

# 《减少草坪农药径流的最佳管理措施》

## 常识性方法可以大大降低水污染风险。

作者：B.E. 布拉纳姆、F.Z. 坎迪尔和 J. 穆勒

**过**去 40 年中高尔夫管理取得了长足进步，使得高尔夫球场管理者能够获得优良的草坪质量。然而，实现极高水平的草坪质量需要大量投入，包括化肥、灌溉、追肥、种植、润湿剂、生物激活剂和农药。尽管追肥、栽培和润湿剂等做法被认为对环境无害，但是由于其中化肥和农药可以游离出草坪并进入地下水和地表水，因此这些产品广受关注。

草坪农药浸出已有深入研究。<sup>1,5,6,9</sup> 尽管农药浸出是行栽作物中的主要问题，但农药从草坪中浸出的风险比之前所认为的要小得多。草坪农药浸出比起行栽作物的问题要小得多，主要原因有两个。

首先，与行栽作物农业相比，美国所有高尔夫球场经农药处理的种植面积不过是九牛一毛。据美国国家高尔夫基金会的报告，截至 2002 年底，美国有 14725 个 18 洞高尔夫球场等量的设施。如果我们假设每个高尔夫球场平均包含 3 英亩果岭、5 英亩发球台和 30 英亩球道，那么在美国施用农药的高尔夫球场总数（粗草区通常几乎不施用农药，虽然可以控制杂草）总共为 559550 英亩。这个总面积比伊利诺伊州中部一个普通县种植的玉米和大豆总面积还要少。2001 年，全

国大约有 7575.2 万英亩土地种植玉米，而大豆种植面积为 7410.5 万英亩。其中大多数都施用了农药。美国所有集约管理高尔夫球场的总面积甚至不足美国这两大作物种植面积的 0.4%。

农药浸出对草坪的风险较小，其原因之二是草坪本身。USGA 资助的前期研究项目细查了草坪对农药运动和降解的影响。<sup>2,3,4</sup> 我们发现，相同农药农药施用于草坪与施用于裸露土壤相比，浸出降低、降解率提高（行栽作物的常见做法）。

这两个差异导致许多人得出结论，认为草坪草农药的地下水污染风险很低，但并不是不存在。适当的管理仍然是关键。在某些场地，特别是沙质土壤、浅层地下水和靠近水体的地方，草坪管理者需要慎重选择所使用的农药。

但是，农药的径流是完全不同的问题。什么是径流呢？径流是一种自然事件，当雨水或灌溉水超出土壤/草坪的吸收能力时就会产生径流。这一现象相当普遍。根据土壤类型、坡度等，可能经常发生在特定场地地点发生，也可能很少发生。径流本身并不是坏事，但当径流含有农药、营养物质或其他污染物时，就可能会出现

问题。农药浸出大多会对地下水造成威胁（虽然使用空心砖排水渠也可能因为农药渗滤液而威胁到地表水），而农药的径流则会对地表水造成威胁。大多数高尔夫球场都配有水景，而且常常会有溪流、河流或雨水渠接收高尔夫球场的径流。初步研究表明，农药的径流量可能很大。有研究人员报告称多达 10% 的施用农药进入了径流。<sup>7</sup>

### 勘察径流

考虑到这一背景，我们考察了一些可以在高尔夫球场发生径流时减少农药浓度的管理措施。我们首先修建了一个进行径流研究的场地。该场地是倾斜的，但需要根据我们的需求作一些修缮。修缮由总部位于圣路易斯的 Munie Outdoor Services 公司进行。该公司免费提供劳动力和设备，建造出一个 5% 均匀坡度的地块，面积约为 150 英尺 X 35 英尺。

他们还安装了雾灌系统，可以提供两个强度的模拟降雨事件。雨滴与雾头的产水量有很大不同，这对于裸露的土壤来说非常重要。但我们认为，当草坪覆盖到位时，水量差异不太重要。这些地块于秋天建成，可在冬天休整，而于次年春天种植下匍匐剪股颖。夏季的其余时



在伊利诺伊大学建造了 5% 坡度的径流地块，用于研究施用农药后灌溉和刈割物管理对不同溶解度农药径流的影响。

间，安装径流收集设备并对系统进行测试，并于夏末进行了试运行。

2003 年夏天，我们配备了人员和设备来进行实验。我们评估了三种减少农药径流的可能性策略。第一，在农药施用显著减少农药径流后，是否可以在短时间内进行灌溉？通过将农药从叶面上冲刷并深入茅草和土壤，可减少径流中农药浓度和总量吗？

