

洱海流域北部农田养分平衡及残留特性研究

汤秋香¹, 翟丽梅¹, 雷宝坤², 刘宏斌¹, 任天志¹, 郑洁¹, 刘培才¹

(1.中国农业科学院农业资源与区划研究所, 北京 100081; 2.云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘要:为减少农田氮磷流失,改善洱海水质、遏制富营养化发展,以洱海流域北部 8 个乡镇(镇)为研究区域,采用现场调查与分析测试相结合的方法研究了洱海流域北部 10 种典型轮作模式的施肥量、作物养分吸收量、农田养分盈余量以及土壤养分残留状况,对不同轮作模式农田养分平衡及残留特性进行了分析评价。结果表明,水稻-大蒜轮作模式下有机肥和氮肥的投入量显著高于其他模式,水稻-蔬菜作物轮作模式的磷肥投入量显著高于其他模式;不同轮作模式间土壤养分残留差异性以硝态氮最为突出:水稻-大蒜轮作条件下土壤硝态氮残留量达 $43.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于其他轮作模式;10 种轮作模式均处于养分盈余状态,以水稻-大蒜轮作模式养分盈余量最大,为 $1258.8 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1472.7 \text{ kgP}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$;养分盈余量差异主要凸现在小春季作物上;土壤中易流失的硝态氮、铵态氮和速效磷与氮磷肥的投入量和养分盈余均呈显著相关。表明水稻-大蒜和水稻-蔬菜轮作是洱海流域农田环境污染风险较高的种植模式,需要重点防控。

关键词:轮作模式;农田养分平衡;土壤养分残留;洱海流域

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)11-2163-08

Nutrient Balance and Soil Nutrient Status in Farmland of the Northern Watershed of Lake Erhai

TANG Qiu-xiang¹, ZHAI li-mei¹, LEI Bao-kun², LIU Hong-bin¹, REN Tian-zhi¹, ZHENG Jie¹, LIU Pei-cai¹

(1.Institute of Agricultural Resources and Regionalization, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.Institute of Agriculture Environmental Resources Research, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: Nutrients balance and soil nutrients status under different crop rotation systems in the north of Lake Erhai watershed was investigated for the risk evaluation and putting countermeasures for the nonpoint pollution from agricultural source. 10 typical crop rotation systems was surveyed for the amount of organic and chemical fertilizers, nutrients uptake by crops and soil residual nutrients content in 8 townships located in the north of Lake Erhai watershed. The amount of manure and nitrogen fertilizer under rice and garlic rotation systems was significantly higher than that of other planting patterns. Phosphate inputs under the rice and vegetable crops rotation patterns were significantly higher than other systems. Soil nitrate nitrogen residue was the most susceptible nutrient under different crop rotation systems which could be as high as $43.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for under rice and garlic rotation systems and significantly higher than the other rotation modes. Nitrogen and phosphorus budgets under all of the 10 typical crop rotation systems were positive, which means that fertilizer input are higher than the uptake by crops. Nutrients surplus was the highest under rice and garlic rotation system, which could be as high as $1258.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for N and $1472.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for P_2O_5 , respectively. Nutrient surplus was mainly occurred in the crops which were planted in arid season from September to May. Soil nitrate, ammonium and Olsen-P content were significantly related to the fertilizer input. Rice, garlic or other vegetable crop rotation pattern is the most threatened cropping systems for the water quality of Lake Erhai and should be pay attention to.

Keywords: crop rotation systems; nutrients balance; soil nutrients; watershed of Lake Erhai

洱海是云南省第二大高原淡水湖泊,孕育了大理地区近四千年的历史。近年来,洱海水质日益下降,逐

步由贫营养化过渡到中营养化,洱海是我国初期富营养化湖泊的典型代表,农田面源污染是洱海富营养化的重要原因之一^[1]。美国对非点源污染进行了鉴别和测量,发现农业是一个主要的非点源污染源,农田径流是全国 64%受到污染河流和 57%受到污染湖泊的主要污染源^[2];瑞士农田雨水径流中氮、磷含量相当于工业废水和城市污水中这类污染物的总和^[2]。金相

收稿日期:2010-04-26

基金项目:国家十一五水专项项目资助(2008ZX07105-002)

