

# 烤烟坡耕地壤中流氮、磷浓度的动态特征

褚利平<sup>1</sup>, 王克勤<sup>1</sup>, 宋泽芬<sup>1</sup>, 李太兴<sup>2</sup>, 李云蛟<sup>3</sup>

(1.西南林业大学环境科学与工程系, 昆明 650224; 2.云南省玉溪市水利局, 云南 玉溪 653100; 3.云南省澄江县水利局, 云南澄江 653102)

**摘要:**选取我国西南部抚仙湖流域典型小流域——尖山河流域为试验区,以流域主要土地利用类型——烤烟坡耕地土壤为研究对象,在天然降雨条件下,原位监测了作物整个生长期,坡耕地土壤不同坡位壤中流(0~2 m)中磷、氮的浓度垂直分布特征及其时间动态变化规律。结果表明,不同坡位各层壤中流总氮(TN)和总磷(TP)浓度变化趋势基本一致,但不同坡位壤中流中 TP 浓度随深度的变化呈波动递减规律,随深度的增加变异系数变小。坡位对 0~50 cm 的壤中流氮、磷浓度影响最大,坡下部明显大于坡中部。翻耕导致各层壤中流氮、磷浓度差异显著增大。各层氮、磷浓度与降雨量呈负相关。在 2 m 深处 TN 和 TP 浓度的平均值分别为  $6.371 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.024 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,超出相邻水体(抚仙湖)中氮、磷浓度的控制要求。这一结果表明,尖山河流域土壤表层中的氮、磷含量较高,丰富的降雨-壤中流过程极易推动土壤氮、磷传输。因此,除了地表径流传输控制外,如何有效抑制壤中流中的氮、磷迁移对该区域水环境污染的治理十分关键。

**关键词:**坡耕地;非点源污染;总氮;总磷;壤中流

**中图分类号:**X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1346-09

## Dynamics of Nitrogen and Phosphorus in Tobacco Slope Cropland Interflow

CHU Li-ping<sup>1</sup>, WANG Ke-qin<sup>1</sup>, SONG Ze-fen<sup>1</sup>, LI Tai-xing<sup>2</sup>, LI Yun-jiao<sup>3</sup>

(1. The Faculty of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yuxi Municipal Hydrological Bureau, Yuxi 653100, China; 3. Chengjiang County Hydrological Bureau, Chengjiang 653102, China)

**Abstract:** An experiment was conducted on a slope cropland in Jianshan River basin, a typical catchment in the area of Fuxian Lake, southwest China to study the vertical distribution and the movement of nitrogen and phosphorus within the soil layer 0~2 m during the tobacco growing season under the condition of rainfall. The results showed that the variation of TN and TP content at soil layers interflow in different slope position was not big. But the interflow TP concentration declined fluctuantly and the coefficient of variation became smaller as the depth increasing in different slope positions. The TN and TP content of interflow within 0~50 cm were affected mostly by slope position, which were low at the middle part slope land, enriched at lower part slope land. The farmer ploughs soil up had nitrogen and phosphorus content been different at soil layers interflow. Also, the concentration of nitrogen and phosphorus of interflow was negatively correlated with rainfall. The average concentrations of TN and TP at the depth of 2 m were  $6.371 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.024 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively, which was beyond the control requirements to discharge nitrogen and phosphorus into adjacent water body of Fuxian Lake. The studies showed that there were rich nutrients of N and P in the surface soil at Jianshan catchment. The process of soil interflow through the rainfall promoted the translocation of N and P. How to control the moving of N and P of interflow, besides the control of runoff, might be an efficient way for maintaining the water quality of Fuxian Lake.

**Keywords:** slope land; nonpoint source pollution; TN; TP; interflow

水体富营养化的原因及其过程十分复杂。国内外大量研究表明,来自农业投入的氮、磷的流失,特别是

磷又往往成为内陆水体富营养化的重要诱导因素<sup>[1-5]</sup>。目前农田土壤中的氮、磷通过淋溶输出进入江河湖泊并引发水质恶化,已受到广泛重视<sup>[6]</sup>。为解决水体富营养化难题,各国都在控制营养物质的来源也即主要是氮磷,并投入了大量的人财物力。我国的太湖、巢湖和滇池等富营养化十分严重的湖泊也被定为国家水污染防治重点。抚仙湖地处滇中,是我国目前已探明的

收稿日期:2010-03-12

基金项目:国家自然科学基金(30660037);云南省自然科学基金(2006 D0041M);云南省科技计划(2006SG20)

作者简介:褚利平(1983—),女,山东枣庄人,硕士,主要研究方向为水土保持及面源污染物输出机理。E-mail:83chu@163.com

通讯作者:王克勤 E-mail:wangkeqin7389@sina.com

第二深水湖泊,也是云南省蓄水量最大的湖泊。近年来流域内人类活动的影响导致湖泊氮、磷浓度增加,水质逐年下降。根据 2007 年中国水资源公报,云南的抚仙湖总体水质已由Ⅰ类下降为Ⅱ类,属于贫营养型湖泊的典型代表<sup>[7]</sup>。抚仙湖污染主要来自面源,约占总负荷量的 90%以上,而这其中的大部分又是来自农田的地表和地下径流<sup>[8]</sup>。在降雨量丰沛地区,土壤水分饱和度高,土壤壤中流现象明显,非点源污染物借助壤中流传输的概率较高,壤中流在污染物传输方面的机制与效应必须受到关注<sup>[9]</sup>。