第二个实验室考察了农药施用和径流事件之间的时间长度。一些草坪管理者和业主使用自然降雨来代替灌溉。如果预计要下雨，则可以施用农药或肥料，利用雨水灌溉作物。当然如果雨水产生径流，农药流失就可能相当高。在径流事件发生之前应用少量灌溉，可以减少径流的可能性，从而相应地减少农药的径流吗？

第三个实验关于修剪管理。草坪是一种独特的作物，因为每种农药都直接施用在其叶子上。即使农药

主要被根系吸收，大量农药也会粘附在叶片上。我不认为我们已经将刈割物确定为农药污染源，但是农药施用后，第一次刈割能有效地释放了大部分施用的农药。如果下雨时这些刈割物被移走，则大量的农药也将随刈割物转走。

收集刈割物时会产生更棘手的问题。如果刈割物是堆肥，则会导致农药残留迅速退化，但必须注意防止雨水将农药从刈割物中冲刷出来。如果刈割物简单地分散于粗草区，草坪管理者可能会在无意中造成高浓度农药区域，而这些区域可能易受浸出或径流影响。

#### 实验步骤

在每个实验中，农药都是作为三通池混合物进行施用。我们根据其水溶性以及高效液相色谱（HPLC）分析的简易性，对农药进行选择。每个三通池混合物都含有我们分类为具有高、中或低水溶性的农药。当农药用于径流时，水溶性起着主

导作用。具有较高水溶性的农药更容易被流动水移动。具有非常低水溶性的农药，其移动时在水中的浓度则会较低。最佳的管理方法可能需要根据水溶性进行修改。换句话说，减少高度水溶性农药流失最有效的方法对于不溶于水的农药来说可能不那么有效。

施用农药后，在适当时间启动喷雾系统，以便每次试验均产生径流。施用灌溉，直到所有地块产生至少 40 升的径流。在每个实验中，施用约 2 小时的灌溉。从每个 40 升径流样品中，将 4 升子样品收集到琥珀玻璃水罐中。用高效液相色谱法对样品进行分析，以确定水样中每种农药的含量。

第一个实验研究了应用后灌溉在减少农药径流方面的效果。施用三种农药——百菌清（Daconil Ultrex™）、多效唑（Trimmit™）和精甲霜灵（Subdue Maxx™），并在施用农药后 0.25、1、4、8 或 24 小





农药施用后进行灌溉，直到所有地块产生至少 40 升的径流。

时人工进行 0.2 英寸施用后灌溉。在农药施用后 25 小时开始模拟产生径流的雨水事件（即，应用最后一次农药冲刷处理 1 小时后模拟降雨）。

### 实验结果

第一个实验的结果令人失望。无论如何检查数据，几乎都没有显著差异。试验得出的最重要的一点是施用农药后灌溉并不能有效减少径流的农药量。仔细检查数据之后取得了一个重要研究结果。在施用农药后 15 分钟，施用后灌溉减少了径流中百菌清含量。从农药化学的角度来看，这可能是说得通的。百菌清极不溶于水，普遍认为其水溶解度为 0.6 PPM。<sup>8</sup> 水溶性低的产品通常用作水乳剂，以将产品制成可喷雾形式。一旦喷雾在叶面上变干，乳化特性就会丧失，农药就会根据其天然水溶解度而发挥作用。

水溶解度低于 1 PPM 的农药或任何有机化学品会牢牢吸附于叶子表面的植物蜡和其他非极性化合物。一旦农药在叶面上变干，就会粘在那里。施用农药后不久进行灌溉，可以防止这种农药变干，从而使更多农药可以更深入地渗透到草坪剖面中。一旦水不溶性农药在叶面变干，施用农药后灌溉将无法有效地将农药从叶子上冲走。

如果使用杀菌剂百菌清，立即进行施用后灌溉不是一个好的做法，因为这一产品需要在叶面上才发挥其杀真菌活性。但是，如果预期的作用地点是土壤或茅草表面，例如，出芽前除草剂，则这些产品应在施用完成后立即进行施用后灌溉。这不仅减少了可用于径流的农药含量，还增加了渗入土壤或茅草表面的农药量。

第二个实验研究了农药施用与径流事件间隔的影响。没有人能够控制下雨的时间，但了解农药施用和

径流之间间隔的重要性仍然是有益的。该实验中，在径流事件之前 12、24、48 或 72 小时施用农药。施用的农药是二甲戊灵（PreM™），丙环唑（Banner Maxx™）和精甲霜灵（Subdue Maxx™）。