作者简介:汤秋香,女,河南开封人,博士,研究方向为面源污染。

E-mail:tangqiujiang2004_2@163.com

通讯作者:任天志 E-mail:rentz@mail.caas.net.cn

灿等指出,施用过量的氮磷化肥是导致滇池水体富营养化的重要原因之一^[3]。李荣刚等估计江苏太湖地区的各种污染源中,农业氮占总氮排放量的46%,农田氮占据了24%,为各类单项中的最大值^[4]。司友斌等认为农田氮磷的流失是引起水体富营养化的重要原因之一^[5]。农田养分平衡是对环境污染风险评价的重要指标,一般来讲,农田平衡盈余超过20%以上时,即可能引起对环境的潜在威胁^[6]。近年来,国内外在农田养分平衡方面做了较多的研究^[7-15]。李翠萍等进行了滇池湖滨带设施蔬菜、花卉的农田养分平衡研究,结果表明大部分作物的农田养分处于盈余状态^[16]。胡万里等进行了云南大田不同轮作模式养分平衡现状研究,结果显示烤烟-小麦轮作模式的养分较合理^[17]。本研究中,洱海湖水中的氮、磷含量已达《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)的Ⅲ-Ⅳ类水平,总体水质属Ⅲ类,部分水域达Ⅳ类,已跨入富营养化的区间^[18]。本文针对洱海流域北部不同轮作模式农田,通过比较土壤-作物系统中氮磷平衡状况,分析了系统中氮磷投入、作物氮磷利用和土壤养分累积状况的关系,讨论了不同轮作模式农田的环境风险,提出了减少农田养分盈余的措施。对于实现理想的农田生态系统养分管理策略具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 调查依据

利用大理市和洱源县农业统计年鉴数据,在统计分析洱海流域农田利用类型、种植作物结构、施肥用量、施肥方法等信息的基础上,进行实地调查和分析测试各类农田的氮磷投入与残留量。

1.1.2 实地采样和农户调查

于2009年4月—2009年5月,针对位于洱海流域北部弥苴河、罗时江沿岸(洱海支流)弯桥镇、喜州镇、邓川镇、右所镇、三营镇、牛街镇、凤羽镇、茨碧湖镇8个镇的26个行政村进行一对一^[19]农户调查和收获期田间采样,获取76份农户调查表,调查内容主要涉及:(1)耕地利用类型及分布;(2)主要种植作物、分布及产量;(3)主要种植作物播种面积及复种指数;(4)化学肥料种类、用量、施肥方法、施肥时间;(5)有机肥的来源、种类、用量;(6)秸秆产生量、去向(焚烧、堆肥、沼气化、直接还田、饲料)。

1.1.3 数据来源

(1)大理市、洱源县土壤数据(土壤志);(2)已有

农业面源污染调查、研究报告以及防治规划;(3)本次入户调查与实地测量的结果。

1.2 方法

1.2.1 样品的采集及分析方法

1.2.1.1 样品的采集

植物样品的采集:在作物收获时采集植株样品,随机选取正常生长的具有代表性植株3~50株,取营养器官和生殖器官分别制样。放入烘箱中105℃杀青15~30 min,在65℃烘干至恒重,称重、记录,计算植株样品含水量。烘干后用粉碎机粉碎,至样品全部过筛,样品编号,备测。

土壤样品的采集:对所调查地块作物收获时采集土壤剖面样品(0~30 cm),按S型路线多点采样,制备混合样。所取土样除杂混匀后,一部分制备土壤鲜样,不能及时测定的土样冰冻保存。

1.2.1.2 样品测定方法

植株样品的测定方法^[20]:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,用凯氏定氮法测定植株全氮,钼黄比色法测定植株全磷。

土壤样品的测定方法^[20]:土样含水量测定采用将新鲜土壤混合均匀,称取10.00 g左右土壤于铝盒中,105℃烘24 h,测含水量;鲜土样铵态氮测定采用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提-靛酚蓝比色法;鲜土样硝态氮测定采用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提-紫外分光光度计法;土壤全氮测定采用凯氏定氮法;土壤速效磷测定采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法;土壤有机质测定采用铬酸钾容量法-外加热法;土壤pH值的测定采用电位法。

有机肥样品的测定方法^[20]:全氮测定采用硫酸-水杨酸-催化剂消化法;全磷测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$ 消煮-钒钼黄比色法。