目前国内土壤氮、磷素的淋溶研究多为模拟法,采用室内模拟法<sup>[10-11]</sup>或大型原状土柱法研究为主<sup>[12]</sup>,缺少野外定量研究,尤其对坡耕地坡面尺度壤中流中氮、磷浓度的动态特征研究在国内还未见报道。因此,本研究选取抚仙湖流域尖山河小流域典型红壤烤烟坡地建立田间试验点,采用陶瓷多孔杯法原位监测作物整个生长期,坡耕地土壤不同坡位壤中流中磷、氮的浓度垂直分布特征及其时间动态变化规律,以期为源头控制农田氮磷素的损失和防止水体的富营养化提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于珠江南北盘江上游岩溶区域的玉溪市澄江县尖山河小流域,为抚仙湖的一级支流。地理位置位于北纬 24°32′00″~24°37′38″、东经 102°47′21″~102°52′02″之间,海拔在 1 722.0~2 347.4 m 之间;流域总面积 35.42 km<sup>2</sup>。尖山河小流域多年平均降雨量为 1 050 mm,干湿季分明,流域降雨受季风的影响多集中在夏季。雨季为 6—10 月,降雨量占全年总降雨量的 75%,暴雨基本出现在雨季。年平均径流深 30 mm,年均蒸发量为 900 mm。流域全年日照总时数 2 172.3 h,≥10℃的活动积温约 3 400℃,年均气温 14.2℃,无霜期 265 d。主要地类有云南松天然次生林,云南松—兰桉人工林,荒山荒坡,坡地和梯田等,农作物以种植烤烟为主,流域土壤主要是红紫泥土和红壤。在试验地旁布设 JDZ-1 型数字自记雨量计测定每场降雨的降雨量和降雨历时,相应的降雨量分布见图 1。

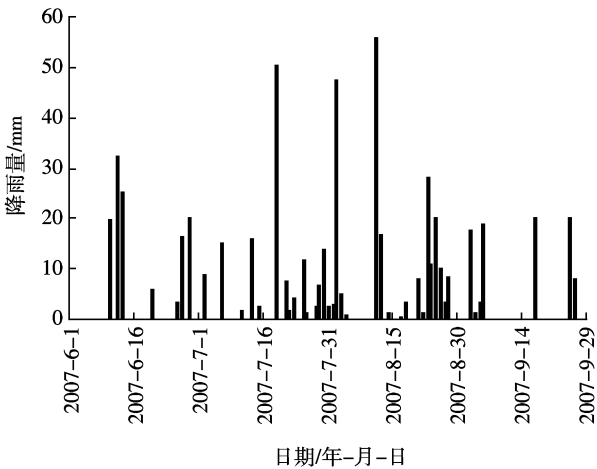


图 1 试验期内尖山河流域的日降雨量分布  
Figure 1 The daily precipitation during experiment in Jianshan River catchment

1.2 试验方法

选择抚仙湖流域尖山河小流域有代表性的烤烟坡耕地作为供试基地,当地海拔 1 773 m,坡度 18.58°,坡向为南北向,历年种植作物主要为烤烟、大豆、苦荞、小麦等。2007 年种植烤烟,种植密度为 16 500 株·hm<sup>-2</sup>,施用的化肥主要是烟草专用复合肥,氮肥施用量(以 N 计)105~135 kg·hm<sup>-2</sup>,施肥比例(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O)为 1:0.5:(2.5~3),采用穴状施肥。试验前对烤烟坡耕地土壤进行了基底调查,采用蛇形采样法共采集土样 12 个,取样深度 20 cm,供试土壤为砂壤质红壤,其基本理化性质见表 1(注:速效磷浓度偏大,分析其原因有可能是农民往地里施牛粪肥等原因以及以往过量施肥导致。由于种烤烟一般都会覆膜,磷在表层积聚,随径流流失的少,下渗的慢,都有可能是导致速效磷浓度偏大的原因)。

试验地采用陶瓷多孔杯(suction cup)<sup>[13]</sup>采样器采集土壤溶液(陶瓷多孔杯外径 4.8 cm,高 6.2 cm,杯微孔约 2.9 μm,空气进入量 0.1 mPa)。陶瓷多孔杯采样器由 PVC 管和陶瓷多孔杯组成。在安装前先用稀盐酸淋洗陶瓷多孔杯,然后用蒸馏水彻底冲洗干净。

为了比较壤中流中氮磷素在坡面尺度不同坡位处不同深度的土壤垂直剖面上的迁移差异,2007 年 6 月在同一坡地的坡中部和坡下部分别平行埋设陶瓷

表 1 试验地表层土壤基本理化性质(0~20 cm)

Table 1 The basic physical and chemical properties of surface soil at the experiment field(0~20 cm)

| 土壤类型 | 容重/g·cm <sup>-3</sup> | 总孔隙度/% | pH   | 有机质/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮/g·kg <sup>-1</sup> | 碱解氮/mg·kg <sup>-1</sup> | 全磷/g·kg <sup>-1</sup> | 速效磷/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|-----------------------|--------|------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 红壤   | 1.39                  | 47.55  | 4.93 | 10.8                   | 0.37                  | 68.17                   | 0.94                  | 350.97                  |

多孔杯采样器来收集土壤溶液。其中,坡中部均匀埋设 4 种不同深度的陶瓷多孔杯采样器来收集壤中流,依次为 32、47、77、107 cm(PVC 管和陶瓷多孔杯的总高度,以下同);在坡下部均匀埋设 7 种不同深度的陶瓷多孔杯采样器用来收集土壤溶液,深度依次为 32、47、77、107、137、167、200 cm。分别埋设 3 组重复,每组重复坡中部和坡下部垂直距离为 3.5 m,3 个重复之间水平距离为 2 m。

根据降雨情况,每半月左右抽取土壤溶液 1 次,取样负压为 0.8 MPa。每次收集土壤溶液时,提前 24 h 用真空泵对陶瓷多孔杯采样器进行抽气。试验分析在室内进行。水样送回实验室后,立即预处理,贮存在 4℃ 冰箱中,于 24 h 内进行分析,分析指标为总氮(TN)、总磷(TP)。

### 1.3 分析方法

各项指标均在室内进行分析检测,总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;总磷(TP)用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定<sup>[14]</sup>。采用 Microsoft Excel 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 烤烟生长季不同坡位不同层次壤中流氮、磷浓度随时间的水平动态变化

通过野外原位连续采样监测的方法,于 2007 年 6 月至 9 月对烤烟坡地不同坡位不同深度处的壤中流氮、磷浓度进行了监测,坡面尺度不同坡位不同层次壤中流氮、磷浓度随时间的水平动态分布见图 2。

