

水肥综合管理对减少滇池北岸韭菜地氮磷流失的研究

石艳平^{1,2}, 段增强¹

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:农田氮、磷随地表径流向水体迁移,不仅造成化肥利用率降低,农业生产成本上升,还对水环境造成污染,引起水体富营养化。针对滇池流域规模化韭菜生产施肥量大,农业面源污染严重等问题,采用田间试验,结合自然降雨与人工模拟降雨,研究了不同施肥及田间沟渠利用方式下农田氮、磷的流失风险。结果表明,相对于化肥表施,合理的有机-无机肥料配合施用以及化肥深施,可分别降低地表径流中总氮和总磷平均浓度 53%和 39%。施肥后 1 周为氮、磷流失的高风险期,随后其风险随时间延长而降低;通过小区间沟渠的改造,提高排水溢流口高度,控制径流在沟渠内滞留时间以及采用农田养分循环利用的回灌技术,可减少农田向环境水体输出总径流量的 76%以上,并同时提高了肥料利用率。

关键词:施肥;控制排水;滇池韭菜地;氮磷流失

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-2138-07

Integrated Management of Water and Fertilizer to Reduce Nitrogen, Phosphorus Loss from Chinese Chive Field in the North Bank of Dianchi Lake

SHI Yan-ping^{1,2}, DUAN Zeng-qiang¹

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The nitrogen (N) and phosphorus (P) release to surface waters from farmland not only leads to the declining of utilization rate of fertilizer, but also results in the raising of agriculture cost, as well as leads to the pollution and eutrophication of freshwater bodies. Effects of different fertilizing modes and ditch utilization patterns on controlling the pollution N and P from surface runoff in connecting with high chemical fertilizer dosage applied in Dianchi Lake region were investigated through field experiment with natural and artificial simulated rainfall. The result showed that compared with surface application of chemical fertilizer, right amount manorial together with chemical fertilizer, and subsoil fertilization could reduce the concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in runoff by 53% and 39%. The first week after fertilization was the main duration of N, P loss by runoff, then, the risk reduced by time. Recycle nutrients and water in runoff back into the field through rebuilt ditch could reduce the amount of runoff more than 76%, as well as increase the utilization rate of fertilizer.

Keywords: fertilizer application; controlled drainage; Chinese chive field in Dianchi Lake; nitrogen and phosphorus loss

农业流域非点源 (Non-point pollution source, NPS) 污染物的大量输出,特别是农田径流中 N、P 输出是构成地表水体富营养化的主要原因^[1-4]。流域 NPS 的输出控制对水体保护和治理至关重要。农业流域非点源的控制途径主要有源区控制和迁移控制^[5],后者因花费大、需要恢复的时间较长,效果相对较差,因此,通过 NPS 的源区控制使 N、P 在农田系统内部循

环是流域非点源污染管理的关键^[6]。国内外的研究表明,改进施肥方式与确定合理的施肥量可以减少氮磷流失^[7-8]。另外,滇池流域的水资源非常匮乏,充分利用地表径流雨污混合水资源,是可有效削减污染物入湖的重要手段^[9]。因此,如何利用雨水灌溉,也是这一地区节水灌溉研究的重点之一。合理控制农田排水,不仅有助于延长排水历时,降低排水峰流量,减轻下游排涝和防洪压力,而且还可减少径流输出量,提高降水利用效率,减少农田氮磷损失,这对保护农业流域水环境具有现实意义。为了寻求更合理的水肥管理方式,减少滇池流域农田氮磷污染负荷,2007 年 5 月—2007 年 11 月在昆明市官渡区六甲乡开展了田间水

收稿日期:2009-03-27

基金项目:国家科技支撑计划课题(2008BADA6B02)

作者简介:石艳平(1983—),男,硕士研究生,主要从事植物营养与生态环境方面的研究。

通讯作者:段增强 E-mail:zqduan@issas.ac.cn

肥综合管理与调控的示范工程试验研究。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

滇池是我国著名的高原淡水湖泊,位于云南省中部,昆明市南郊。滇池全湖面积 298.4 km²,平均水深 4.1 m,是一个具有城市生活供水、工农业供水、养殖、防洪、旅游、疗养、航运、调节径流和发电供水等多种功能的湖泊。自 20 世纪 90 年代开始,滇池出现了严重的富营养化。