1.2.2 农田养分平衡计算方法

本文只采用肥料投入量和作物带走的养分量两项简单指标来反映农田养分的一般平衡状况,暂不考虑其他因素。二者之差为正值,则养分呈盈余状态;为负值时,则养分呈亏缺状态。

农田养分平衡计算方法^[10]:农田的各养分平衡量等于养分的投入量减去养分的带出量。

农田养分平衡(养分盈亏)=肥料投入量-作物带走的养分量

其中:肥料投入量包括化肥与有机肥投入量;作物带走的养分量=经济产量×(1-经济产量样品含水量)×经济产量样品的养分含量+废弃物质×(1-废弃

物样品含水量)×废物样品的养分含量。

1.2.3 数据分析与统计处理

本研究采用 SPSS17.0 统计软件进行数据的计算与分析。

2 结果与分析

2.1 不同轮作模式下农田肥料投入情况

如表 1 所示,水稻-大蒜轮作模式下有机肥和氮肥的投入量显著高于其他模式($P<0.05$),分别为 $64\ 531\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $772.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 磷肥投入量水稻-大蒜、水稻-马铃薯和水稻-洋葱轮作模式显著高于其他模式($P<0.05$),分别为 222.5 、 219.0 、 $220.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。究其原因大蒜是需肥多又耐肥的作物,大蒜施肥以氮肥为主,增施磷肥可显著增产,农民为追求经济效益,超负荷施用氮磷肥。据本研究结果,单季大蒜氮化肥(纯 N)用量平均为 $566.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷化肥用量(P_2O_5)为 $168.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,该用量远远高于洱海流域北部其他农作物氮、磷化肥的平均用量 $189.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $85.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。蔬菜作物马铃薯和洋葱氮肥用量也偏高,分别为 $485.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $442.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,两者的磷肥用量也较高,为 $186.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $185.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

从单季作物看,蔬菜作物肥料施用量均很高。据调查,近年来大蒜与其他蔬菜种植面积呈不同程度的上升趋势。马铃薯和洋葱经济效益与产量均优,但仅适宜个别地区种植。蚕豆经济效益低于蔬菜作物,但略高于其他作物,且栽种简便(可免耕),适应性好,因此,蚕豆的种植面积仅次于大蒜,而其他作物仅占极

少种植面积。

另外,该流域水稻-大蒜轮作模式普遍,水稻是主要的粮食作物,而大蒜经济效益好,在所调查的样本中,大蒜的平均经济效益和产量分别达到 $75\ 000\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $22\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且适宜种植区域广,大春季大蒜是主要种植作物。面对该流域农田种植结构相对单一的状况,加之农民为追求经济效益过量施肥,势必造成潜在环境风险。

2.2 不同轮作模式下土壤养分累积状况

对土壤样品进行分析测试,结果(表 2)表明,水稻-大蒜轮作条件下土壤硝态氮累积量明显高于其他轮作模式($P<0.05$),为 $43.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;水稻-马铃薯和水稻-洋葱轮作模式的土壤硝态氮累积量也较高为 $40.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $31.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;其他轮作模式的土壤硝态氮累积量无显著差异($P>0.05$)。土壤铵态氮累积量仅水稻-大蒜和水稻-苕子轮作模式存在显著差异外,其他轮作模式之间无明显差异($P>0.05$),其土壤铵态氮累积量分别为 $3.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而不同轮作模式之间的土壤全氮、pH 值和速效磷累积量无明显差异($P>0.05$)。土壤有机质除水稻-豌豆轮作模式偏低外,其他无显著差异($P>0.05$)。由此可见,不同轮作模式下土壤养分累积量的差异性主要体现为硝态氮和铵态氮含量的不同。

2.3 不同作物的农田养分平衡状况

本研究针对洱海流域北部的 10 种小春季作物的农户调查及植株养分数据进行分析,并计算出各作物的农田养分平衡情况。结果发现,大部分作物的氮、磷

表 1 肥料施用状况

Table 1 The situation of fertilizer input

轮作模式 Rotation modes	样本数(份) Samples(portion)	样本分布(乡镇) Samples distribution (townships)	有机肥施用量 Organic Fertilizer input/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	无机肥施用量 Inorganic Fertilizer input/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	
				氮肥 N	磷肥 P_2O_5
水稻-大蒜 Rice-Garlic	18	4	64 531a	772.6a	222.5a
水稻-蚕豆 Rice-Fava bean	16	4	54 882bc	356.1ef	128.8bc
玉米-大麦 Maize-Barley	9	3	40 500bcde	435.5def	67.3c
玉米-小麦 Maize-Wheat	6	3	41 250bc	404.8cde	76.5c
水稻-油菜 Rice-Rape	9	2	45 833bcd	331.7def	81.3c
水稻-马铃薯 Rice-Potato	2	2	57 500b	690.8b	219.0a
水稻-苕子 Rice-Vetch	3	2	30 000e	205.8f	54.0c
水稻-洋葱 Rice-Onion	1	1	37 500cde	647.8bc	220.0a
水稻-豌豆 Rice-Pea	2	2	45 000bc	405.8def	54.0c
水稻-黑麦草 Rice-Ryegrass	4	3	26 250de	585.3bcd	54.0c