#### 2.1.1 氮素随时间的水平动态变化

烤烟坡地不同坡位(坡中部和坡下部)不同深度壤中流产生的 TN 浓度随时间的变化情况见图 2。从图中可以看出,坡中部和坡下部不同层次的壤中流产生的 TN 浓度随时间的变化趋势基本一致,氮素在不同层次的壤中流含量随烤烟生长进程的推进表现为先增加后递减的趋势,而且尽管壤中流初期(7 月 19 日)不同层次的氮素含量有较大差异(原因可能在于供试土壤磷素的基础含量与水分含量的差异),但是在后期(9 月 3 日)随着氮的固定与被吸收,各层次壤中流的 TN 含量差距缩小。

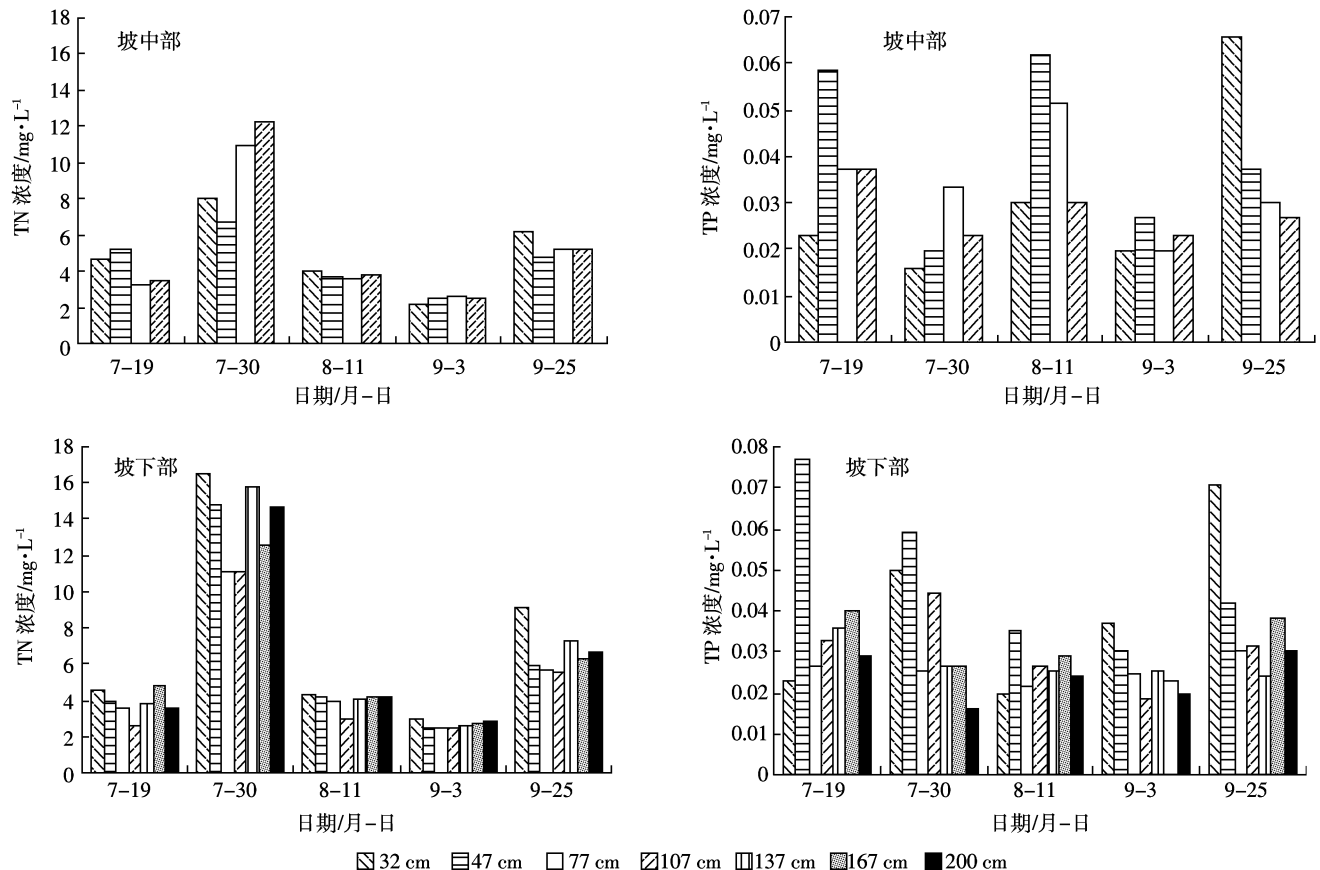


图 2 土壤壤中流 TN、TP 浓度的水平动态变化(2007 年)

Figure 2 The horizontal dynamics of TN&TP concentration at soil layers interflow in 2007

本试验于 2007 年 6 月对烤烟根部进行穴状追肥并加以覆膜,随后进行壤中流抽取,但并未取到,直到 7 月 19 日才抽取到各层壤中流。自施肥以后,7 月份连绵降雨(见图 1),肥料养分逐渐矿化溶解进入土壤,各层 TN 浓度逐渐达到峰值。烤烟在 7 月中旬前处于幼苗生长阶段,根系浅,对肥料的吸收利用较少,之后烤烟进入快速生长期,大量吸收养分,导致土壤溶液氮浓度开始下降。

研究表明<sup>[15]</sup>,氮肥在 7~10 d 就可以有大量的硝酸根态氮形成,也就是说,到 7 月中旬土壤上层(施肥层)有大量的硝酸根态氮;从降雨量看,7 月一直有降雨,尤其是 7 月中旬有一次大的降雨(超过 50 mm),7 月 19 日采集的样品中氮磷的含量都比较低。分析其原因,不断的降雨导致氮、磷素的不断淋溶渗漏,植物根系浅、吸收的也较少,此阶段是氮、磷损失量最大的时候,但频繁的降雨使壤中流流量增大,对溶液起到了稀释作用,因此浓度比较低。

而从次降雨量和累计降雨量与氮素浓度的关系看,在次降雨量一定的条件下,累计降雨量与总氮浓度的偏相关系数为-0.793 (sig.=0.207);在累计降雨量一定的条件下,次降雨量与氮素浓度的偏相关系数为-0.373 (sig.=0.627),可见氮素的浓度与降雨量呈负相关,这与前人研究的氮素流失负荷与降雨量呈正相关不同<sup>[6]</sup>。因为降雨虽增加了氮磷流失负荷,但大量降雨反而对壤中流 N、P 素浓度起到稀释作用,导致浓度降低。