在这个实验中，结果非常明显。无论水溶性如何，农药施用和径流之间的时间越长，径流中检测到的农药就越少。虽然是可以预期的，但有趣的是，施用农药后 12 小时与施用农药后 24、48 或 72 小时的径流之间径流中农药含量差异总体而言是很显著的。换句话说，如果在施用农药后 1、2 或 3 天发生径流，那么农药的流失量就没有很大的差别。但如果径流事件发生在施药后 12 小时之内，则径流中农药含量则会大幅上升。例如，就质量而言，径流发生在施用后 12 小时，我们从径流水中回收了 8.9 毫克的二甲戊灵，但在施用后 72、48 或 24 小时，径流中分别仅含有 1.5、1.6 或 1.2 毫克。本研究中其他两种农药的结果相似。

这项试验的一个令人惊讶的结果是，就质量而言，径流中的丙环唑含量比精甲霜灵多。这一结果与我们的假设相反，即农药的水溶解度越大，就越容易受径流影响。一般来说，精甲霜灵在径流中的初始浓度高于丙环唑，但随着农药流失越来越多，精甲霜灵的浓度降低，而丙环唑的浓度则未明显降低。也许由于精甲霜灵的水溶解度更大（参见表 1），有精甲霜灵可能在开始降雨时更容易渗入土壤和茅草中，而水溶解度较小的丙环唑可能会保

**表 1**  
伊利诺伊大学径流研究中使用的农药

通用名称	商品名称	水溶解度 (毫克/升)
精甲霜灵	Subdue Maxx	26,000
丙环唑	Banner Maxx	110
多效唑	Trimmit	35
百菌清	Daconil	0.6
二甲戊灵	Pendulum	0.3

留在冠层上部，继续与流过草地表面的水相隔离。

第三个实验评估了移除刈割物对农药径流的影响。在夏季，对高尔夫球场果岭、发球台和球道每两周施用一次农药。农药施用的很大一部分沉积在叶片组织上，并且大部分施用药物将一直吸附（描述可被吸附和吸收的物质的术语）在叶片组织。我们将这项研究进行了简化，只比较了两种处理方式：移除刈割物与放回刈割物。在本实验中，于 2003 年 7 月 15 日上午 9 时施用农药。次日上午 9 时修剪了这些地块，并通过灌溉模拟径流，一小时后（上午 10 点）开始发生径流事件。

如预期的那样，去除刈割物减少径流农药含量（表 2）。就质量（即除去的农药总量）而言，考察数据时，必须基于几个重要因素考量数据。首先，减少农药径流含量（以及其他形式的非现场转移）的一个重要因素是使用需要较少量活性成分的农药。就质量而言，百菌清流失量比其他两种农药更多。然而，就施用百分比而言，百菌清流失量比其他两种农药少得多（表 2）。百菌清是一种较老的产品，比许多较新的农药使用率更高。因此百菌清以 11.21 磅 ai/A 的比率施用，而较新的化学品通常以

11 磅 ai/A 或以下的比率施用。尽管百菌清水溶解度极低，不太可能流失（如百分比数据所示），但是在径流中回收了更多的百菌清，因为百菌清施用量比其他两种农药高 16 至 44 倍。其次，农药量是径流中的农药浓度和径流总量的乘积。在试验中，我们尽可能使用统一的地块，但地块之间的径流量仍有很大的差异。这直接影响到径流量，可使数据的解读难度增大。

修剪管理对农药径流量影响很大。通过去除刈割物，农药径流减少了 34%-57%。我们怀疑，修剪处的农药径流量更大，可归因于径流中的刈割物。我们在径流水中观察到一些刈割物，并在分析之前通过过滤除去了刈割物。在沉积物（刈割物和其他颗粒）中发现的农药量只占从径流中回收农药量的一小部分。因此，去除刈割物的农药径流量的减少，很可能是径流发

生时可用农药量减少的造成的直接结果。然而，虽然径流中农药的减少量很大，但是却引出了一个问题：刈割物发生了什么。如果刈割物简单地存放在高尔夫球场的其他地方，则径流问题不一定会减少；只会重新分配。

### 经验教训

这项研究的目的是制定最佳的管理措施，以减少农药径流。最有效的做法是去除刈割物，但刈割物本身含有大量农药，必须负责任地进行处理。球场草坪代表着所谓的非点源污染问题；也就是说，潜在的污染物分布在低浓度的大面积地区。收集刈割物并将其放在一起堆积起来，本质上会产生点源污染问题。但是，创建刈割物堆肥应能使堆肥中的农药相对快速地降解。如果排水得到控制，这将是一个特别好的选择。

无论您是否将移除刈割物作为减少农药径流的部分最佳管理方案，本研究都表明了一个结果：刈割物可能是农药的重要来源。无论您是放回还是收集刈割物，请注意，农药施用后立即刈割的剪切物含有大量农药。将这些刈割物放回草地将富有价值，特别是在施用土壤活性