注:同列数据后不同字母表示 5%差异显著水平。

Note: Lables in every list show 5% significant difference in different treatments

表 2 土壤养分残留情况

Table 2 Soil nutrient content

轮作模式 Rotation modes	铵态氮 Ammonium nitrogen/mg·kg ⁻¹	硝态氮 Nitrate nitrogen/mg·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available Phosphorus/mg·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	pH
水稻-大蒜 Rice-Garlic	3.3a	43.4a	4.6a	71.1a	78.5a	7.3a
水稻-蚕豆 Rice-Fava bean	1.6ab	10.1b	3.8a	54.1a	68.8a	7.2a
玉米-大麦 Maize-Barley	1.4ab	5.2b	3.1a	31.3a	59.2a	7.1a
玉米-小麦 Maize-Wheat	1.6ab	7.3b	2.3a	51.5a	41.0ab	6.5a
水稻-油菜 Rice-Rape	1.6ab	12.2b	3.7a	55.1a	68.3a	6.8a
水稻-马铃薯 Rice-Potato	1.5ab	40.1ab	2.6a	62.2a	53.4ab	7.3a
水稻-苕子 Rice-Vetch	0.7b	4.3b	4.3a	18.9a	74.9a	7.9a
水稻-洋葱 Rice-Onion	1.4ab	31.9ab	3.8a	78.1a	66.3a	7.8a
水稻-豌豆 Rice-Pea	2.5ab	18.4ab	1.8a	47.3a	29.7b	6.7a
水稻-黑麦草 Rice-Ryegrass	1.8ab	10.4b	3.8a	94.2a	68.9a	7.0a

注:同列数据后不同字母表示 5%差异显著水平。

Note: Lables in every list show 5% significant difference in different treatments

养分均处于盈余状态(表 3),尤其是大蒜田处于较高的氮、磷盈余状况,其氮、磷盈余分别为 1 042.4 kg·hm⁻²(N)和 1 126.0 kg·hm⁻²(P₂O₅)。另外,作物间的养分盈余量差异较大,其中,蔬菜作物(大蒜、马铃薯和洋葱)养分均有很高的盈余,马铃薯和洋葱的养分盈余量分别为 686.7 kg·hm⁻²(N)、777.3 kg·hm⁻²(P₂O₅)和 702.9 kg·hm⁻²(N)和 636.3 kg·hm⁻²(P₂O₅)。其主要原因可能是农户对各种蔬菜的需肥特性缺乏了解,盲目追求经济效益,增加施肥量,造成肥料投入过大,这不仅增加了农户的生产成本,而且对环境造成潜在的威胁。由此可见,过量的肥料投入造成土壤中大量氮、磷养分盈余,增加了养分流失的潜在风险。

经分析,豆科作物、粮食作物、油料作物及牧草的

养分盈余量则相对较低,其中牧草作物苕子氮、磷养分均处亏缺状态,亏缺量分别为-182.8、-78.0 kg·hm⁻²,黑麦草磷养分亏缺,亏缺量为-69.2 kg·hm⁻²。由数据可知,豆科作物(蚕豆、豌豆)和马铃薯对氮素的吸收利用率高于其他作物,分别为 306.6、380.3 kg·hm⁻²和 232.3 kg·hm⁻²,说明在一定程度上,它们可相应提高氮素的养分利用。

2.4 不同轮作模式下农田养分平衡状况

洱海流域北部的典型轮作农田养分平衡状况如表 4,10 种轮作模式均处于养分盈余状态。其中,水稻-大蒜轮作模式养分盈余量最大,为 1 258.8 kg·hm⁻²(N)和 1 472.7 kg·hm⁻²(P₂O₅);其次为水稻-马铃薯和 水稻-洋葱轮作模式,盈余量分别为 1 015.6 kg·hm⁻²

表 3 不同作物的农田养分平衡状况(kg·hm⁻²)

Table 3 Nutrient balance in different crops(kg·hm⁻²)

