

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0681

赵佐平. 2014. 汉江上游主要农作物氮肥投入特点及土壤养分负荷分析[J]. 环境科学学报, 34(11): 2861-2868

Zhao Z P. 2014. Analysis of nitrogen inputs and soil nutrient loading in different croplands in the upper Hangjiang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(11): 2861-2868

汉江上游主要农作物氮肥投入特点及土壤养分负荷分析

赵佐平^{1,2}

1. 陕西理工学院化学与环境科学院, 汉中 723001

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

收稿日期: 2014-01-25

修回日期: 2014-04-01

录用日期: 2014-04-04

摘要: 为了解汉江上游主要农作物氮肥投入特点及土壤养分现状, 加强汉江上游农业面源污染管理, 指导农户科学合理施肥, 保障汉江源头水质安全. 以汉江上游汉中段沿河岸土壤养分分析、农户施肥调查等统计数据为基础, 采用盈余法从作物种类分析种植生产体系中氮素输入输出特点及土壤氮素盈余状况. 结果表明, 汉江上游主要农作物平均化肥氮投入量为 $173.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计, 下同), 通过有机肥投入的氮远远小于化肥氮, 仅为 $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 84.0% 的农田氮素样本处于盈余, 总体平均盈余量为 $77.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中, 盈余量超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本亦占了 40.8%. 但养分投入不足表现为氮养分亏缺的样本也占调查样本的 16.0%. 不同作物比较, 水稻田氮肥投入量为 $202.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于油菜地施肥量 $159.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 而水稻收获时籽粒和茎叶的氮带出量为 $197.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高于油菜收获时的带出量 $103.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 因此, 水稻田氮盈余量 ($20.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 低于油菜地 ($72.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). 调查区土壤养分表现为氮、钾丰富, 有机质、有效磷含量低于全国及南方水稻、油菜主产地水平. 汉江上游主要农作物不合理的氮肥投入特点给土壤环境带来较大的氮素负荷, 长期以往将给土壤环境和汉江上游水体造成很大威胁.

关键词: 汉江上游; 氮肥投入; 氮素盈余; 土壤养分; 负荷分析

文章编号: 0253-2468(2014)11-2861-08

中图分类号: X17

文献标识码: A

Analysis of nitrogen inputs and soil nutrient loading in different croplands in the upper Hangjiang River

ZHAO Zuoping^{1,2}

1. College of Chemical and Environment Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100

Received 25 January 2014;

received in revised form 1 April 2014;

accepted 4 April 2014

Abstract: Accurate information about current soil nutrient concentrations in croplands is required for making recommendations on fertilizer application in future. The amount of soil N surplus in the croplands of upper Hanjiang river, which is the main rice and rape production region in Shaanxi Province, needs to be investigated since the N inputs and soil nutrients loading is important for environmental protection in this region. The objective of this study was to quantify both the N application rates and the amount of soil N surplus in croplands in the upper Hanjiang river. Soil samples were collected from croplands in different parts of farmlands and analyzed to determine soil nutrients concentration (organic matter, N, P and K). Additional information was collected from farmer surveys and an agricultural statistics database. The data was analyzed using the N balance method. The results revealed that the average N fertilizer application rates among the croplands surveyed was $173.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in this study. Manure application accounted for only $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Nearly 84.0% of croplands were in a situation of N surplus, with an average of $77.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Around 40.8% of croplands showed an N surplus of more than $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. In contrast, N in nearly 16.0% of farmland was deficient. In different types of croplands, the rice fields had a higher N input rate ($202.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) but a lower amount of surplus N ($20.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) compared with the rape fields, due to a higher amount of removal N ($197.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) at the time of harvest. In the investigated region, the available N and K were rich in 0~20 cm soil depth, and the organic matter and available P were generally below the national average. High N inputs to croplands in the upper Hanjiang river led to high soil N loading, which would in the long

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(No.201203045); 国际植物营养研究所项目(IPNI); 陕西省教育厅专项科研项目(No.12JK0653)

Supported by the Special Fund of National Non-profit Scientific Research Program for Agriculture(No.201203045), the Program of International Plant Nutrition Institute(IPNI) and the Scientific Research Special Program of Shannxi Provincial Education Department(No.12JK0653)

作者简介: 赵佐平(1982—), 男, E-mail: zhaozuoping@126.com

Biography: ZHAO Zuoping(1982—), male, E-mail: zhaozuoping@126.com

term increase environmental risks in the region.