示范区地处滇池流域,位于昆明城郊的滇池北岸湖积平原,北纬 102°43',东经 24°58',海拔高程为 1 887.4 m,属中亚热带湿润季风气候,年温差相对较小,日温差相对较大,年平均气温 14.7℃,≥10℃积温 4 490.3℃,年平均相对湿度 74%,常年风向以西南风为多,频率为 80%。据近 40 年资料统计,示范区年平均降雨量约为 1 000 mm,年平均降水日数 135 d,近 80%的降水集中在 5—10 月,而且 5—10 月径流量约占全年总量的 86%,20 年一遇的单场暴雨为 50~80 mm。示范区地处典型的城乡结合地段,以种植蔬菜业为主,蔬菜结构与品种比较单一,韭菜种植面积约占该区域耕地面积的 90%。

试验地采集的土样经风干、过 2 mm 筛,用于土壤 pH、有效磷、速效钾的测定,测定方法见《土壤农业化学分析方法》^[10],土壤 pH 用 1 mol·L⁻¹KCl 浸提测定,液土比($W_{\text{KCl}}/W_{\text{土}}$)为 5/1、有效磷用 0.03 mol·L⁻¹NH₄F-0.025 mol·L⁻¹HCl 浸提,钼锑抗比色法;速效钾用 1 mol·L⁻¹CH₃COONH₄ 浸提,火焰光度法测定。部分风干土样进一步研磨过 0.149 mm 筛,用于全氮、全磷和有机质测定。用外加热重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机质;浓硫酸混合催化剂消化-半微量凯氏法测定全氮;硫酸高氯酸消化-钼锑抗比色法测定全磷。土壤主要肥力指标见表 1。

1.2 试验设计与测试方法

试验区种植韭菜 (*Allium tuberosum* Rottb.ex Spreng)。试验田分成 3 块,每块面积约 200 m²(长约

表 1 研究区农田土壤主要肥力指标(0~20 cm)

Table 1 The most fertility index of soil in the field studied (0~20 cm)

有机质/ g·kg ⁻¹	速效钾/ g·kg ⁻¹	速效氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	全钾/ g·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	pH
54.4	0.25	0.40	0.074	1.49	1.73	0.12	7.8

60 m×宽 3.3 m)作为一个处理,分别为:A,按当地农民习惯施肥,即撒施肥料(基肥和追肥均为尿素和氮磷钾三元复合肥);B,深施,肥料种类和施用时间及用量均与小区 A 相同;C,有机-无机肥配合平衡深施,以 300 kg 精制有机肥(养分含量 3.8%,氮磷钾养分比为 2:1:2)+三元复合肥作基肥,追肥为三元复合肥,施肥时间与小区 A、B 一致。各小区追肥时间均为 2007 年 7 月 6 日、8 月 10 日、9 月 7 日、10 月 8 日、11 月 10 日。深施即在韭菜行间开沟 10~15 cm,施入肥料后覆土。各小区施肥量见表 2。

小区之间用 PVC 挡板(宽 1.5 m,沿韭菜地边埋入地下,深度为超出韭菜地面 20 cm)隔开,防止小区之间养分、水分窜流。沟渠为满足收集地表径流和作为灌溉水源的双重要求设计,即收集绝大部分降雨地表径流(少数径流因沟渠容量有限,通过溢流阀排出田外),同时沟渠收集的径流水待天旱时作为灌溉水源。本试验沟渠容量按 50 mm 降雨径流量设计,设计将沟渠加深为 1.2 m,梯形设计,下底宽 50 cm,上底宽 100 cm,以当地普通韭菜地(沟渠一般深度为 30~80 cm)为对照,沟渠收集的径流水干旱时作为灌溉水循环利用(注:本试验期间为雨季,雨量较充沛,沟渠收集蓄积的径流水足够天干时灌溉需要,没有利用外源水灌溉)。田内各小区可分配 1 条渠,为了便于试验要求,渠间设堵水埂,高度低于韭菜地面 20 cm,防止沟渠之间养分、水分窜流。各小区之间的堵水埂高度低于溢流阀 10 cm,当遇到特大暴雨时或较大强度持续性降雨时,沟渠主要行使排水通道的功能,通过溢流阀排向田外生态排水渠。

小区径流收集采用自行设计的 PVC 移动式径流收集管收集,该收集管可以方便的放置在小区任意位置,本试验选取每个小区中间一段(如小区平面图所

表 2 各小区的施肥时间、方式与施肥量

Table 2 The date, mode and amount of fertilizer application on each experimental plot

小区	施肥方式	基肥施用时间	基肥种类施肥量/kg	追肥种类施肥量/kg·次 ⁻¹	施肥量合计/kg
A	撒施	2007-06-07	尿素,氮磷钾复合肥 4.10, 1.75, 1.03	尿素,氮磷钾复合肥 4.10, 1.75, 1.03	24.6, 10.5, 6.2
B	深施	2007-06-07	尿素,氮磷钾复合肥 4.10, 1.75, 1.03	尿素,氮磷钾复合肥 4.10, 1.75, 1.03	24.6, 10.5, 6.2
C	深施	2007-06-07	有机肥,氮磷钾复合肥 4.82, 2.38, 2.30	氮磷钾复合肥 2.88, 1.42, 1.38	19.2, 9.5, 9.2