作物 Crops	作物带走养分量 Crop nutrition		肥料投入量 Fertilizer input		养分盈余 Nutrient surplus	
	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
大蒜 Garlic	267.4	231.2	1 309.8	1 357.2	1 042.4	1 126.0
蚕豆 Fava bean	306.6	193.0	523.5	672.0	216.9	478.9
大麦 Barley	137.9	153.5	387.2	265.3	249.3	111.8
小麦 Wheat	121.8	154.0	367.8	292.5	246.0	138.5
油菜 Rape	194.9	226.1	363.4	407.3	168.5	181.2
马铃薯 Potato	323.3	227.7	1 010.0	1 005.0	686.7	777.3
苕子 Vetch	182.8	78.0	0.0	0.0	-182.8	-78.0
洋葱 Onion	76.6	69.7	779.5	706.0	702.9	636.3
豌豆 Pea	380.3	195.7	425.0	360.0	44.7	164.3
黑麦草 Ryegrass	152.9	159.2	435.8	90.0	282.9	-69.2

注:表中肥料投入量包括有机肥和无机肥。

Note: Fertilizer input including organic fertilizer and inorganic fertilizer in table.

(N)、1 304.0 kg·hm⁻² (P₂O₅) 和 919.3 kg·hm⁻²(N)、983.0 kg·hm⁻²(P₂O₅)。不同轮作模式间的养分盈余量差异较大,其中,水稻-苕子轮作农田氮盈余量最小,为 258.6 kg·hm⁻²,水稻-黑麦草轮作模式磷盈余量最小,为 457.5 kg·hm⁻²。其他轮作农田养分盈余量居中分布。总体来看,水稻-蔬菜作物轮作农田养分盈余量较高,而玉米-粮食作物、水稻-牧草等轮作农田养分盈余量偏低,此结果与单季作物养分盈余状况相似。由此可见,影响不同轮作农田养分盈余量的主要因素在于小春季作物盈余量的差异。

2.5 影响土壤养分累积的主要原因

本研究对土壤养分残留量与轮作模式中作物的养分吸收量、肥料投入量及农田养分盈余量进行了相关分析,结果表明(如表 5),土壤中硝态氮残留量与氮、磷肥投入量和氮磷养分盈余量存在极显著的正相关关系 ($P<0.01$),相关系数分别为 0.90、0.86、0.86、0.78,与有机肥投入量存在显著正相关关系 ($P<0.05$),相关系数 0.65;土壤铵态氮残留量仅与氮肥、有机肥投入量及轮作农田氮盈余量显著正相关 ($P<$

0.05),其相关系数依次为 0.66、0.62 和 0.60;土壤速效磷残留量仅与磷肥投入量及轮作农田磷盈余量 (P₂O₅)显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为 0.73 和 0.61。土壤中全氮及有机质残留量则与诸因素无明显相关关系。

由相关分析结果可知,养分累积的主要影响因素是肥料的投入量和养分盈余量。作物间对养分的吸收利用也存在差异,但与差异较大的施肥量相比显得微不足道,因此,作物吸收利用养分量与土壤养分的残留量没有显著相关关系。土壤中易流失的硝态氮、铵态氮和速效磷与氮磷肥的投入量和养分盈余(N, P₂O₅)的相关系数均较高。

3 讨论

3.1 环境效益和经济效益的协调

在洱海流域北部,经济效益较好的作物(如大蒜、洋葱和马铃薯)农田养分盈余量和土壤养分累积量均很高。而豆科、粮食、油料及牧草等作物农田养分盈余及土壤养分累积量相对较低,豆科作物对氮的吸收

表 4 不同轮作模式的农田养分平衡状况(kg·hm⁻²)

Table 4 Nutrient balance in different crop rotation systems(kg·hm⁻²)

轮作模式 Rotation modes	肥料投入量 Fertilizer input		作物带走养分量 Crop nutrition		养分盈余 Nutrient surplus	
	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
水稻-大蒜 Rice-Garlic	1 740.6	1 771.2	481.8	298.5	1 258.8	1 472.7
水稻-蚕豆 Rice-Fava bean	1 179.3	1 446.0	521.0	260.3	658.3	1 185.6
玉米-大麦 Maize-Barley	1 043.0	1 039.3	352.3	220.8	690.7	818.5
玉米-小麦 Maize-Wheat	1 023.6	1 066.5	336.2	221.3	687.4	845.2
水稻-油菜 Rice-Rape	1 019.2	1 181.3	409.3	293.4	609.9	887.8
水稻-马铃薯 Rice-Potato	1 553.3	1 599.0	537.7	295.0	1 015.6	1 304.0
水稻-苕子 Rice-Vetch	655.8	774.0	397.2	145.3	258.6	628.7
水稻-洋葱 Rice-Onion	1 210.3	1 120.0	291.0	137.0	919.3	983.0
水稻-豌豆 Rice-Pea	1 080.8	1 134.0	594.7	263.0	486.1	871.0
水稻-黑麦草 Rice- Ryegrass	979.1	684.0	367.3	226.5	611.8	457.5