Keywords: the upper Hanjiang River; nitrogen input; nitrogen surplus; soil nutrient; loading analysis

1 引言 (Introduction)

农业面源污染是指人们在从事农业耕作活动中,由于使用化肥、农药及农田水土流失而引起受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)的污染(朱铁群,2000).农业面源污染中,氮、磷等营养元素是主要污染物质.我国农田氮肥使用量居世界首位,过量使用化肥是促使面源污染产生的主要原因.据世界粮农组织统计,技术先进国家氮肥的利用率为68%,而我国现阶段约为10.8%~40.5%,平均为27.5%,不及发达国家的一半,每年农用化肥的60%~70%进入环境(李鑫,2007;张福锁等,2008),不但造成了巨大的经济损失,而且使得许多地表水和地下水硝酸盐含量过高.陈清硕早在1997年研究发现,长江口河水硝酸盐含量已达 $0.49 \sim 0.95 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而世界河口平均值仅为 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (陈清硕,1997).我国5大湖泊、7个大型水库多已处于中-富营养状态,导致“藻华”频发,影响渔业生产,有些地方甚至出现了水质性缺水.在北方,地下水硝酸盐的污染问题也十分突出,部分地区硝酸盐含量超过饮用水标准的5~10倍,基本不能饮用,京津唐地区50%的地下水硝酸盐含量超标(郝高建,2005).张云贵等(2005)研究发现,农业上长期施用高量氮肥是造成地下水硝酸盐污染的重要原因之一,而且氮肥所造成的氮素径流是引起水体氮富营养化的重要原因(张维理等,2004).吕殿青等(1998)指出,陕西省有些粮食高产区由于过量施氮已在0~4 m深的土层中积累了大量 NO_3^- -N,并使地下水和地表水受到不同程度的污染.同延安等(2004)在陕西粮食作物氮肥施用调查中指出,现今陕西粮食作物生产中化肥的施用量是20年前的5倍,但粮食产量平均仅增加了60%.

汉江是长江最大的支流之一,发源于陕西省汉中市宁强县秦岭南麓的潘家山,由西向东流经汉中市所辖的勉县、南郑、汉台、城固、洋县、西乡进入陕西省安康市,最终由湖北省武汉市汉口汇入长江(赵佐平等,2012).因汉江流域水量充沛,2000年国家将汉江作为南水北调中线工程水源地,近期计划年调水量95亿 m^3 ,远期达到130亿 m^3 ,用以补充京、津、冀地区的城市用水和工业用水,以缓解该地区长期以来水资源紧张的情况(李思悦等,2005).因

此,汉江水质安全关乎该地区数千万人口的生命安全,保护好汉江至关重要.汉江汉中段作为汉江上游,其水质污染状况及变化趋势更是不可小觑.近年来,由于“南水北调”工程的实施,使得汉江上游沿岸高污染的皂素、造纸等点源污染小作坊已经全部关闭.而汉中平原在我国历史上最重大的意义是我国古代的天下粮仓,盛产粮食.目前,水稻、油菜仍是主要的粮食作物,其中,水稻种植面积达180万亩以上,占陕西水稻种植面积的93%以上;油菜种植面积约175万亩,占陕西油菜总面积的64.2%.由于大面积、高投入、高产出的种植模式,农民对化肥的依赖程度可想而知,但有关汉江上游汉中段农作物的化肥施用现状及土壤养分现状评估的研究报道甚少.在该地区开展主要农作物氮肥投入特点及土壤养分负荷分析,对汉江水质安全及日后的农业面源污染防治等都有重大意义.因此,本文以汉江上游汉中段沿河岸土壤养分分析、农户施肥调查等统计数据为基础,采用盈余法从作物种类分析种植生产体系中氮素输入输出特点及土壤氮素盈余状况.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

汉江汉中段位于汉水上游,汉中盆地中部,东经 $106^{\circ}51' \sim 107^{\circ}10'$ 、北纬 $33^{\circ}2' \sim 33^{\circ}22'$ 之间.流域地形特点为南低北高,内有平坝、丘陵和山地等3种地貌,平坝为汉江冲积平原的一、二阶梯,海拔500~600 m,地势平坦,土壤肥沃,占全市面积的34.62%;丘陵为山前洪积扇形成的宽谷浅丘地带,海拔600~800 m,地势起伏较大,约占全市面积的28.1%;山区是秦岭南坡形成的浅山和中山地区,地势较为复杂,土壤贫瘠,海拔在700~2038 m之间,约占全市总面积的37.2%.该区属北亚热带季气候的温暖半湿润气候区,年均气温 $12 \sim 16^{\circ}\text{C}$,年均降雨量约700~1800 mm,其中,5—10月降雨量占全年降雨量的80%.由于北有秦岭屏障,寒流不易侵入,气候温和湿润,是陕西最大的水稻、油菜种植基地.调查区域具有较强的代表性.