注:施肥量从左至右分别为 N, P₂O₅, K₂O。

示)收集地表径流过程动态监测样,收集样品时径流收集管放置于小区边缘,略低于韭菜地面。人工模拟降雨地点设在各小区埋设径流收集管的位置。小区平面设计图与沟渠剖面示意图 1。

降雨施肥间隔氮磷流失风险研究试验,设在 2007 年 9 月 7 日施肥后第 1、2、3、5、7、10、15 d 进行,自然降雨不能完全满足条件,进行人工模拟降雨辅助研究,装置为自行设计的侧喷式人工模拟降雨装置,主要由 750 W 潜水泵、胶管、水表、小孔喷头等组成。人工模拟降雨地点设在各小区中间长 6 m 左右并安装了径流收集管的一段韭菜地,模拟降雨水取自各小区沟渠蓄积的径流水和雨水,降雨面积为 $3.3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,降雨地段两端设置临时挡板,限制径流流出,相应的沟渠段设置临时堵水埂,以便于计算收集到的地表径流量。人工模拟强度为 $72.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降雨历时为 90 min,径流取样装置和方法均与自然降雨的方法相同,即在降雨后韭菜地开始产生地表径流时即开始采样,在 PVC 收集管出口处收集径流水样,采样时间间隔为 10 min,直到径流过程结束,每场降雨采集径流全过程样品,一般每次为 6~8 个样品。

1.3 测定项目及计算方法

当降雨产生径流时开始计时并采集样品,在 PVC 收集管出口处收集径流过程样,每间隔 10 min 采 1 个样。

根据国家环保总局编著《水和废水监测分析方法(第四版)》用双波长紫外分光光度法测定消化液中硝态氮,全氮用过氧化钾氧化紫外分光光度法测定,铵态氮采用纳氏试剂比色法测定,硝态氮与铵态氮之和代表总可溶性氮(TDN)。过氧化钾氧化钼锑抗比色法测定消化液中总磷(TP); $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,过氧化钾氧化钼锑抗比色法测定消化液中总可溶性磷(TDP)。

总氮(磷)负荷量为各时段各种形态氮(磷)流失量之和。各时段径流氮(磷)流失量为各时段径流体积乘以各时段相应形态氮(磷)的浓度,径流体积为各小区独立沟渠降雨前后水量之差。

$$L_j = \sum_{t=1}^n C_{ij} \times Q_{ij}$$

式中: L_j 为一场降雨中 j 项污染物的流失量,mg; C_{ij} 为第 t 时段内 j 项污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_{ij} 为第 t 时段内 j 项污染物的径流量,L。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥方式对韭菜地降雨地表径流总氮、总磷浓度的影响

试验期间共收集到自然降雨和人工模拟降雨地表径流 15 次,其中自然降雨(总降雨量为 27.6~126.4 mm 之间)6 次,人工模拟降雨(强度为 $72.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)9