9 月 25 日各层浓度有所回升,而 9 月 3 日和 25 日的次降雨量和累计降雨量接近,结合农事管理来考虑,这主要是由于烤烟 9 月 10 日采收完毕,除去地膜并进行除茬、翻耕等人为活动因影响土壤矿化和水分运动而影响氮素的淋失,导致后期土壤各层壤中流 TN 浓度大幅增高。耕作因影响土壤矿化和水分运动而影响硝态氮的淋失,耕作增加硝态氮淋失 21%<sup>[17]</sup>。Weed 等<sup>[18]</sup>研究认为,耕作影响土壤扰动程度和残留物的存在,进而影响土壤水分运动。耕地休整导致高的淋洗潜力,秋季耕翻的土壤比免耕的氮淋失潜力高<sup>[19]</sup>。在除膜、翻耕半月后,坡中部和坡下部壤中流层次平均的 TN 浓度分别高达  $4.896 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $6.638 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,分别为翻耕前(9 月 3 日)的 2.0 倍和 2.5 倍左右,其中坡下部 32 cm 和 200 cm 处 TN 浓度分别是翻耕前的 3.1 倍和 2.4 倍,表明翻耕使 0~200 cm 壤中流氮素浓度均有不同程度的增大,对表层影响最大。

## 2.1.2 磷素随时间的水平动态变化

烤烟坡地坡中部和坡下部不同深度的壤中流输出的 TP 浓度随时间的变化情况,见图 2。从图中可以看出,坡中部和坡下部壤中流输出的 TP 浓度随时间的变化趋势总体表现为在一定范围内呈波动性。

坡中部不同层次的壤中流磷含量随时间的变化表现为在一定范围内呈波动趋势,波动范围在  $0.016 \sim 0.067 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,表现出低而稳定状态;坡下部总磷浓度变化范围为  $0.015 \sim 0.081 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

从次降雨量和累计降雨量与磷素浓度的关系看,在次降雨量一定的条件下,累计降雨量与总磷浓度的偏相关系数为-0.994 (sig.=0.006);在累计降雨量一定的条件下,次降雨量、总磷浓度的偏相关系数为-0.207 (sig.=0.793),可见磷素的浓度与降雨量呈负相关,且与前期累计降雨量负相关性极显著。因为降雨虽增加了磷流失负荷,但大量降雨反而对壤中流磷素浓度起到稀释作用。

在 9 月 3 日和 9 月 25 日的 2 次大雨中,9 月 25 日浓度高于 3 日。从图 2 可看出,坡中部 32 cm 处总磷浓度在整个烤烟生长季波动在  $0.015 \sim 0.030$  之间,只是在烤烟采收后,浓度有大幅度增大,变为  $0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。据张志剑等<sup>[20]</sup>的研究发现,扰动土层在一定程度上可以释放土壤中的磷。土层扰动的结果使土壤的物理环境发生变化,如土壤孔隙状况及相应的通气状况等,这些变化可以促使好气土壤生物活动加剧,当这个过程与土壤结构的物理性破坏同时作用时,导致一部分土壤磷得以释放。由于 9 月 3 日和 25 日的次降雨量和累计降雨量接近,说明除降雨外,主要是除茬、翻耕等农作活动产生的影响。其中,9 月 25 日坡下部 32、200 cm 深度处的磷素浓度分别是翻耕前 9 月 3 日的 1.9 倍、1.5 倍。翻耕使 0~200 cm 壤中流磷素浓度均有不同程度的增大,对表层壤中流磷素浓度的影响更为明显,这也与施肥后大部分磷仍集中滞留于表层土壤有关<sup>[21]</sup>。

## 2.2 烤烟生长季不同坡位土壤壤中流氮、磷浓度随深度的垂直动态分布

坡面尺度不同坡位各个时段土壤壤中流氮、磷浓度随深度的垂直分布见图 3。烤烟生长季(6—9 月)不同坡位各层氮磷浓度统计特征值与变异系数垂直分布的变化趋势见表 2。