2.2 调查布点方法

选取汉江上游汉中段南郑县、汉台区、城固县、洋县4个汉江流经县为调查对象,依据4个调查县总面积、沿河地块部位和面积、作物品种确定调查

点数量及分布.确定调查点时,首先考虑沿河地块地形部位,其次为作物种类,最后参考第二次土壤普查采样点位置.根据地形部位、作物种类等因素,统计各因素的点位数.当某一因素点位数过少或过多时进行调整,同时考虑点位的均匀性.调查的同时采集其对应调查农户地块土样,土样采样深度为0~20 cm 耕层土.最后确定调查采样点总计406个.

2.3 调查内容、分析方法

调查分别在2012年和2013年1—3月进行,连续2年共调查农户456户,有效农户406户.调查内容包括:作物品种、作物籽粒产量、作物茎叶产量、肥料品种、施肥量、施肥时期、施肥方法、施肥所占总投资的份额等基本情况.调查同时采集土样,采集0~20 cm 耕层土.土壤有机质用重铬酸钾容量法-外加加热法测定,碱解氮采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 碱解扩散法测定, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法测定速效钾.

2.4 养分评价和参数选择及计算方法

氮养分平衡指数为氮养分投入量与氮养分吸收量之比.氮素平衡为输入项(化肥氮+有机肥氮)与输出项(籽粒和茎叶带出量)之差(方玉东等,2007).

输入项:化肥氮按照调查农户施肥包装袋上标识的养分含量计算;有机肥氮养分依据调查的实际值,根据《中国有机肥料养分志》(全国农业技术推广服务中心,1999)和《中国有机肥料资源》(全国农业技术推广服务中心,1999)的参数汇总计算(表1).沉降氮按照魏样等(2010)在陕西5个监测点通过连续2年的监测结果得到的陕南大气氮素沉降平均值($15.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)统一估算.

表1 各种有机肥料氮养分含量和不同作物氮养分吸收量

Table 1 Nitrogen nutrient content of different manures and nitrogen nutrient uptake rates of different crops

有机肥种类	有机肥氮养分含量	作物种类	籽粒、茎叶氮养分吸收量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
猪粪	0.55%	水稻	19.8, 3.8
牛粪	0.38%	油菜	30.7, 5.2
羊圈粪	0.78%		
鸡粪	1.03%		
人粪尿	0.64%		
普通堆肥	0.18%		
土粪	0.15%		

输出项:不同作物籽粒、茎叶产量、面积按照农户调查值计算;不同作物籽粒、茎叶吸收氮养分量依据前人研究结果(张福锁等,2008;杜加银等,2013;邹娟等,2011;王伟妮等,2011)汇总计算(表1).

2.5 数据处理与统计方法

采用Excel 2007 进行数据处理,用DPS 软件进行数据分析.

3 结果 (Results)

3.1 氮养分投入状况

3.1.1 氮肥投入总体特征 汉江上游主要农作物氮肥投入量见图1.总体上,化肥氮的投入水平远高于有机肥氮的投入量.王小英等(2013a,2013b)依据养分投入分级的方法和原则提出了陕西油菜和水稻的合适施肥量分别是 $135 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $150 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.而调查结果显示,化肥氮投入在 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上的样本为48.8%;其中,施氮量在 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上的样本占11.6%,此样本中平均施用量达到了 $351.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最高施氮量高达630