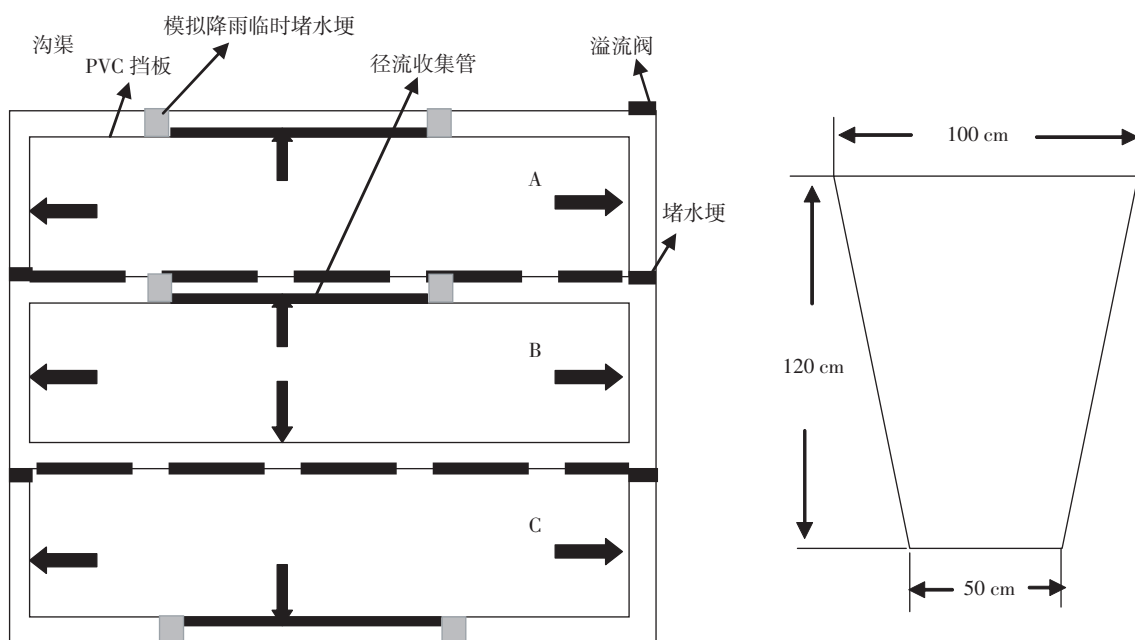


图 1 试验区平面图与沟渠剖面图

Figure 1 Schematic diagram of the experimental field and its ditch

次。本文选取 2007 年 8 月 11 日自然降雨(52.4 mm)的典型降雨径流过程进行分析,此次降雨离最近一次施肥间隔为 1 d。不同处理地表径流总氮、总磷浓度动态变化如图 2。随着地表径流形成后时间推移,各处理下地表径流总氮、总磷浓度均是先升高到一个峰值后下降的趋势,前人研究结果也表明农田降雨径流总氮的动态过程分为前期浓度出峰期和后期浓度下降稳定期^[10]。各施肥方式下地表径流总氮、总磷浓度大小顺序为平衡深施<深施<表施。

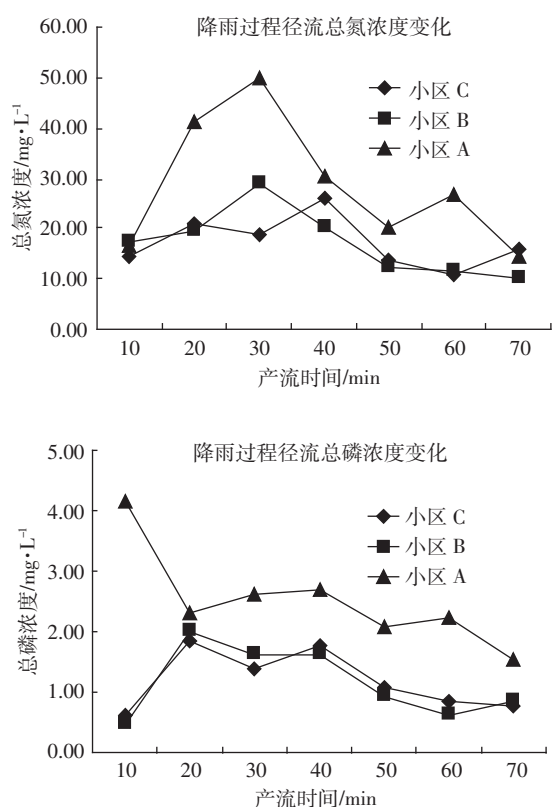


图 2 自然降雨各处理下总氮与总磷浓度动态变化

Figure 2 Dynamics of the concentration of total nitrogen and total phosphorus in runoff during nature rainfall

不同施肥方式下地表径流总氮浓度变化趋势相同,均为先升高后降低。相同时间内传统表施径流流失氮的风险要明显高于深施和平衡深施处理。而且小区 A 总氮浓度变化的幅度更大,在形成地表径流 5 min 时总氮浓度为 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,30 min 后升高到最大值达 $49.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随后下降,最小值仅 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而深施和平衡深施处理径流总氮峰值分别为 28.1 和 $21.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最小值分别为 6.8 和 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。不同处理间总磷浓度相对差异更大,表施总磷浓度最大值高出深施和平衡深施 1.3 倍和 1.6 倍。表施地表径流总

磷浓度随着时间延长明显降低,而深施条件下先升高到一定峰值后降低,说明深施条件下土壤覆盖阻止了肥料中磷向地表的迁移,但产流约 10 min 后地表土壤侵蚀从溅蚀转变成了细沟侵蚀,滞留在表层土壤下的养分被雨滴击溅,径流冲刷,浸提迁移到径流中,所以养分浓度迅速升高^[11]。这说明肥料表施径流中氮、磷浓度时间变异系数更大,氮、磷流失的风险更大,肥料深施能有效降低农田氮、磷径流流失风险。相同时间内比较,深施处理径流总氮浓度又略高于平衡深施,一方面这是由于平衡深施减少了肥料的施用量,段永惠等研究表明农田径流中总氮和总磷负荷与氮肥和磷肥施用强度具有一定的正相关性^[12];另一方面,平衡施肥能提高土壤养分作物吸收率,使得土壤累积的氮、磷养分相对减少^[13]。另外,有机肥的施用增加了土壤径粒及团聚体含量,提高了阳离子交换量,从而增加了的阳离子吸附和酸根离子的固持作用,减少可溶性氮磷的流失^[14]。