### 2.2.1 氮素随深度的垂直动态分布

不同坡位壤中流中总氮浓度从土壤表层到深层,前期波动幅度较大,后期各层浓度趋于一致(图 3)。

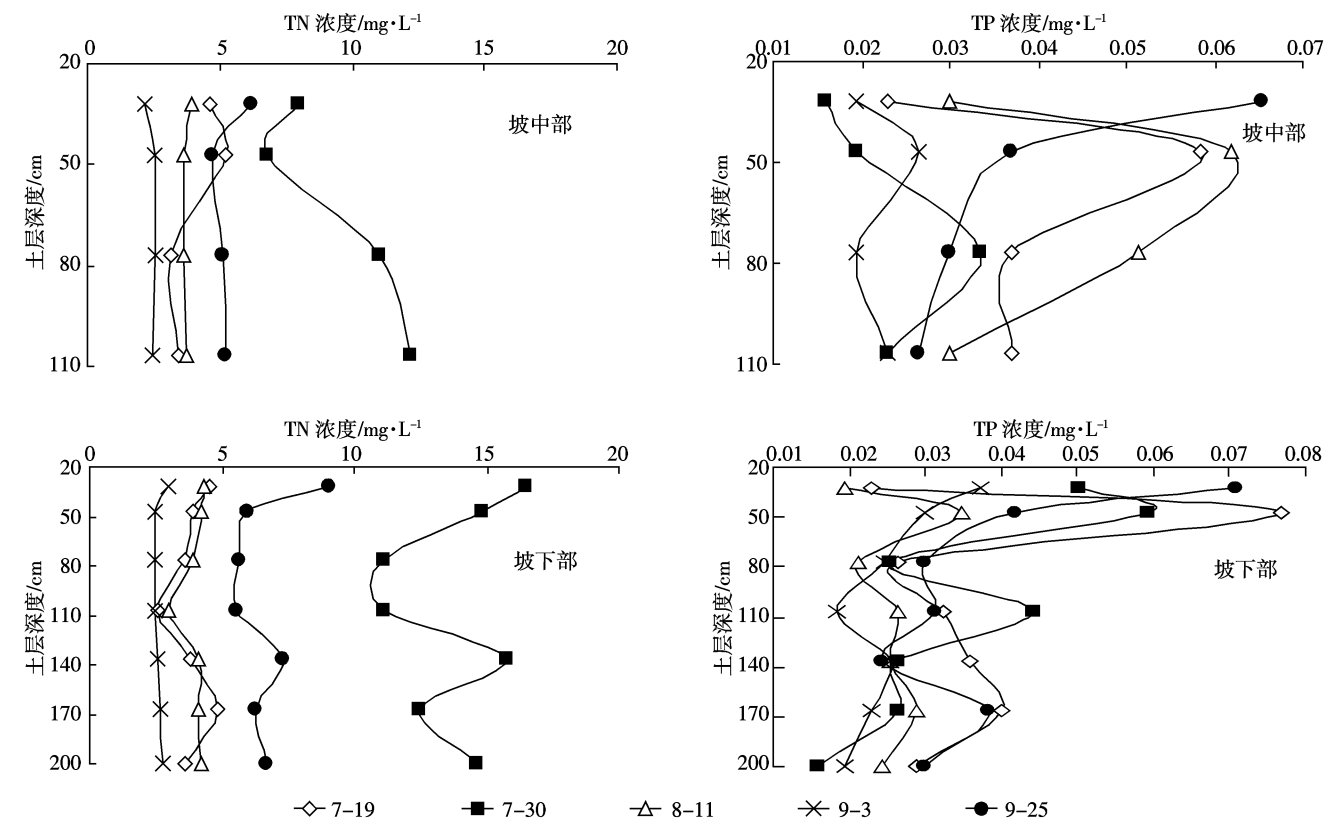


图 3 土壤中流 TN、TP 浓度的垂直动态变化(2007 年)

Figure 3 The vertical dynamics of TN & TP concentration at soil layers interflow in 2007

| 表 2 土壤中流 TN、TP 浓度(mg·L <sup>-1</sup> )剖面统计特征及变异系数(CV)(2007 年)                                                          |     |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Table 2 The statistical feature of TN & TP concentration and coefficient of variation at soil layers interflow in 2007 |     |       |       |       |       |       |       |
| 土层深度/cm                                                                                                                |     | TN    |       |       | TP    |       |       |
|                                                                                                                        |     | 均值    | 标准差   | CV    | 均值    | 标准差   | CV    |
| 坡中部                                                                                                                    | 32  | 4.639 | 2.111 | 0.455 | 0.031 | 0.020 | 0.645 |
|                                                                                                                        | 47  | 4.586 | 1.591 | 0.347 | 0.041 | 0.019 | 0.463 |
|                                                                                                                        | 77  | 5.118 | 3.419 | 0.668 | 0.035 | 0.013 | 0.371 |
|                                                                                                                        | 107 | 5.438 | 3.933 | 0.723 | 0.028 | 0.006 | 0.214 |
| 坡下部                                                                                                                    | 32  | 7.486 | 5.569 | 0.744 | 0.040 | 0.021 | 0.525 |
|                                                                                                                        | 47  | 6.281 | 4.940 | 0.786 | 0.049 | 0.019 | 0.388 |
|                                                                                                                        | 77  | 5.370 | 3.404 | 0.634 | 0.026 | 0.003 | 0.115 |
|                                                                                                                        | 107 | 4.938 | 3.680 | 0.745 | 0.031 | 0.009 | 0.290 |
|                                                                                                                        | 137 | 6.697 | 5.341 | 0.798 | 0.027 | 0.005 | 0.179 |
|                                                                                                                        | 167 | 6.085 | 3.823 | 0.628 | 0.031 | 0.007 | 0.226 |
|                                                                                                                        | 200 | 6.371 | 4.852 | 0.762 | 0.024 | 0.006 | 0.250 |

在 0~110 cm 土层坡下部总氮浓度随深度的增加基本呈递减趋势,而坡中部未观测出稳定的规律。其中,0~50 cm 层坡下部总磷浓度明显大于坡中部浓度,分别是坡中部浓度的 1.4~1.6 倍,标准差和变异系数也均

大于坡中部(见表 2),说明坡地壤中流总氮含量在坡中部和坡下部 0~50 cm 层空间分布差异较大,坡下部壤中流中总氮浓度大于坡中部,且变化幅度也较坡中部的大。而 50~110 cm 层坡中部和坡下部的总氮浓度几乎重叠,标准差和变异系数均相近,从图 3 也可看出,在 50~110 cm 层坡中部和坡下部的总氮垂直时空分布基本相同,这说明总氮在坡中部和坡下部 50~110 cm 空间分布无差异。究其原因,坡地土壤养分侧渗使得坡下部 0~50 cm 壤中流总氮浓度达到坡上部的 1.50 倍左右,变异系数是坡上部 2 倍左右。这说明坡位对 0~50 cm 的壤中流总氮浓度响应度高,对土层 50 cm 以下的影响较小。烤烟的主根可下扎 2 m 以上,但 70%~80% 的根系集中于 16~50 cm 的土层内<sup>[2]</sup>,坡下部有利于养分表层积累,有利于烤烟根系对养分的吸收利用,因此在施肥时可根据不同坡位确定最佳施肥量。

坡下部在 130~200 cm 层总氮的迁移浓度较高,各层波动幅度相似,变化范围为 2.613~15.738 mg·L<sup>-1</sup> 平均值为 6.385 mg·L<sup>-1</sup>。在 200 cm 层总氮浓度的变化范围为 2.791~14.656 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为 6.371 mg·L<sup>-1</sup>,

远远高于我国淡水水体总氮水平的管理标准。土壤中原有的和施肥带入的氮都存在随渗漏流失从而污染地下水的风险<sup>[23]</sup>。红坡坡耕地氮素有较高的淋溶率,是氮素损失的主要途径之一<sup>[24]</sup>。在整个抚仙湖地区,坡耕地是主要土地利用类型之一,加之该地区丰沛的降水,壤中流过程持续时间长,土壤养分借助壤中流进入相邻收纳水体,是除地表径流传输外的另一个很重要的方式。