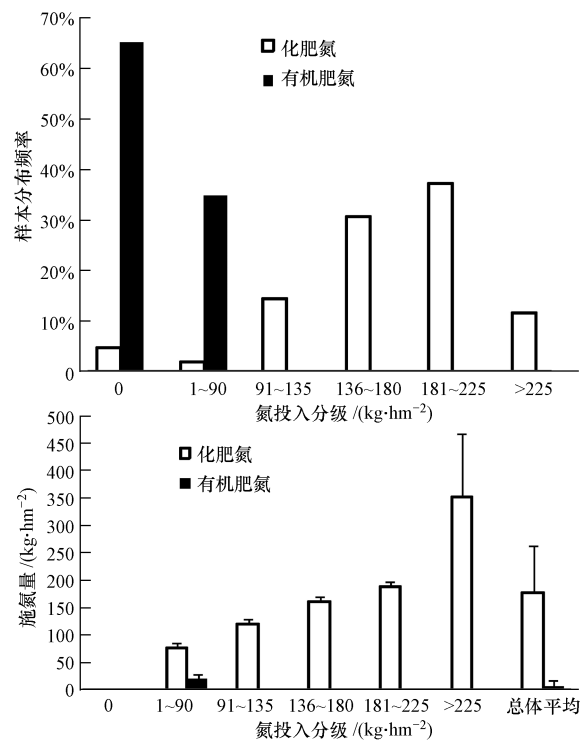


图1 汉江上游主要农作物氮素不同投入分级下施用量和样本分布频率

Fig.1 Application rate and samples distribution frequency under different input groupings of nitrogen in the upper Hanjiang River

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.不施化学氮肥的现象依然存在,但所占比例甚少,仅为 4.67%.有机肥投入量更少,仅有 34.97%的调查农户施有机肥,且施肥量主要集中在 $0\sim 90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.不施有机肥的农户高达 65.03%.由此可知,汉江上游主要农作物氮肥投入水平过量与不足并存,化肥氮的投入量远高于有机肥提供的氮.

3.1.2 不同作物氮肥投入特点 不同作物肥料投入特点存在差异,由表 2 可知,油菜最大肥料投入量为 $528.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最小则不施肥,平均施肥量为 $221.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.而纯氮投入情况与肥料总投入状况有相似之处,最高投入量为 $480\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均施肥量为 $153.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且氮肥投入主要以化肥氮为主,有机氮平均投入量仅为 $6.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

水稻肥料投入量较油菜投入量更高,最大投入量为 $659.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均投入量为 $289.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较油菜的平均施肥量高出 $68.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而最低投入量也达到了 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.纯氮平均投入量为 $194.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,同样以化肥氮为主,有机肥氮平均投入量仅为 $7.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.从连续 2 年的调查数据不难发现,汉江上游农户对氮肥的投入存在较大的不合理性.同时,有机氮肥投入量太少,仅占总氮投入的 4.3% (油菜) 和 3.9% (水稻),比王小英等 (2013a;2013b) 在秦巴山区油菜和水稻中调研发现的有机肥提供农田总养分的 17.18% 和 5.5% 还少.造成此现状有两方面的原因:一方面是由于近年来调查区种植绿肥和从事养殖业的农户逐渐减少,有机肥源短缺;另一方面是由于使用有机肥费工费时且效果不明显,导致农民过分依赖化肥,忽视了对有机肥的利用.

表 2 汉江上游主要农作物水稻、油菜的肥料投入量

Table 2 Nutrient inputs on rice and rapeseed in the upper Hanjiang River

农作物	样本数	指标	肥料总投入量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
			化肥氮/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	有机肥氮/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	
油菜	206	最大值	528.7	480.0	28.9
		最小值	0	0	0
		平均值	221.1	153.2	6.7
		标准差	92.6	69.8	10.9
水稻	200	最大值	659.1	630.0	48.3
		最小值	135.0	90.0	0
		平均值	289.5	194.6	7.6
		标准差	79.1	88.4	10.7

3.2 汉江上游农田生产体系氮素负荷状况

3.2.1 总体状况 晏娟等 (2009) 研究发现,当氮肥过量施用,水稻对氮的奢侈吸收导致氮肥生理利用率急剧下降.当稻田施氮量由 $46\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥的生理利用率由 $45.0\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $22.7\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$.而水稻施氮量为 $350\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的平均氮肥农学利用率最低,只有 $5.56\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与施氮量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的最大值相比,下降了 62.8%.因此,本研究调查结果采用氮 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 分级来反映氮素的环境效应.由表 3 可知,氮盈余量超过 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的样本共 166 个,占总调查样本量的 40.8%;而盈余量超过 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的样本占 4.6%,平均盈余量为 $325.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.调查农户 (406 个样本) 平均氮盈余量达 $77.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,同时,养分投入不足的农户相应的氮养分表现为亏缺,其样本比例也达到 16.0%.土壤氮养分盈余量越高其土壤氮负荷程度越高,对当地环境的影响越大;反之,土壤养分表现亏缺,则会影响作物产量,长期以往还会引起土壤质量退化.由调查情况来看,汉江上游土壤氮素养分高负荷与低亏缺并存,推荐合理的施肥量对该区域农户增产增收,减少环境压力都有重要意义.