相对于化肥表施(小区 A),合理的有机-无机肥料配合施用以及肥料深施(小区 C)可分别降低降雨地表径流中总氮和总磷平均浓度 53.29% 和 39.16%。

2.2 人工模拟降雨条件下不同施肥方式的总氮、总磷流失负荷

总氮流失负荷随降雨施肥间隔时间的延长而降低(图 3)。施肥后的前 7 d 以内肥料表施的小区 A 总氮流失负荷均在 $3.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,说明降雨施肥后 1 周内连续降雨氮流失风险较大,而 7 d 后风险有所下降。杨金玲等在皖南丘陵地区旱地农田氮素径流流失试验表明,施肥后 1 周是氮素流失控制的关键期^[15]。而相同间隔天数时,小区 A 总氮流失负荷要明显大于深施的小区 B 和平衡深施的 C 小区,尤其是施肥后 1 周内,小区 A 总氮负荷较小区 C 高出 52.2% 以上,而 B 与 C 之间相差不大,表明肥料深施能有效减少降雨径流氮素负荷。

总磷流失负荷随小区 A 间隔天数增加而明显降低(图 2)。施肥后 3 d 内 A 区总磷流失负荷明显大于 B 和 C 区。随着降雨施肥间隔天数的增加,A 区总磷负荷迅速下降,而 B 和 C 总磷流失负荷在第 2 d 出现峰值之后变化趋于平缓,均稳定在 $0.15 \sim 0.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。这说明肥料表施后 3 d 内的降雨更容易较大的磷负荷。前人研究表明,旱地降雨地表径流含有大量的泥沙负荷,而泥沙颗粒物会富积大量的氮磷养分,特定的土壤和降雨条件下,地表径流途径中颗粒态磷占总磷 75% 以上^[16-17]。Olness 等研究发现磷污染负荷

的产生及输出主要集中在土壤表层 0~5 cm 这一范围内^[18],因此肥料表施遇到大强度的降雨极易产生很大的磷污染负荷。施肥间隔 10 d 以后小区 B 和 C 总磷流失负荷虽然大于小区 A,但都低于 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处于较低流失风险水平,说明由于前 1 周的连续高强度降雨,深施条件下肥料中的磷流失较少,土壤中累积的磷相对较多,土壤中一部分磷能逐步参与到径流-侵蚀过程中;而表施条件下,使已经流失的总磷量多达约占当次施肥量的 1/4,使得能随径流迁移的磷已经大大减少。这表明深施覆土和平衡施肥有很好的保肥作用,深施条件下土壤覆盖阻止了肥料中磷向地表的迁移,不但能够减少施肥后前期养分的大量流失,还能保证后期农作物养分的供应,另外有机肥本身有养分缓释的功能,能够在施肥过后较长时间内稳定供肥。

3 个小区在 15 d 内连续高强度降雨条件下,小区 C 总氮和总磷累积流失量比小区 A 分别减少 31.41% 和 20.98%。施肥后 15 d 内连续降雨各小区氮磷累积流失量均适合指数函数拟合曲线(图 4),且拟合系数 R^2 均均在 0.98 以上。这说明,不论何种施肥

