔,闻大钟等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究.土壤通报,1996,27(4):145~151
- 9 沈善敏.中国土壤肥力.北京:农业出版社,1998.160~206
- 10 余贵芬,毛知耘,石孝均.氮素在紫色土中的移动和淋失研究.西南农业大学学报,1999,21(3):228~230
- 11 朱 波,罗晓梅,廖晓勇等.紫色母岩养分的风化释放.西南农业学报,1999,12(4):63~68
- 12 Li C.S., Steve F., Tod A.F. A model of oxide evolution from soil driven by rainfall events: . Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(9): 9759~9776
- 13 Li C.S., Steve F., Tod A.F. A model of oxide evolution from soil driven by rainfall events: . Model applications. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(9): 9777~9783
- 14 Li C.S., Vi Jay N., Robert C.H. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 297~306
- 15 Barrington S.F., Moreno C.R. Swine manure nitrogen conservation in storage using sphagnum moss. Environ. Qual., 1994, 24(4): 492~503