表 3 汉江上游主要农作物氮养分平衡总体状况

Table 3 Total nitrogen nutrient surplus status in the upper Hanjiang River

分级/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	样本量	样本分布频率	氮盈余量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	变异系数
<0	65	16.0%	-35.9	74.2%
0~100	175	43.1%	44.8	64.7%
100~200	147	36.2%	134.2	17.2%
>200	19	4.6%	325.9	24.0%
总计	406	100%	77.4	112.1%

3.2.2 不同作物种类种植条件下土壤氮素负荷

从不同作物氮肥投入来看,水稻化肥氮和有机肥氮的投入量都略高于油菜 (表 4).但由于水稻籽粒产量及茎叶产量都显著高于油菜产量,因此,作物成熟后氮素的带出量相应也高.其中,水稻收获后带出量为 $197.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而油菜收获时带出量为 $103.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.而从氮养分盈余量来看,水稻和油菜作物均表现出盈余现象,其盈余量分别为 20.72 和 $72.02\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.另外,从氮养分平衡指数来看,即氮养分投入量与氮养分吸收量之比均不高,分别为 1.69 和 1.10,均小于 2.

表 4 不同作物土壤氮养分平衡状况

Table 4 Nitrogen nutrient surplus status of different crops

农作物	样本数	氮投入/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			平均籽粒产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均茎叶产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮带走量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮盈余量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NBI
		化肥氮	有机肥氮	沉降氮					
油菜	206	153.2	6.7	15.62	2440	5509	103.5	72.02	1.69
水稻	200	194.6	7.6	15.62	8424	7978	197.1	20.72	1.10

注:NBI为养分平衡指数.

3.3 汉江上游主要农作物氮肥投入量与产量的关系

从连续 2 年调查数据可知,汉江上游水稻平均产量为 $8424.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均氮肥投入量为 $202.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.通过进一步分析发现,水稻产量与氮肥施用量表现一定的关系(图 2a),用多项式拟合,其方程为: $y = -0.0095x^2 + 4.8336x + 7881.1$ ($R^2 = 0.0218$),表明在合适的施肥范围内,增加 1 kg 氮肥可增加水稻产量约 4.8 kg .同时,由图 2a 还可知,随着氮肥用量的增加,增产量却逐渐下降,这与南方水稻主产区得出结果相一致.而油菜平均产量为 $2440.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均氮肥投入为 $159.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.通过分析可知,油菜产量与氮肥施用量与水稻具有相似趋势(图 2b),用多项式拟合,其方程为: $y = -0.0042x^2 + 2.6208x + 1955.8$ ($R^2 = 0.0717$),表明在合适的施肥范围内,增加 1 kg 氮肥可增加油菜产量约 2.6 kg ;随着氮肥用量的增加,油菜产量逐渐下降.

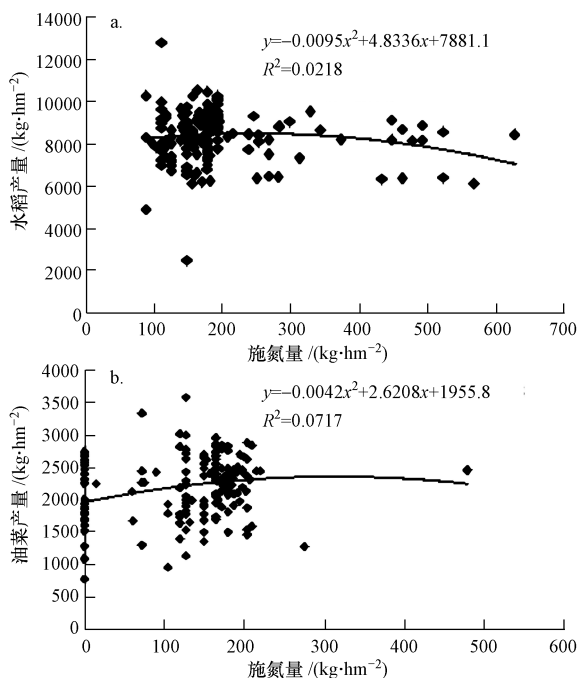


图 2 氮肥投入量与产量的关系

Fig.2 Relationship between yield and nitrogen fertilizer inputs

3.4 汉江上游土壤养分现状评价分析

3.4.1 农田土壤耕层有机质含量 通过对调查时采集的土壤样品分析可知,汉江上游农田土壤耕层有机质平均值为 $20.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于全国水平 $24.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (国家耕地质量长期定位监测报告,2011年),与南方水稻主产区耕层有机质平均值 $33.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 相比更低,且主要集中在 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两个区间,分别占 43.8% 和 46.5% (表 5),小于 $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大于 $30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的仅占 3.8% 和 5.9% .根据全国土壤第二次普查养分分级标准,调查区土壤耕层有机质含量处于 3 级($20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 4 级($10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)水平,属于较缺乏状态.整个调查区土壤有机质含量变化幅度较大,在 $1.4\sim 37.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.这与农户不重视有机肥的投入有很大关系.