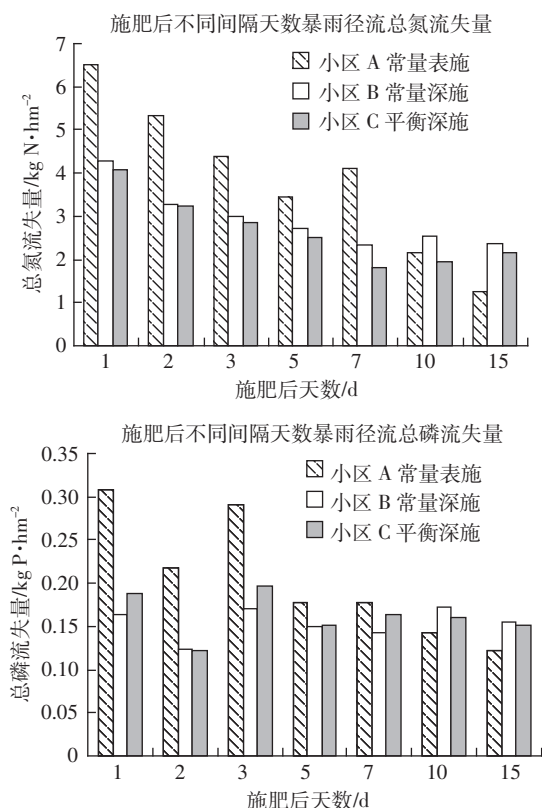


图 3 不同降雨施肥间隔总氮与总磷流失负荷

Figure 3 Load of total nitrogen and total phosphorus loss on each plot at different rainfall interval time after fertilizer application

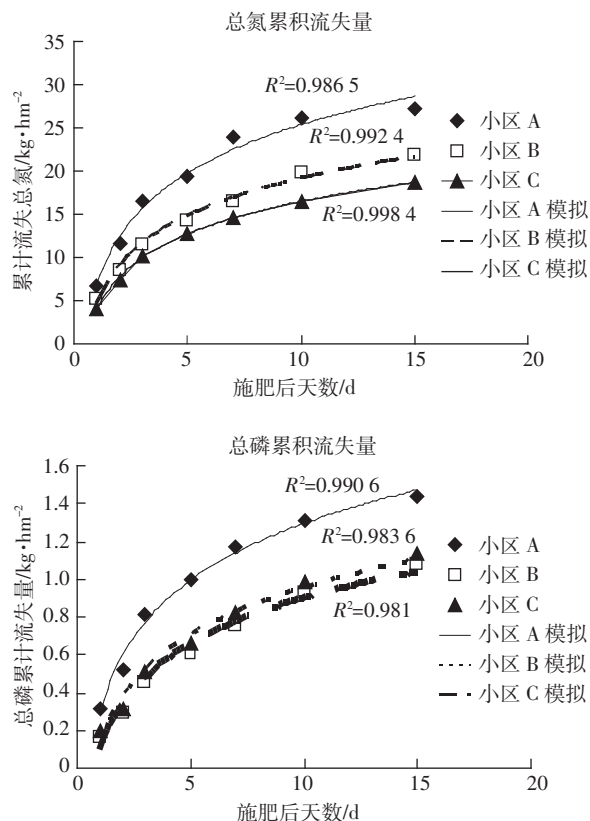


图 4 15 d 内连续降雨条件下氮、磷累积流失量及拟合曲线

Figure 4 Accumulative total load of total nitrogen and total phosphorus on each plot under continuous rainfall in 15 days after fertilizer application and their fitting curve

方式,施肥量多少,在施肥后连续高强度降雨条件下,菜地总氮总磷累积流失量采用指数函数拟合是合适的。进一步说明,施肥后的连续高强度降雨期养分流失风险很大。

2.3 沟渠雨水滞留与控制排水

表 3 显示试验区在 2007 年 5—11 月期间沟渠蓄水与排水量以及排水量占总径流量的比例。沟渠加深能增加蓄水量,试验区沟渠挖深到 1.2 m,容量比常规排水沟提高 50%~200%。据气象资料显示,2007 年昆明 5—11 月总降雨量约为 800 mm,57.5%集中在 7—8 月,是当地 36 年来少有的连续性暴雨。在此期间,试验区沟渠向外溢流排放径流次数仅有 3 次(表 3),且总排放量仅占总径流量的 19.98%,比当地常规沟渠(50 cm 深计算)减少 76.31%。国外最新研究表明,一年中农田 60% 以上的水土流失和养分流失是由少数几次大强度降雨事件引起的^[19],因此能控制好 7—8 月间的连续性暴雨,便能控制全年农田径流向外排放量。另外,沟渠收集的径流水可以待干旱时节回灌入地,不仅能使水资源充分利用,还能使径流中

表 3 2007 年 5—11 月沟渠蓄水量与排水量

Table 3 Water amounts of saving and drain by the furrow from May to November in 2007

日期	降雨量/mm	径流量/m ³	蓄水量/m ³	排水量/m ³	排水量占总径流量比重
7月18日—7月20日	126.4	31.06	29.74	1.32	4.25%
7月24日—7月25日	86.5	21.31	14.85	6.49	30.46%
8月11日	52.4	12.9	7.65	5.25	40.70%
合计	265.3	65.28	52.24	13.04	19.98%

表 4 径流在沟渠水中不同滞留天数 TN、TP
去除率及可溶性 N、P 比重(%)

Table 4 The total N, total P removal rate and ratio of soluble N, soluble P after runoff water different demurrage days in ditch (%)