### 2.2.2 磷素随深度的垂直动态变化

从图3和表2可看出,坡中部0~110 cm层壤中流总磷平均浓度表现为在0~50 cm层浓度递增,50 cm以下基本呈递减趋势,均值浓度变化范围在0.028~0.041 mg·L<sup>-1</sup>。说明表层壤中流磷素浓度迁移较下层浓度高。

坡下部0~200 cm层壤中流总磷含量随深度的变化并不是持续直线增加或降低,而是从表层到深层呈现波浪状递减趋势,均值浓度表现为低而稳定状态,变化范围为0.024~0.049 mg·L<sup>-1</sup>。从图3也可进一步反映,在不同时期的各层次的壤中流总磷浓度呈现波动递减趋势,只是不同时期的波动幅度有所差异。这也证明磷在垂直方向上有迁移。

由于土壤固磷量大,且固定过程十分迅速,磷在土壤中的扩散移动极弱(扩散系数为0.000 5~0.001 cm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>·10<sup>-5</sup>)<sup>[25]</sup>,较难穿透较厚的土层。在9月3日和9月25日的2次大雨中,9月25日浓度高于3日,说明除降雨外,农业耕作措施对磷的流失有重要影响,这可能与大空隙产生的优势流有关。由于优势流的出现,使磷能够迁移到深层土壤<sup>[26]</sup>。优势流过后,磷的向下迁移还是比较困难。

虽然坡中部和坡下部的不同土层壤中流中磷素浓度均很低,但仍能反映出磷素含量受坡位差异的影响,在0~50 cm层坡下部的各层壤中流总磷浓度大于坡中部,在50~110 cm层浓度值相近,说明坡位对壤中流磷素浓度的影响主要体现在表层0~50 cm层。究其原因,主要是因为在地表坡面上,由于长期的冲刷和淋溶,使坡面地表的养分物质流失并向下坡位富集。

土壤对磷素具有强烈的吸持能力,在1 a的降雨条件下,在棕壤土中施入土壤中的水溶性磷能迁移到20 cm土层<sup>[27]</sup>。谢学俭等<sup>[18]</sup>用标记的方法对田间条件下<sup>32</sup>P在淹水水稻土中的垂直运移进行研究,结果表明可溶性磷施入水田后,较非淹水环境更易于向下迁移,其迁移距离明显增加,0~30 cm的土层中均有<sup>32</sup>P

的痕迹,但大部分磷仍集中滞留于表层土壤。烤烟坡地0~200 cm的壤中流磷素浓度的动态变化,说明磷的流失不仅来自化肥,土壤本身积累的磷也是一个来源;同时说明在坡中部0~100 cm层和坡下部0~200 cm层土壤磷素均有积累,其中烤烟坡地坡中部和坡下部0~50 cm有磷大量积累。

坡中部和坡下部都是随着深度的增加,变异系数值总体趋向变小,说明总磷浓度的变化随深度的增加趋于稳定。在200 cm层总磷浓度的变化范围为0.015~0.031 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为0.024 mg·L<sup>-1</sup>。国际上一般认为总磷浓度为0.02 mg·L<sup>-1</sup>是湖泊水体发生富营养化的临界浓度<sup>[28]</sup>,其中磷是水体产生富营养化的限制因素。烤烟红壤坡耕地坡下部的200 cm处壤中流的磷含量比国际标准的限值略高。另外,由于磷易在土壤中长期累积,以目前抚仙湖地区常规施肥量,在10~20 a后壤中流中的磷浓度将会明显升高。在某些情况下,比如连续降雨或施用有机肥的情况下有可能会发生强淋溶<sup>[29]</sup>,从而对地下水及地表水环境造成潜在影响,加大抚仙湖富营养化的风险,所以其环境影响不能忽视。

此外,从图3可看出坡中部的氮磷浓度变化不同步,这可能与土壤理化性质有关。本试验中测得坡中部土壤pH大于坡下部,这可能也是导致坡中部磷素浓度变化受坡位影响较小,也不与氮素变化同步变化的原因。有研究表明,高pH和低盐中碳酸根离子的存在能显著增加磷的解吸能力<sup>[29]</sup>。

### 2.3 壤中流中总氮/总磷浓度动态变化

壤中流中总氮与总磷浓度比值与气候、土壤、地理等因素有关,在一定条件下,可将该比值作为壤中流中氮磷的协同作用指标。此外,从水体富营养化角度看,水生植物的生长需要一定的氮、磷浓度与比率,如果磷素未达到一定含量,仅有氮、碳等元素不会引起水体富营养化,从此角度出发,考核总氮/总磷动态变化有一定的意义<sup>[30]</sup>。图4为本试验中不同时间各层次的壤中流中总氮与总磷的比值图。由该图可以看出,各层次的壤中流中氮素的损失都大于磷,总氮/总磷在7月30日达到最大,此后逐渐下降。不同层次的土壤壤中流总氮/总磷随时间的动态变化同总氮浓度随时间的变化趋势基本一致,其间起主要作用的往往在于总氮的含量,通常它的下降幅度要比总磷大得多。7月30日是次降雨量最小的一次,也是累计降雨量最少的一次(52.4 mm),导致7月30日总氮浓度最大,而总氮的含量下降幅度要比总磷大得多,以至于