表 5 土壤养分累积与作物吸收、施肥及养分盈余的关系(kg·hm⁻²)

Table 5 The relationship between residual soil nutrients, plant nutrient uptake, the amount of fertilizer application and nutrient surplus(kg·hm⁻²)

土壤养分 Soil nutrients	作物带走养分量 Crop nutrition		施肥量 Fertilizer inputs			养分盈余 Nutrient surplus	
	N	P ₂ O ₅	有机肥 Organic Fertilizer	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.32	0.35	0.65*	0.90**	0.86**	0.86**	0.78**
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.46	0.52	0.62*	0.66*	0.26	0.60*	0.51
全氮 Total nitrogen	-0.3	-0.2	0.17	0.11	0.23	0.17	0.09
速效磷 Available phosphorus	-0.1	0.19	0.07	0.44	0.73*	0.55	0.61*
有机质 Organic matter	-0.3	-0.14	0.18	0.13	0.26	0.20	0.1

注:**表示 0.01 显著水平,*表示 0.05 显著水平。** is 0.01 significant level,* is 0.05 significant level.

利用和油料作物中油菜对磷的吸收利用较高,但农民为追求经济效益,造成以上作物种植面积偏小。

据相关研究,采用适宜的种植模式是控制农田面源污染的首要环节。发达国家在进行农田面源污染控制上,主要是在全流域范围内广泛推行农田最佳养分管理(best nutrient management practice, BNMP),通过对水源保护区农田轮作类型等的规定削减氮、磷总量,进行源头控制^[21-26]。德国撒克森州农民根据政府农业部门制定的生态农业轮作技术标准——轮作红绿灯,同时参考农产品的价格变化,选择合适的轮作类型,实现农业生产的高效与环境安全的双重目标^[27]。轮作或间作在一定程度上可以减少硝态氮的淋失,而农田休闲可以导致硝态氮的淋失潜力升高^[2]。

针对洱海流域应合理协调作物生产的环境效益与经济效益的矛盾,建议适当减少或调配单一作物的种植面积(如大蒜),可以根据作物的需肥特性和需肥关键生育时期将不同的作物进行合理的间作、轮作搭配及调配合理的施肥时间和施肥量,减少农田养分盈余。如蚕豆养分盈余量低,适种范围广,销路稳定,建议与大蒜等作物间作。另一方面,建议不同类型的作物间作和轮作,增加生物多样性,通过科学、合理的种植制度提高肥料的利用率,减少农田养分的流失,从而达到源头控制农田面源污染的目的。

3.2 维持农田养分平衡,实现养分高效利用

近年,洱海流域北部农田种植结构日趋单一,不仅破坏了农田生物多样性,削弱了农田自身抗御病虫害灾害的能力,同时,大蒜等高施肥量作物,种植面积呈不同程度的上升趋势。本研究发现,土壤中易流失的硝态氮、铵态氮和速效磷与氮磷肥的投入量和农田养分盈余(N, P_2O_5)的相关系数均较高。而在当地由于水稻-大蒜轮作模式较多,造成农田大水泡田现象普遍,加之水肥管理不配套,尤其在水旱过渡期和水稻生长期,串水串肥现象严重,人为排水普遍,另外田埂过低,暴雨径流带走大量氮、磷养分,成为农田养分流失的关键因素。且大蒜等施肥量较高的作物主要布局在近水体区域(大蒜主要分布于罗时江、永安江、弥苴河流域,它们均流入洱海),增加了农田氮、磷污染负荷,最终造成洱海水域的污染,农业增收也极易受到市场波动影响。

农田生态系统是一个比较复杂的系统,它是作物、土壤、肥料三者之间的一个动态平衡过程。影响这个平衡过程的因素很多,诸如土壤的性质和土壤的供肥能力、不同作物的营养要求及其地区性差异、不同