降雨后天数/d	0.5	1	2	3	5
TN 去除率/%	13.1	25.3	27.5	39.7	41.3
TP 去除率/%	23.6	39.7	39.9	41.4	39.6
TDN/TN	60.0	75.3	79.3	79.6	82.0
TDP/TP	52.3	68.0	74.5	77.6	79.7

养分回收到地里重新供作物吸收利用。

农田沟渠蓄水可延缓径流排放,同时可利用沟渠湿地系统的自净能力降低氮、磷浓度(表 4)。加深沟渠深度相当于间接增加溢流口高度。研究表明,控制排水口溢流堰高度,具有良好的氮、磷控制效果^[20]。农田沟渠径流中,土壤颗粒只要以悬移质形式移动,土壤颗粒中不可溶的氮、磷是其损失的主要形式;泥沙在水中具有明显的垂直分布规律,即下部泥沙粒径大、含量高,上部则相反。因此抬高田内沟渠向外排放的溢流口高度,可阻止底部泥沙的输出,同时减小沟道水力梯度,降低水流流速和挟沙能力,使水流中颗粒氮、磷浓度降低。降雨后 5 d 内,随着时间的延长,沟渠水中氮、磷去除率一般逐渐增加,但是总磷去除率第 5 d 较第 3 d 略有下降,原因是沟渠的自净速度小于由水分蒸发浓缩而引起总磷浓度升高的速度。殷国玺等在坡度为零的油菜田进行试验,发现在田间墒沟水平上控制排水,通过延长雨后涝水在墒沟和农田的滞留时间,氮损失可减少 53.2%,效果十分明显^[21]。从表 4 可以看出,降雨后沟渠水中可溶性总氮和可溶性总磷比重逐渐升高,说明沟渠水自净的途径主要是沉降颗粒态氮磷。郭相平等的研究结论认为,增加雨水在农田沟系中的滞留时间,有利于充分发挥排水沟的湿地功能,减少氮磷排放,其主要途径是土壤颗粒沉淀、土壤吸附、植物吸收和反硝化作用^[22]。农田径流进入沟系中滞留期间流速趋近于零,水中悬移质和颗粒态氮磷得以部分沉淀,可以大大降低氮、磷排放浓度。

3 结论

(1)控制施肥量和合理的施肥方式能有效减少农田地表径流 N、P 损失。平衡施肥能提高作物产量和品质^[23],本试验结果显示,根据作物养分需求规律所需的氮、磷、钾配比施肥,加之有机与无机肥料配施能够增加施肥后期土壤肥力,从而提高肥效,减小施肥对环境的负面效应。肥料深施能够明显降低农田降雨径流总氮和总磷浓度,是减少农田氮、磷径流流失的有效途径。

(2)施肥后连续高强度降雨条件下,氮、磷养分径流流失的风险很高,在施肥后半个月连续高强度降雨条件下,菜地总氮总磷累计流失量以指数函数增加,为了减少氮、磷输出,应尽量避免在高强度降雨或连续性降雨时节施肥。

(3)沟渠滞留与控制排水能有效减少农田氮、磷损失。农沟蓄水能减少农田径流输出量,不仅能够提高雨水资源利用率,还能有效减少氮、磷污染负荷。控制排水能够有效减小输出农田外的污水总氮总磷浓度,其方式只要是靠沉降颗粒态氮磷为主。

参考文献:

- [1] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮磷流失与水体富营养化[J].土壤,2000,32(4):188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Nitrogen and phosphorus loss from farmland and water body eutrophication[J]. Soils, 2000, 32(4): 188-193.
- [2] Onema O, Roset J C W. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface water: the effects of policies and measurements in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 1998, 37: 19-30.
- [3] 郭 伦,李佩武.降雨过程与氮、磷流失特征研究[J].环境科学学报,1996,16(1):111-115.
WU Lun, LI Pei-wu. Research on characteristics of rainfall process and N, P loss[J]. Journal of Environmental Science in Chinese, 1996, 16(1): 111-115.
- [4] 张乃明,余 扬,等.滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J].环境科学,2003,24(3):155-158.
ZHANG Nai-ming, YU Yang, et al. Effect factors on phosphorus load in