**表 2**  
径流期农药流失量——移除刈割物的影响

农药	施用率 (磅 ai/A)	刈割物处理	流失总量 (毫克)	施用百分比
精甲霜灵	0.7	移除	21.3	0.98
		放回	37.2	1.70
多效唑	0.25	移除	8.3	1.06
		放回	12.7	1.62
百菌清	11.2	移除	65.4	0.19
		放回	153.7	0.44

农药（例如芽前一年生草除草剂）和根吸收药剂（如植物生长调节剂多效唑或调嗒醇）的情况下。

应避免在预期的雨水事件发生后 12 小时内使用农药。与农药施用 12 小时内相比，农药施用后 24-72 小时发生的径流事件含有的农药浓度与径流量较低。

选择低活性成分施率的农药，能显著减少农药径流含量。许多较新的农药化学品，其施用量为 30-120 克 ai/A（约 0.1-0.3 磅 ai/A）。减少农药径流或浸出的最佳方法是不使用农药。次优方法是选择对环境无害的农药，最好的方法之一是降低施用率。

最后，使用缓冲带是最好的管理方法。缓冲带是不用农药处理的植被带。在径流实验中，我们将农药施用于径流收集装置的 2 英尺内。在经处理的草坪和径流水进入河流、排水系统或直接进入水域的其他地点之间，任意增加未经处理草坪或其他景观种植面积都会显著减少农药径流量。出现这种情况有两个原因。首先，草坪会去除一些从其中流过的农药；也就是说，一些农药会吸附于草坪草。其次，由于含有农药的径流进入没有农药的缓冲带，简单的稀释会降低最终进入水体的农药浓度。

农药径流量是高尔夫球场管理者必须意识到的重要问题，并且必须了解潜在问题的根源。流经高尔夫球场的水体需要保护。即使您的高尔夫球场没有地面水景，也必须多加小心。许多高尔夫球场管理人员使用地表排水渠清除低洼或排水性差地区中多余的水。通常这些排水

最终会导致地表水体。因此，如果使用地表排水渠去除多余的水，则可能很容易将球道所施用的农药带离高尔夫球场。

#### 参考文献

1. Cisar, J. L., and G. H. Synder. 1996. Mobility and persistence of pesticides applied to a USGA green. III: Organophosphate recovery in clippings, thatch, soil, and percolate. *Crop Sa.* 36:1433-1438.
2. Gardner, O. S., and B. E. Branham. 2001. Mobility and dissipation of ethofumesate and halofenozide in turf grass and bare soil. *J. Agric. Food Chem.* 49:2894-2898
3. Gardner, O. S., and B. E. Branham. 2001. Effect of turf grass cover and irrigation on soil mobility and dissipation of mefanoxam and propiconazole. *J. Environ. Qual.* 30:1612-1618
4. Gardner, O. S., B. E. Branham, and D.W. Lickfeldt. 2000. Effect of turf grass on soil mobility and dissipation of cyproconazole. *Crop Sci.* 40:1333-1339
5. Gold, A.J., T. G. Morton, W. M. Sullivan, and J. McClory. 1988. Leaching of 2, 4-D and dicamba from home lawns. *Water, Air, and Soil Pollution.* 37:121-129.
6. Petrovic, A. M., W C. Barrett, I. Larsson-Kovach, C. M. Reid, and D.J. Lisk. 1996. The influence of a peat amendment and turf density on downward migration of metalaxyl fungicide in creeping bentgrass sand lysimeters. *Chemosphere.* 33(11):2335-2340.
7. Smith, A. E., and D. C. Bridges. 1996. Movement of certain herbicides following application to simulated golf course greens and fairways. *Crop Sci.* 36:1439-1445

8. Wauchope, R. D., T. M. Butler, A. G. Hornsby, P.W.M. Augustijn-Beckers, and J. P. Burt. 1991. The SCS/ARS/CES pesticide database for environmental decision-making. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 123:1-155

9. Yates, M. v: 1995. The fate of pesticides and fertilizers in a turf grass environment. *USGA Green Section Record.* 33(1):10-12.

**编者按：**本文以及 USGA 草坪草和环境研究计划资助项目结果的许多其他报告，请参见 USGA 在线草坪草和环境研究 (<http://usgatero.msu.edu>)。

B. E. 布拉纳姆，博士，副教授；  
F. Z. 坎迪尔，博士，助理研究员；  
和 J. 穆勒，助理研究员；伊利诺伊州厄巴纳—香槟地区伊利诺伊州大学自然资源与环境科学系。