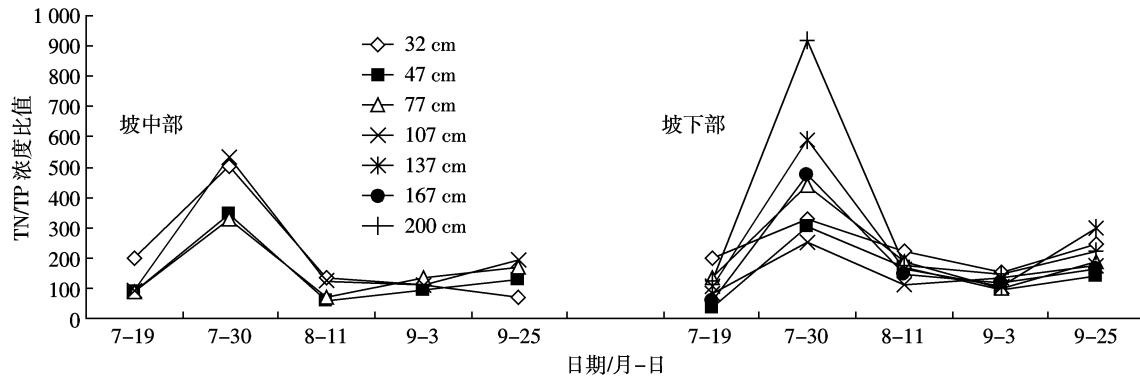


图4 土壤壤中流 TN/TP 动态变化

Figure 4 The dynamic of TN/TP at soil layers interflow

总氮/总磷在7月30日达到最大,此后逐渐下降。

### 3 讨论

#### 3.1 对与前人研究相似的结果予以证实的阐释

烤烟生长季不同坡位壤中流中总磷浓度从表层到深层(200 cm)呈现波浪状递减趋势,而总氮则在坡下部0~110 cm呈递减规律,110~200 cm呈波动式递减,而坡中部0~110 cm未观测出稳定的规律。单艳红等<sup>[20]</sup>通过模拟土柱试验装置对水田0~70 cm深处的土壤磷的动态变化研究表明,磷在表层、20、40、60、70 cm土层土壤水中的含量基本呈下降趋势,而氮素未观测出稳定的规律,与本文结果基本相似。究其原因,农田氮磷的渗漏损失有其地域的特点,土壤特性、气候因子、作物种植制度、水肥管理等因素<sup>[31-32]</sup>相互作用,形成了区域农田氮磷的淋失特征。

#### 3.2 本研究创新点

试验表明,不同坡位壤中流中总磷浓度从表层到深层(200 cm)呈现波浪状递减趋势,说明磷在垂直方向上有运移,而总氮浓度则从土壤表层到深层,前期波动幅度较大,后期各层浓度趋于一致,总体在0~110 cm各层呈递减规律,110~200 cm各层呈波动式递减趋势。

雨季农地翻耕导致土壤200 cm处壤中流中总氮和总磷浓度加倍增大,都超出了水体中氮、磷浓度的要求标准。因此,在实际生产中,翻耕要尽量避开雨季,减少氮磷流失及对地下水的污染。

坡位对0~50 cm的壤中流氮磷素浓度影响最大,坡下部明显大于坡中部。说明坡地养分分布具有明显的空间异质性。因此在施肥时可根据不同坡位确定最佳施肥量。

壤中流各层氮和磷的浓度与次降雨量和累计降

雨量呈负相关。

#### 3.3 需要说明的问题

本试验仅从常规施肥条件下进行了研究,不同施肥处理的氮、磷素的淋溶后果以及不同时期、不同深度土壤溶液中氮磷浓度与土壤性质等之间关系需进一步研究。Sharpley等<sup>[33]</sup>研究认为,尽管当季磷肥的流失量通常不超过5%,但对水体富营养化具有关键性的作用。因此,控制水体富营养化的有效措施是控制磷素的流失。土壤磷素的不断积累,在保护环境前提下,安全施用磷肥是我们需要探讨的新问题。

### 4 结论

(1)不同坡位各层壤中流产出的总氮浓度随时间的变化趋势基本一致,氮素在不同层次的壤中流含量随烤烟生长进程的推进表现为先增加后递减的趋势;壤中流产出的总磷浓度随时间的变化趋势总体表现为在一定范围内呈波动性递减规律。在除膜、翻耕半月后坡下部200 cm处总氮和总磷浓度分别是翻耕前的2.4、1.5倍,浓度分别为 $6.657 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,都超出了水体中氮、磷浓度的要求标准。因此从减少氮磷流失及对地下水污染的角度考虑,在生产中翻耕要尽量避开雨季,降低坡地土壤肥力的退化。

(2)不同坡位壤中流中总氮浓度从土壤表层到深层,前期波动幅度较大,后期各层浓度趋于一致。壤中流中总氮浓度很高,在110~200 cm各层波动幅度相似,变化范围为 $2.613 \sim 15.738 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,平均值为 $6.385 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在200 cm层总氮浓度的变化范围为 $2.791 \sim 14.656 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,平均值为 $6.371 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,远远超出了水体中氮浓度的要求标准。土壤养分借助壤中流进入相邻收纳水体,是除了地表径流传输外的另一个很重要的方式。

(3)不同坡位壤中流中总磷浓度从表层到深层呈现波浪状递减趋势,变异系数值变小,总磷浓度的变化随深度的增加趋于稳定,说明磷在垂直方向上有运移。在200 cm层总磷浓度的变化范围为0.016~0.030  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为0.024  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,比国际标准磷浓度的限值略高。另外,由于磷易在土壤中长期累积,有可能对地下水及地表水环境造成潜在影响,加大抚仙湖富营养化的风险。

(4)坡位对0~50 cm的壤中流氮磷素影响最大,坡下部明显大于坡中部,主要是由于长期的冲刷和淋溶,使坡面地表的养分物质流失并向下坡位富集的结果。说明坡地养分分布具有明显的空间异质性,在施肥时可根据不同坡位确定最佳施肥量。