- runoff from agricultural soils in Dianchi-Lake[J]. *Environment Science*, 2003, 24(3):155-158.
- [5] 单保庆,尹澄清,等.降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J].环境科学学报,2001,21(1):7-12.
- SHAN Bao-qing, YIN Cheng-qing, et al. Study on phosphorus transport in the surface layer of soil with rainfall simulation method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(1):7-12.
- [6] Harris B L, Nipp T L, Waggoner D K, et al. Agricultural water quality program policy consideration[J]. *J Environ Qual*, 1995, 24:405-411.
- [7] 潘根兴,褚清河,张英,等.太湖地区高产水稻土经济极点施肥:一种农田N、P养分负荷的田间控制技术[J].环境科学,2003,24:96-100.
- PAN Gen-xing, ZHU Qing-he, ZHANG Ying, et al. The economic-pole-fertilization on high yield paddy soil in Taihu regione: A sort of field control technique of N, P nutrient load in farmland[J]. *Environmental Science*, 2003, 24:96-100.
- [8] 张兴昌,郑剑英,吴瑞浚,等.氮磷配合对土壤氮素径流流失的影响[J].土壤通报,2001,32(3):110-112.
- ZHANG Xing-chang, ZHENG Jian-ying, WU Rui-jun, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on soil nitrogen loss[J]. *Soil Bulletin*, 2001, 32(3):110-112.
- [9] 刘忠翰,王海玲,彭江燕,等.滇池流域降雨径流资源利用的技术途径[J].自然资源学报,2005,20:780-789.
- LIU Zhong-han, WANG Hai-ling, PENG Jiang-yan, et al. Technology of utilization of runoff resource in Dianchi Lake valley[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20:780-789.
- [10] 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,2000.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science Publisher, 2000.
- [11] 梁新强,陈英旭.雨强及降雨施肥间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J].水土保持学报,2006,20(6),14-17.
- LIANG Xin-qiang, CHEN Ying-xu. Effects of rainfall intensity and fertilization interval to nitrogen loss from rape field[J]. *Water and Soil Conservation*, 2006, 20(6):14-17.
- [12] 段永惠,张乃明.施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究[J].土壤,2005,37(1):48-51.
- DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus loss from farmland runoff[J]. *Soils*, 2005, 37(1):48-51.
- [13] 徐泰平,朱波,等.平衡施肥对紫色土坡耕地磷素径流流失的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(4):1055-1059.
- XU Tai-ping, ZHU Bo, et al. Effects of balanced fertilization on phosphorus loss by runoff from slope cropland in purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):1055-1059.
- [14] 宁建凤,皱献中.有机无机氮肥配施对土壤氮淋失及油麦菜生长的影响[J].农业工程学报,2007,23(11):95-100.
- NING Jian-feng, ZHOU Xian-zhong. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizer on the soil nitrogen leaching and the growth of leaf-used lettuce[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):95-100.
- [15] 杨金玲,张甘霖.皖南丘陵地区小流域氮素径流输出动态变化[J].农村生态环境,2001,17(3):1-4.
- YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin. Dynamic change in nitrogen discharge with runoff from a small watershed in Southern Anhui hilly areas[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(3):1-4.
- [16] 晏维金,张申.模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J].环境科学学报,2000,20(3):332-337.
- YAN Wei-jin, ZHANG Shen. Sediment enrichment mechanisms of phosphorus under simulated rainfall conditions[J]. *ACTA Science of Circumstantiae*, 2000, 20(3):332-337.
- [17] 段亮,段增强.太湖旱地非点源污染定量化研究[J].水土保持通报,2006,26(6):40-43.
- DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang. Quantification of non-point pollution from uplands in Taihu Lake catchment[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6):40-43.
- [18] Olness A E, Smith S J, Rhoades E D. Nutrient and sediment discharge from agricultural watersheds in Oklahoma[J]. *J Environ Qual*, 1975, 4:331-336.
- [19] Romos M C, Matinez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedes region (NE Spain)[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 113:356-363.
- [20] 晏维金,尹澄清.氮磷在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J].应用生态学报,1999,10(3):312-316.
- YAN Wei-jin, YIN Cheng-qing. Phosphorus and nitrogen transfers and runoff loss from rice field wetlands of Chaohu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3):312-316.
- [21] 殷国玺,张展羽,郭相平.地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J].灌溉排水,1999,18(3):4-11.
- YIN Guo-xi, ZHANG Zhan-yu, GUO Xiang-ping. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. *Irrigation and Drainage*, 1999, 18(3):4-11.
- [22] 郭相平,张展羽,殷国玺.稻田控制排水对减少氮磷损失的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2006,24(3):307-310.
- GUO Xiang-ping, ZHANG Zhan-yu, YIN Guo-xi. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorus from paddy field[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2006, 24(3):307-310.
- [23] 李晓林,张福锁,米国华.平衡施肥与可持续优质蔬菜生产[M].北京:中国农业大学出版社,2000.
- LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo, MI Guo-hua. Fertilizing for sustainable production of high quality vegetables[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1999.