肥料的性质、种类及其利用率等^[28]。农田养分平衡状况一方面从根本上决定着土壤肥力的发展方向,而土壤肥力又是农业持续发展最基本的物质基础;另一方面,人们愈来愈重视农业生态系统养分循环和平衡对人类生活环境的影响。比如,农田养分平衡和某些化合物的去向,直接关系着大气、水体的污染,关系着土壤的养分退化,也直接决定着施肥的效果^[29]。因此,应根据作物种类、需肥习性和现状水平,结合土壤肥力特点,做到适时适量、科学合理施肥。农田生态系统中肥料利用率的高低是决定农田氮、磷流失量的一个重要因素。提高肥料利用率,不仅可以提高经济效益,而且可以减轻对水环境的污染。具体措施主要是氮肥按作物生育期需要分次施用、深施、施用缓效氮肥,同时,使用硝化抑制剂、脲酶抑制剂对降低土壤中 $NO_3^- - N$ 的含量都有较好的效果。磷肥集中施于农作物根系主要分布层,与有机肥混合施用,总的原则是减少土壤固定,提高磷肥的利用率。

4 结论

(1)洱海流域北部水稻-大蒜轮作模式单位面积肥料投入量最高,农田养分盈余、土壤硝态氮和铵态氮残留量也明显高于其他作物。

(2)本研究中不同轮作模式下的农田养分均处于盈余状态,且差异较大,其中,水稻-蔬菜作物轮作模式下养分盈余量较大。而水稻-豆科、水稻-粮食、水稻-油料和水稻-牧草等轮作模式下养分盈余量较低。

(3)洱海流域北部普遍氮磷肥投入量较高,尤其体现在主导经济作物上,而由于较高的肥料投入量造成农田养分盈余量偏高,最终影响土壤养分残留量。因此,应合理调节作物-土壤-肥料三者养分循环的动态平衡,实现养分高效利用,降低污染风险。

参考文献:

- [1] 杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析[J]. 云南环境科学, 2006, 25 (增刊): 113-115.
YANG Xiao-xue. Analysis on total phosphorus and nitrogen pollution status of Erhai watershed[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, 25 (suppl): 113-115.
- [2] 许仙菊. 上海郊区不同作物及轮作农田氮磷流失风险研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
XU Xian-ju. Studies on nitrogen and in different crop and phosphorus losses risk rotation farmlands in Shanghai Suburb[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [3] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