3.4.2 农田土壤耕层碱解氮含量 由表 5 可知,调查区土壤碱解氮平均值为 $118.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且主要集中在 $50\sim 100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两个区间,分别占 32.2% 和 47.1% ,小于 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大于 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的分别占 2.8% 和 3.8% .与南方水稻主产区耕层土壤碱解氮平均值 $113.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 基本处于同一水平(邹娟等,2011).根据全国土壤第二次普查养分分级标准,调查区土壤耕层碱解氮含量处于 2 级水平($100\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),属于丰富状态.但整个调查区土壤碱解氮变化幅度较大,变异系数为 33.84% .

3.4.3 农田土壤耕层有效磷含量 调查区土壤有效磷含量平均值为 $16.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.而全国耕层土壤有效磷含量自 2004—2011 年一直呈上升趋势,2011 年全国耕层土壤有效磷平均值达到了 $27.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,南方水稻主产区耕层土壤有效磷平均值为 $19.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.连续 2 年调查的采样区农田土壤耕层有效磷含量低于全国水平及南方水稻主产区水平(表 5),且主要集中在 $10\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两个区间,分别占 50.3% 和 25.6% ,小于

5 mg·kg⁻¹和大于 40 mg·kg⁻¹的分别占 6.9%和 1.5%。与邹娟等(2011)在长江流域湖北、四川、江苏等 10 个省 74 个田间试验的监测值(16.0 mg·kg⁻¹)相比,处在同一水平。整个调查区土壤有效磷含量变异系数较大(52.1%),说明调查的 406 个有效样本中农户磷肥投入差异较大。

3.4.4 农田土壤耕层速效钾含量 速效钾含量平均值为 147 mg·kg⁻¹。全国土壤耕地质量监测显示,2011 年全国耕层土壤速效钾平均值为 130.1 mg·kg⁻¹,南方水稻主产区耕层土壤速效钾平均值为 87 mg·kg⁻¹。汉江上游农田土壤耕层速效钾含量略高于全国水平,显著高于南方水稻主产区。且调查采样区农田土壤耕层速效钾含量分布较为分散(表 5),50~100、100~150、150~200 及 200 mg·kg⁻¹以上所占比例均占 20%左右。调查区土壤速效钾含量变异系数较大,为 48.9%,仅次于有效磷变异系数。说明尽管土壤速效钾较为丰富,但后期农民施肥过程对钾肥的投入差异较大,长期以往必将引起土壤缺钾现象,影响作物增产增收。

表 5 汉江上游农田土壤养分含量现状

Table 5 Content of nutrient in the upper Hanjiang river

养分	含量分级/ (mg·kg ⁻¹)	样本分 布频率	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	变幅/ (mg·kg ⁻¹)	变异系数
有机质	<10×10 ³	3.8%	6.3×10 ³		29.58%
	10×10 ³ ~ 20×10 ³	43.8%	16.5×10 ³		
	20×10 ³ ~ 30×10 ³	46.5%	23.6×10 ³	1.4×10 ³ ~ 37.1×10 ³	
	>30×10 ³	5.9%	33.4×10 ³		
	总计	100%	20.43		
碱解氮	<50	2.8%	31.59		33.84%
	50~100	32.2%	84.2		
	100~150	47.1%	122.5	11.4~278.6	
	150~200	14.1%	170.1		
	>200	3.8%	226.2		
总计	100%	118.3			
有效磷	<5	6.9%	3.01		52.1%
	5~10	15.7%	7.9		
	10~20	50.3%	15.4	1~46.9	
	20~40	25.6%	27.4		
	>40	1.5%	44.6		
总计	100%	16.87			
速效钾	<50	5.2%	41		48.9%
	50~100	23.4%	77		
	100~150	28.5%	124	25~462	
	150~200	23.3%	175		
	>200	19.6%	257		
总计	100%	147			

4 讨论(Discussion)