#### 参考文献:

- [1] Klapper H. Control of eutrophication in inland waters[M]. New York: Ellis Horwood, 1991.
- [2] Sharpley A N, Paul J A Withers. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39:133-136.
- [3] Parry R. Agriculture phosphorus and water quality: A U. S. environmental protection agency perspective[J]. *Environ Qual*, 1998, 27:258-261.
- [4] Yin C Q, Shan B Q. The multipond systems—A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *Ambio*, 2001, 30(6):369-375.
- [5] 姜翠玲, 崔广柏. 湿地对农业非点源污染地去除效应[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):471-473, 476.
- JIANG Cui-ling, CUI Guang-bai. Effectiveness of wetlands in removal non-point pollutants from agricultural source[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5):471-473, 476.
- [6] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2689-2701.
- LV Jia-long. Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2689-2701.
- [7] 中华人民共和国水利部公报:2007年中国水资源公报[R]. 2009, 7(1):20-21.
- Gazette of the ministry of water resources of the People's Republic of China[R]. 2009, 7(1):20-21.
- [8] 李正兆, 高海鹰, 张奇, 等. 抚仙湖流域典型农田区地下水硝酸盐污染及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):286-290.
- LI Zheng-zhao, GAO Hai-ying, ZHANG Qi, et al. Nitrate pollution of groundwater and the affecting factors in typical farmlands of Fuxianhu Lake Catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):286-290.
- [9] 李娜, 单保庆, 尹澄清, 等. 六叉河小流域农田土壤中磷下渗迁移过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1132-1138.
- LI Na, SHAN Bao-qing, YIN Cheng-qing, et al. Movement of P-pollutant in an agricultural watershed in East China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1132-1138.
- [10] 刘忠翰, 彭江燕. 化肥氮素在水稻田中迁移与淋失的模拟研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2):9-13.
- LIU Zhong-han, PENG Jiang-yan. Simulation of transfer and leaching of fertilizer nitrogen in paddy field[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(2):9-13.
- [11] 陈国军, 陆贻通, 曹林奎, 等. 冬小麦氮素渗漏淋失规律测坑研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3):494-498.
- CHEN Guo-jun, LU Yi-tong, CAO Lin-kui, et al. Testing-hole on the nitrogen leaching loss in the winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3):494-498.
- [12] 黄满湘, 章申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗漏计测定冬小麦-夏玉米轮作期硝态氮淋失[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1):11-16.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, ZHANG Guo-liang. Soil core lysimeter study of nitrate leaching from a winter wheat-summer maize rotation[J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2003, 23(1):11-16.
- [13] Grossmann J, Udluft P. The extraction of soil water by the suction-cup method: A review[J]. *J Soil Sci*, 1991, 42:83-93.
- [14] GB 11893-89, 水质总P的测定, 钼酸铵分光光度法. GB 11894-89, 水质总N的测定, 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. GB11893-89(China). Water quality. Determination of total phosphorus. Ammonium molybdate spectrophotometric method; GB11894-89(China). Water quality. Determination of total nitrogen. Alkaline potassium persulfate digestion. UV spectrophotometric method[S].
- [15] 谢学俭, 陈品中, 肖琼, 等. 不同磷水平处理对水稻田面水中磷氮浓度动态变化的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27):8568-8570.
- XIE Xue-jian, CHEN Jing-zhong, XIAO Qiong, et al. Study on the dynamic characteristics of P and N in paddy field surface water and its potential environmental impact [J]. *Journal of Anhui Agri*, 2007, 35(27):8568-8570.
- [16] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil[J]. *Plant and Soil*, 1986, 93(3):333-345.
- [17] Wang X B, Bailey L D, Grant C A. A review of fertilizer N behavior in soils, and effective N management under conservation tillage systems [J]. *Prog Soil Sci*, 1995, 23(2):1-11.
- [18] Weed D A J, Kanwar R S. Nitrate and water present in and flowing from root-zone soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25:709-719.
- [19] Soldberg S O, Kristensen L, StoPes C, et al. Influence and crops and cultivation management on the nitrogen leaching potential on ecological farms in South East Norway[R]. *Veterinary and Agricultural University*, 1995:121.
- [20] 张志剑, 王珂, 朱荫涓, 等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1):55-57.
- ZHANG Zhi-jian, WANG Ke, ZHU Yin-mei, et al. Dynamic characteristics of phosphorus in surface water of paddy field and its potential environmental impact[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2000, 14(1):55-57.
- [21] 谢学俭, 冉炜, 沈其荣, 等. 田间条件下 $^{32}\text{P}$ 在淹水水稻土中的垂直运移[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(3):56-59.
- XIE Xue-jian, RAN Wei, SHEN Qi-rong, et al. Vertical movement of  $^{32}\text{P}$  in waterlogged paddy soils under field conditions[J]. *Journal of*



- Nanjing Agricultural University, 2003, 26(3):56-59.
- [22] 高家合, 周清明, 晋 艳. 烤烟根系研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(7):160-162.
- GAO Jia-he, ZHOU Qing-ming, JIN Yan. Research advances in root system of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7):160-162.
- [23] 单艳红, 杨林章, 颜廷梅, 等. 水田土壤溶液磷氮的动态变化及潜在的环境影响[J]. 生态学报, 2005, 25(1):115-121.
- SHAN Yan-hong, YANG Lin-zhang, YAN Ting-mei, et al. The variation of P & N contents in paddy soil water and its environmental effect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10):115-121.
- [24] 王兴祥, 张桃林, 张 斌. 红壤旱地农田生态系统养分循环和平衡[J]. 生态学报, 1999, 19(3):335-341.
- WANG Xing-xiang, ZHANG Tao-lin, ZHANG Bin. Nutrient cycling and balance of sloping upland ecosystems on red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3):335-341.
- [25] Hesketh N, Brookes PC. Development of an indicator risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:105-110.
- [26] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):282-285.
- ZHANG Ming -kui, WANG Li -ping. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):282-285.
- [27] 李同杰, 刘晶晶, 刘春生, 等. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4):35-39.
- LI Tong-jie, LIU Jing-jing, LIU Chun-sheng, et al. Study about movement of phosphate in brown soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4):35-39.
- [28] Sharpley A N, Meyer M. Minimizing agricultural nonpoint-source overview[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23:1-3.
- [29] 杨 珏, 阮晓红. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3):256-258.
- YANG Jue, RUAN Xiao-hong. Soil circulation of phosphorus and its effects on the soil loss of phosphorus[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3):256-258.
- [30] 金 洁, 杨京平, 施洪鑫, 等. 水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):357-361.
- JIN Jie, YANG Jing-ping, SHI Hong-xin, et al. Variations of nitrogen and phosphorus in surface water body of a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):357-361.
- [31] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998, 6:291-297.
- ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. The progress of research on nitrate leaching from farmland[J]. *Soil*, 1998, 6:291-297.
- [32] Stout W L, Gburek W J, Schnabel R R, et al. Soil-climate effects on nitrate leaching from cattle excreta[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27:992-998.
- [33] Sharpley A N, Charpa S C, Wedepoh J R, et al. Managing agriculture phosphorus protection of surface waters: Issues and options[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23:437-451.