- JIN Xiang-can. Controlling and management technology of lake Eutrophication[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [4] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 147-153.
- LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Water pollution and emissions to water of Jiangsu Taihu Lake[J]. *Lake Science*, 2000, 12(2): 147-153.
- [5] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000, 4: 188-193.
- SI Yong-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Nitrogen and phosphorus loss of farmland and eutrophication[J]. *Soil*, 2000, 4: 188-193.
- [6] 鲁如坤, 刘鸿祥, 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Ⅳ 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 197-199.
- LU Ru-kun, LIU Hong-xiang, WEN Da-zhong, et al. Typical areas of China agro-ecosystems of the nutrient cycling and balance of nutrients IV: assessment and principles of farmland nutrients balance[J]. *Soil Science*, 1996, 27(5): 197-199.
- [7] 黄绍文, 金继运, 左家宝, 等. 农田土壤养分平衡状况及其评价的试点研究[J]. 土壤肥料, 2000(6): 14-19.
- HUANG Shao-wen, JIN Ji-yun, ZUO Yu-bao, et al. Nutrient balance of agricultural soils and their evaluation[J]. *Soil Fertilizer*, 2000(6): 14-19.
- [8] 鲁如坤, 时元正, 施建平. 我国南方6省农田养分现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.
- LU Ru-kun, SHI Yuan-zheng, SHI Jian-ping. Nutrient balance of a groecosystem in six provinces in Southern China [J]. *China Agricultural Science*, 2000, 33(2): 63-67.
- [9] 王建国, 刘鸿翔, 王守宇, 等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 246-251.
- WANG Jian-guo, LIU Hong-xiang, WANG Shou-yu, et al. Law of nutrient eutrient equilibrium, gain and loss in black soil farmland [J]. *Soil Science*, 2003, 40(2): 246-251.
- [10] 曹凤进, 王志进, 朱建桦. 农田肥料投入监测与养分平衡分析[J]. 土壤肥料学报, 2002(2): 18-21.
- CAO Feng-jin, WANG Zhi-jin, ZHU Jian-hua. Monitoring farmland fertilizer input and analysis on nutrient balance[J]. *Soil and Fertilizer Science*, 2002(2): 18-21.
- [11] 封志明, 方玉东. 甘肃省县域农田氮素投入产出平衡研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002(2): 256-259.
- FENG Zhi-ming, FANG Yu-dong. Analysis on nitrogen input/output balance in croplands on county level in Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2002(2): 256-259.
- [12] 王 静, 张维理, 郑 毅, 等. 滇池流域环境友好作物轮作模式的选择[J]. 云南农业大学学报, 2006, 21(5): 663-669.
- WANG Jing, ZHANG Wei-li, ZHENG Yi, et al. Selection of environmental friendly crop rotation pattern in Dianchi Catchment [J]. 2006, 21(5): 663-669.
- [13] Huang S W, Jin J Y, Bai Y L, et al. Evaluation of nutrient balance in soil-vegetable system using nutrient permissible surplus of deficit rate [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38: 959-974.
- [14] Anonymous. Manure and the environment, the Dutch approach to reduce the mineral surplus and ammonia volatilization[M]. Amsterdam: Ministry of Agriculture, Nature Conservation and Fisheries, 2001.
- [15] Ondersteijn C J M, Beldman A G G, Daatselaar C H G. The dutch mineral accounting system and the european nitrate directive: implications for N and P management and farm performance[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 92: 283-296.
- [16] 李翠萍, 续勇波, 李永梅, 等. 滇池湖滨带设施蔬菜、花卉的农田养分平衡[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(6): 804-809.
- LI Cui-ping, XU Yong-bo, LI Yong-mei, et al. The Nutrient balance in the protected fields of vegetable and flower cultivation in Dian Lake-front[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(6): 804-809.
- [17] 胡万里, 段宗颜, 陈拾华, 等. 云南大田不同轮作模式养分平衡现状研究[J]. 西南农业学报, 2009, 22(3): 594-597.
- HU Wan-li, DUAN Zong-yan, CHEN Shi-hua, et al. Study on nutrient balance of different rotation models in field of Yunnan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(3): 594-597.
- [18] 杨曙辉, 宋天庆. 洱海湖滨区的农业面源污染问题及对策[J]. 农业现代化研究, 2006, 27(6): 428-438.
- YANG Shu-hui, SONG Tian-qing. Problems of pollution derived from agriculture in Erhai Lake District and Countermeasures [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2006, 27(6): 428-438.
- [19] 汤秋香, 谢瑞芝, 李少昆, 等. 典型生态区保护性耕作主体模式及影响农户采用的因子分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 469-477.
- TANG Qiu-xiang, XIE Rui-zhi, LI Shao-kun, et al. Analysis of conservation tillage pattern and the factors influencing farmers adoption in typical ecological region in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 469-477.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001.
- LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [21] Smith K A, Chambers B J. Muck: from waste to resource. Utilisation the impacts and implications[J]. *Agricultural Engineer*, 1995, 50: 33-38.
- [22] Lord E I. Pilot nitrogen sensitive areas scheme. Results from the first four years[A]//Petchey A M, D'Arcy B J D, Frost C A. (Eds.), Di. Use Pollution and Agriculture. The Scottish Agricultural Colleges (SAC) Edinburgh, 1996: 64-72.
- [23] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in Northern China[J]. *Competes Rends Biologist*, 2009, 332(4): 385-392.
- [24] Wei Y P, Chen D L, Kelin H, et al. Policy incentives for reducing nitrate leaching from intensive agriculture in desert oases of Alxa, Inner Mongolia, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1114-1119.
- [25] Riaz M, Mian I A, Malcolm S, et al. Extent and causes of 3D spatial variations in potential N mineralization and the risk of ammonium and

- nitrate leaching from an N-impacted permanent grassland near York[J]. *UK.Environmental Pollution*, 2008, 156(3):1075-1082.
- [26] 潘根兴, 等. 低施磷水平下不同施肥对太湖地区黄泥土磷迁移性的影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(3):91-95.
- PAN Gen-xing, et al. Effect of longterm fertilization practices on mobility of phosphorus in a huangnitu paddy soil receiving low P input in the Taihu Lake Region, Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):91-95.
- [27] 张维理, 冀宏杰, KOLBE H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控学, 2004, 37(7):1018-1025.
- ZHANG Wei-li, JI Hong-jie, KOLBE H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating Strategies II :Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American Countries[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1018-1025.
- [28] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京:中国农业出版社, 1986.
- Chinese Academy of Agricultural Sciences Institute of Soil Fertilizer. China's fertilizer division[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1986.
- [29] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社, 1998.
- LU Ru-kun. Principles and fertilization of Soil-plant nutrition[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 1998.