汉江上游主要农作物化肥氮的投入量远高于有机肥氮的投入量。施氮量在 180 kg·hm⁻²以上的样本占 48.8%,最高施氮量达 630 kg·hm⁻²。同时,不施化学氮肥的现象依然存在。通过多项式拟合方程可知,水稻产量与氮肥施用量表现一定的正向关系,但随着氮肥用量的增加,特别是在施氮量超过 200 kg·hm⁻²后,增产量却逐渐下降,油菜与水稻具有相似的结果。这与 Jing 等(2007)的研究结果一致,当施氮量超过 225 kg·hm⁻²后,作物产量将不会变化。过量施氮只会使作物奢侈吸收,造成作物籽粒灌浆不充分,千粒重下降(李伟波等,1997),而且还会滋生病虫害,作物容易发生倒伏(Tirol *et al.*, 1996)。此外,当氮肥过量施用,作物对氮的奢侈吸收会导致氮肥生理利用率急剧下降。过量施氮肥不仅不增产,反而降低了氮肥利用率,造成大量资源浪费和环境污染,无论在经济上,还是在生态环境上都得不偿失。

农田生产体系氮素负荷量与施氮量之间存在显著正相关关系,过量施用氮肥会造成土壤及周边环境氮负荷的增加。调查区不同作物氮肥投入存在差异,过量与不足并存,但总体上氮肥投入量高于产出的需求量。过量施氮必然会造成氮素盈余,调查区农田氮盈余量超过 100 kg·hm⁻²的样本占调查样本的 40.8%,但养分投入不足相应氮养分会表现亏缺,其样本比例也到达了 16.0%。不同作物比较而言,水稻田氮盈余量(20.72 kg·hm⁻²)低于油菜地(72.02 kg·hm⁻²)。张维理等(2004)在北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染调查研究时指出,凡是年施氮量超过 500 kg·hm⁻²,作物施氮量与吸氮量之比大于 2.5 的地区,地下水硝酸盐含量基本上全部超标。尽管该调查区域个别农户施氮量超过 500 kg·hm⁻²,但养分平衡指数均小于 2.5,依此判断调查区农户施氮量还未造成地下水硝酸盐污染,这与同延安等(2004)在汉中水稻田间试验的结果一致。但樊军等(2005)研究表明,过量施氮时,硝态氮累积严重,累积层主要集中在 100 cm 以下。也有大量研究资料(陈静生等,2004; Riley *et al.*, 2001)表明,目前,农业生产地区浅层地下水或地表水硝酸盐浓度的提高与大量施用氮肥及灌溉有直接的关系。过量施用氮肥会导致作物生长期及收获后土壤积累大量的硝态氮,进而增强了向非土壤环境迁移的能力。

李志宏等(2001)研究表明,高氮处理的土壤剖面无机氮分布呈明显的淋洗剖面.Raun 等(2005)通过 23 年长期定位试验研究表明,作物在肥料氮用量达到 $85.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以前,0~240 cm 深的土壤剖面中无机氮的数量与无肥对照区的土壤剖面相同,超过这一数量后引起土壤剖面无机氮明显线性累积.而调查区农田施氮量远远超过 $85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此,对该区域氮肥投入量是否引了环境污染问题及对地下水污染造成潜在威胁还需更为深入的探讨研究.

结合调查区农田土壤养分析可知,该区域土壤耕层有机质含量为 $20.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于全国和南方水稻主产区水平.这可能是由于近些年调查区农田有机肥的投入量少所致,不施有机肥的农户高达 65.03%.而土壤有机质是土壤肥力的重要基础物质,有机肥中不仅含有植物所必需的大量和微量元素,还含有丰富的有机养分,如蛋白质、氨基酸、纤维素等,肥效持久,能促进土壤中微生物的繁殖,改善土壤理化性状,从而提高土壤肥力(赵佐平等,2013).根据全国土壤第二次普查养分分级标准,该区域碱解氮含量处于 2 级水平,属于丰富状态,这与当地农户习惯高量氮肥投入有关.由于调查农户传统的重氮偏磷轻钾的习惯还未改变,土壤有效磷含量低于全国水平.而调查区地处“西北小江南”的汉中地区,属北方富钾地,尽管农民对钾肥投入积极性不高,但土壤速效钾含量为 $147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仍略高于全国水平 $130.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.这并非说明该区域不需要施钾肥,如果长期对钾肥投入不足,必将引起土壤缺钾现象,导致土壤质量下降,影响作物产量.

有研究指出,由于不合理施肥,陕西省每年在粮食作物上可能损失的化肥氮高达 12.2 万 t(同延安等,2004),这不仅造成肥料资源浪费,而且大大加剧了该地区环境氮负荷.其次,过量施氮不仅对作物产量没有帮助,反而会增加温室气体排放.研究表明,农业中 70%的温室气体来自于氮肥(Metz *et al.*, 2007).可见,汉江上游农田生产体系氮养分的不合理施用造成的氮盈余,不仅会给农田带来土壤环境氮素负荷,而且给环境造成潜在威胁,长期以来会给汉江上游水质带来环境压力.

5 结论(Conclusions)

汉江上游主要农作物平均化肥氮投入量为 $173.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机肥氮投入量仅为 $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.84.0%的农田氮素样本处于盈余状态,平均盈余量

为 $77.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中,盈余量超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本占 40.8%.养分投入不足表现为氮养分亏缺的样本占调查样本的 16.0%.土壤养分含量表现为氮、钾丰富,有机质、有效磷含量偏低现象.

责任作者简介:赵佐平,男,博士,讲师,主要从事生态环境与养分循环研究.E-mail:zhouzuoping@126.com.

参考文献(References):

- 陈静生,于涛.2004.黄河流域氮素流失模数研究[J].农业环境科学学报,23(5):833-838
- 陈清硕.1997.过量使用化学氮肥的负效应[J].农资科技,(4):2-3
- 杜加银,茹美,倪吾钟.2013.减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J].植物营养与肥料学报,19(3):523-533
- 樊军,邵明安,郝明德,等.2005.黄土旱塬面生态系统土壤硝酸盐累积分布特征[J].植物营养与肥料学报,11(1):8-12
- 方玉东,封志明,胡业翠,等.2007.基于 GIS 技术的中国农田氮素养分收支平衡研究[J].农业工程学报,23(7):35-41,293
- 郝高建.2005.氮素化肥淋溶污染与控制方法的研究[D].西安:陕西师范大学
- Jing Q, Bouman B A M, Hengsdijk H, *et al.* 2007. Exploring options to combine high yields with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China[J]. European Journal of Agronomy, 26(2): 166-177
- 李思悦,张全发.2005.对南水北调工程解决中国北方用水问题的分析[J].人民黄河,27(8):28-29
- 李伟波,吴留松,廖海秋.1997.太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J].土壤学报,34(1):67-73
- 李鑫.2007.华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系中肥料氮去向及氮素气态损失研究[D].保定:河北农业大学
- 李志宏,刘宏斌,张树兰,等.2001.小麦-玉米轮作制下土壤-作物系统对氮肥的缓冲能力[J].中国农业科学,34(6):637-643
- 吕殿青,同延安,孙本华,等.1998.氮肥施用对环境的影响的研究[J].植物营养与肥料学报,4(1):8-15
- Metz B, Davidson O, Bosch P, *et al.* 2007. Climate Change 2007 Mitigation // Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press. 97-115
- 全国农业技术推广服务中心.1999.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社.24-200
- 全国农业技术推广服务中心.1999.中国有机肥料资源[M].北京:中国农业出版社.44-45
- Raun W R, Johnson G V. 1995. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat [J]. Agronomy Journal, 87(5): 827-834
- Riley W J, Ortiz-Monasterio I, Matson P A. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 61(3): 223-236
- Tirol P, Ladha J K, Singh U, *et al.* 1996. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency[J]. Field Crops Research, 46(1/3): 127-143

- 同延安, Ove E, 张树兰, 等. 2004. 陕西省氮肥过量施用现状评价[J]. 中国农业科学, 37(8): 1239-1244
- 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 2011. 氮、磷、钾肥对水稻产量 品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 25(6): 645-653
- 王小英, 刘芬, 同延安, 等. 2013a. 陕南秦巴山区水稻施肥现状评价[J]. 应用生态学报, 24(11): 3106-3112
- 王小英, 刘芬, 同延安, 等. 2013b. 陕南秦巴山区油菜施肥现状评价[J]. 中国油料作物学报, 35(2): 190-195
- 魏样, 同延安, 乔丽, 等. 2010. 陕西省不同生态区大气氮沉降量的初步估算[J]. 农业环境科学学报, 29(4): 795-800
- 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 2009. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究[J]. 土壤, 41(3): 372-376
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 45(5): 915-924
- 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 2004. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 1. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 37(7): 1008-1017
- 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 2005. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 11(6): 711-716
- 赵佐平, 闫莎, 同延安, 等. 2012. 汉江流域上游生态环境现状及治理措施[J]. 水土保持通报, 32(5): 32-36
- 赵佐平, 同延安, 刘芬, 等. 2013. 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 24(11): 3091-3098
- 朱铁群. 2000. 我国水环境农业非点源污染防治研究简述[J]. 农村生态环境, 16(3): 55-57
- 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 2011. 长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究[J]. 作物学报, 37(4): 729-734